

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE



Département de Métallurgie

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention de
Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Métallurgie

THEME :

***Mise au point d'un dispositif de fatigue (flexion)-
corrosion et caractérisation d'un alliage d'aluminium***

Proposé et dirigé par :

- Pr. Fatah HELLAL
- Mr. Hamid SEDJAL

Etudié par :

Mr. Samir OUARI

Promotion : juin 2009

Remerciement

Je tiens à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la patience et l'aide pour mener à bien ce modeste travail

Au terme de ce travail je tiens à remercier vivement Mr. F.HELLAL mon encadreur pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, pour sa disponibilité, ses conseils et son aide précieuse. Mr. H. SEDJAL mon Co-encadreur mérite également mes remerciements les plus sincères pour le travail qu'il a accompli, son aide et ses conseils

Je tiens à remercier également Mr A. KASSER pour m'avoir honoré en acceptant de présider le jury, Mr A.DAIMELLAH et K.ABADLI d'avoir accepté de juger mon travail, cela fera un honneur pour moi

J'exprime ma gratitude et ma profonde reconnaissance à mes parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé

Je n'oublie de remercier les enseignants de l'école nationale polytechnique, en particulier ceux du département de métallurgie, pour m'avoir offert un agréable cadre de formation

Je remercie également mes collègues de l'ENP

Les mots ne peuvent exprimer mes sentiments de reconnaissance et de gratitude à l'égard de mon ami Abdelhakim KAFI pour son aide précieuse et sa sympathie. N'est-ce pas Kimo !?

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail trouve ici l'expression de mes vifs remerciements et ma profonde gratitude

Dédicaces

Avant tout, à la personne la plus chère, celle que j'admire et j'aime le plus au monde, ma mère, qui s'est donné corps et âme pour l'éducation de ses enfants, et sans qui je ne serais jamais devenu ce que je suis

A mon père qui m'a épaulé tout au long de ma vie, qui a été un modèle pour moi, et que j'admire

A mes deux grands-parents, que dieu me les garde

A mes frères et sœurs que j'aime très fort, et à qui je souhaite tout le bonheur et la réussite du monde

Aux membres de ma famille (oncles, tantes, cousins et cousines)

A mes amis

A mes camarades de l'école nationale polytechnique

A tous ceux qui comptent pour moi

A tous ceux qui ont de près ou de loin assisté à ma formation

الملخص

الهدف من هذا العمل هو وضع وتركيب جهاز الإعياء (الثني) و التأكسد والقيام بتميز مركب الألمنيوم. لكي نقوم بتجريب حسن اشتغال الآلة, مجموعة من التجارب قمنا بها على عدة أنابيب اختبار مصنوعة من مركب الألمنيوم.

الكلمات الرئيسية: الإعياء بالأكسدة, تجربة الثني المستوي

Résumé

L'objectif de ce projet est la mise au point d'un dispositif de fatigue (flexion)-corrosion et caractérisation d'alliage d'aluminium.

Afin de tester le bon fonctionnement de la machine, une série d'essais a été effectuée sur différentes éprouvettes faites en alliage d'aluminium.

Mots clés: fatigue sous corrosion, essai de flexion plane.

Abstract

The intent of this project is the setting up of a fatigue (bending)-corrosion system and the specification of aluminium alloy.

In order to test the proper operation of a machine, series of tests were conducted on various samples made of aluminium alloy.

Key words: corrosion related fatigue, even bending test.

Liste des figures

<i>Figure I.1 : Les paramètres impliqués dans la destruction d'une pièce</i>	4
<i>Figure I.2 : types de contraintes lors d'un essai de fatigue</i>	5
<i>Figure I.3 : Contraintes alternées</i>	6
<i>Figure I.4 : Contrainte répétées</i>	6
<i>Figure I.5 : Contraintes alternées asymétrique</i>	6
<i>Figure I.6 : Cycle de contrainte de fatigue</i>	7
<i>Figure I.7: Aspect macroscopique d'une rupture en fatigue</i>	9
<i>Figure I.8 : Arbre rompu en fatigue</i>	9
<i>Figure I.9 : Exemple de courbe de propagation</i>	10
<i>Figure I.10: Loi de Paris</i>	11
<i>Figure 1.11 : Courbe type de Wöhler</i>	12
<i>Figure I.12 : Eprouvette lisse</i>	14
<i>Figure I.13 : Eprouvette entaillée</i>	14
<i>Figure I.14 : L'influence de l'environnement</i>	16
<i>Figure I.15 : Influence de la contrainte</i>	16
<i>Figure I.16 : Schéma général de conception d'une pièce devant tenir en fatigue</i>	17
<i>Figure II.1 : Distribution des charges et variation du potentiel électrique E en fonction de la distance (x) à la surface de l'électrode</i>	22
<i>Figure II.2 : Diagramme potentiel – pH du fer ($T= 25^{\circ}\text{C}$)</i>	22
<i>Figure II.3 : Représentation schématique de courbe de polarisation</i>	25
<i>Figure II.4 : Dispositif expérimental permettant de tracer les courbes de polarisation</i>	25

Figure II.5 :	<i>Courbes de polarisation et droites de Tafel d'un système redox à l'équilibre</i>	26
Figure II.6 :	<i>Courbe de polarisation anodique d'un métal ou alliage passivable</i>	27
Figure II.7 :	<i>Détermination de courant de corrosion par la méthode des droites de Tafe</i>	28
Figure III.1 :	<i>Représentation des différentes étapes d'endommagement en fatigue-corrosion</i>	31
Figure III.2 :	<i>Durée de vie d'acier inoxydable (nuance austénitique Cr17-Ni12-mo) en fatigue-corrosion</i>	32
Figure III.3 :	<i>fatigue-corrosion sur un acier à haute limite d'élasticité</i>	32
Figure III.4 :	<i>les différents types de propagation des fissures de fatigue-corrosion</i>	33
Figure III.5 :	<i>influence du potentiel sur la propagation de fissures de fatigue-corrosion sur un acier C-Mn en solution NaCl</i>	34
Figure III.6 :	<i>courbe S-N pour du 7075-T6 : en présence d'azote asséché, d'air ou d'une solution à 3% de Nacl</i>	36
Figure III.7 :	<i>effet du dommage causé par la corrosion »statique » sur la résistance à la fatigue du 7075-T6 dans une solution chlorurée</i>	36
Figure IV.1 :	<i>schéma du dispositif de fatigue-corrosion par flexion rotative</i>	39
Figure IV.2 :	<i>schéma de cellule de corrosion</i>	41
Figure IV.3 :	<i>schéma du dispositif de fatigue-corrosion par flexion plane</i>	42
Figure IV.4 :	<i>système à excentrique et coulisseau</i>	43
Figure IV.5 :	<i>système de transmission</i>	43
Figure IV.6 :	<i>enceinte de l'essai de fatigue-corrosion</i>	44
Figure IV.7 :	<i>éprouvette</i>	44
Figure IV.8 :	<i>cellule de corrosion</i>	45

<i>Figure IV.9: assemblage poulies-courroie</i>	46
<i>Figure IV.10 : éprouvette de flexion plane</i>	46
<i>Figure IV.11 : application de la force</i>	46
<i>Figure IV.12 : essai de flexion à trois points d'appuis</i>	47
<i>Figure V.1 : machine d'essai</i>	50
<i>Figure V.2 : le bras de guidage</i>	51
<i>Figure V.3 : le support de l'éprouvette</i>	52
<i>Figure V.4 : le dispositif de mouvement cylindrique</i>	53
<i>Figure V.5 : la tige poussoirs</i>	54
<i>Figure V.6 : le supporte</i>	54
<i>Figure V.7 : l'enceinte</i>	55
<i>Figure V.8 : enceinte pour essai de fatigue-corrosion</i>	56
<i>Figure V.9 : Plateforme</i>	56
<i>Figure V.10 : capteur de force</i>	57
<i>Figure V.11 : variateur de vitesse</i>	57
<i>Figure V.12 : potentiostat</i>	58
<i>Figure V.13 : carte d'acquisition</i>	58
<i>Figure V.14 : microscope optique</i>	58
<i>Figure VI.1 : micrographie optique sans polissage de l'éprouvette avant l'essai</i>	61
<i>Figure VI.2 : micrographie optique mettant en évidence l'évolution des facies de ruptures en fonction du nombre de cycle (N) lors d'un essai de fatigue-corrosion</i>	62

Figure VI.3 : graphe représente l'évolution de la largeur des fissures (a) en fonction du nombre de cycles N lors d'un essai de fatigue-corrosion-----63

Figure VI.4 : graphe représente l'évolution de la vitesse de propagation (da/dN) en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes (ΔK) lors d'un essai de fatigue-corrosion-----64

Figure VI.5 : micrographie optique mettant en évidence l'évolution des facies de ruptures en fonction du nombre de cycle (N) lors d'un essai de fatigue à l'air-----66

Figure VI.6 : graphe représente l'évolution de la largeur des fissures (a) en fonction du nombre de cycles N lors d'un essai de fatigue à l'air-----66

Figure VI.7 : graphe représente l'évolution de la largeur des fissures (a) en fonction du nombre de cycles N pour l'essai de fatigue à l'air et l'essai de fatigue-corrosion-----67

Figure VI.8 : graphe représente l'évolution de la vitesse de propagation (da/dN) en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes (ΔK) lors d'un essai de fatigue à l'air-----68

Figure VI.9 : graphe représente l'évolution de la vitesse de propagation (da/dN) en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes (ΔK) pour l'essai de fatigue à l'air et l'essai de fatigue-corrosion-----69

Figure VI.10 : micrographie optique mettant en évidence la propagation des fissures en profondeur-----69

Sommaire

<i>Introduction générale</i> -----	2
------------------------------------	---

Chapitre I : GENERALITES SUR LA FATIGUE

<i>I.1.Introduction</i> -----	4
<i>I.2.Définition de la fatigue</i> -----	4
<i>I.3.Classification des sollicitations des essais de fatigue</i> -----	5
<i>I.3.1Essai sous amplitude constante</i> -----	5
<i>I.3.2.Essai sous amplitude variable</i> -----	7
<i>I.3.3.Les paramètres d'un mode de sollicitation</i> -----	7
<i>I.4. Mécanisme de la fatigue</i> -----	8
<i>I.4.1. Amorçage d'une fissure</i> -----	8
<i>I.4.2. Propagation d'une fissure</i> -----	9
<i>I.4.3. Rupture brutale</i> -----	9
<i>I.4.4.Description de la propagation des fissures</i> -----	10
<i>I.5.Résultats des essais de fatigue</i> -----	11
<i>I.5.1.Courbe d'endurance ou de Wöhler</i> -----	11
<i>I.5.2.Endurance</i> -----	13
<i>I.5.3.La durée de vie</i> -----	13
<i>I.5.4.La limite de fatigue</i> -----	13
<i>I.5.5.La limite d'endurance</i> -----	13
<i>I.6.Classification des essais de fatigue</i> -----	13
<i>I.7. Les éprouvettes utilisées dans l'essai de fatigue</i> -----	13
<i>I.7.1.Eprouvettes lisses</i> -----	14
<i>I.7.2.Eprouvette entaillée</i> -----	14
<i>I.8.Les facteurs qui influent la résistance à la fatigue</i> -----	14
<i>I.8.1.État de surface</i> -----	15
<i>I.8.2.Effet d'échelle</i> -----	15
<i>I.8.3.Contraintes résiduelles</i> -----	15
<i>I.8.4.Effet de l'environnement</i> -----	15
<i>I.8.5.Influence de la contrainte moyenne</i> -----	16
<i>I.8.6.Influence de la fréquence</i> -----	17
<i>I.9.Une démarche pour résister à la fatigue</i> -----	17

Chapitre II : CORROSION ET ELECTROCHIMIE

II.1.introduction-----	19
II.2.définition de la corrosion électrochimique-----	19
II.3.Morphologie de la corrosion-----	19
II.3.1.Corrosion uniforme-----	19
II.3.2.Corrosion inter-granulaire-----	20
II.3.3.Corrosion par piqûres-----	20
II.3.4.Corrosion caverneuse-----	20
II.3.5.Corrosion intra-granulaire-----	20
II.4.Potentiel d'équilibre d'une électrode-----	20
II.4.1. Equation de Nernst-----	20
II.4.2.Processus aux interfaces-----	21
II.4.2.1.Interface électrode / électrolyte-----	21
II.4.2.2.Condition de corrosion et de prévision thermodynamique-----	22
II.5.Aspect électrochimique-----	23
II.6.Polarisation et surtension d'une électrode-----	24
II.7.Les courbes de polarisations-----	25
II.8.Phénomène de passivité-----	26
II.9.Méthodes électrochimiques-----	27

Chapitre III : FATIGUE-CORROSION

III.1.Introduction-----	30
III.2.Définition-----	30
III.3.Mécanisme de la fatigue-corrosion-----	31
III.4.Amorçage des fissures de fatigue-corrosion-----	31
III.5.Propagation des fissures de fatigue-corrosion-----	33
III.6.Exemples d'essais de fatigue-corrosion sur un alliage d'Aluminium-----	34
III.6.1.Principales propriétés de l'aluminium-----	34
III.6.1.1.Historique-----	34
III.6.1.2.Propriétés physiques-----	34
III.6.1.3.Propriétés mécaniques-----	35
III.6.1.4.Propriétés chimiques-----	35
III.6.2.Résultats de l'essai de fatigue-corrosion sur un alliage d'Aluminium----	35
III.7.Conclusion-----	37

Chapitre IV : CONCEPTION D'UN DISPOSITIF DE FATIGUE-CORROSION

<i>IV.1.Introduction</i> -----	39
<i>IV.2.Conception d'un dispositif de fatigue-corrosion par flexion rotative</i> -----	39
<i>IV.3.L'application du milieu corrosif</i> -----	40
<i>IV.4.Conception d'un dispositif de fatigue-corrosion flexion plane</i> -----	42
<i>IV.5.Dimensionnement des composants du dispositif</i> -----	44
<i>IV.5.1.Dimensionnement de l'éprouvette</i> -----	44
<i>IV.5.2.Dimensionnement de la cellule de corrosion</i> -----	45
<i>IV.5.3.Dimensionnement des poulies</i> -----	45
<i>IV.6.Calcul de la contrainte nécessaire lors d'un essai de flexion plane</i> -----	46

Chapitre V : DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

<i>V.1.Introduction</i> -----	50
<i>V.2. Machine d'essai de fatigue- Corrosion</i> -----	50
<i>V.3.La partie mécanique (partie fatigue)</i> -----	50
<i>V.4.Les organes de la partie mécanique</i> -----	51
<i>V.4.1.Le bras de guidage</i> -----	51
<i>V.4.2.Les supports de l'éprouvette</i> -----	52
<i>V.4.3.Le dispositif du mouvement cyclique</i> -----	52
<i>V.4.4.Guidage en rotation</i> -----	53
<i>V.4.5.La tige poussoir</i> -----	53
<i>V.4.6.Les supports</i> -----	54
<i>V.5.La partie corrosion</i> -----	55
<i>V.5.1.L'enceinte du bain corrosif</i> -----	55
<i>V.6.Plateforme</i> -----	56
<i>V. 7.Appareillage</i> -----	57
<i>V.8.Paramètres d'essai</i> -----	59
<i>V.8.1.Données mécanique</i> -----	59
<i>V.8.2.Données électrochimiques</i> -----	59

Chapitre VI : RESULTATS ET DISCUSSION

<i>VI.1.Introduction</i> -----	61
--------------------------------	----

<i>VI.2. Essais de fatigue-corrosion</i> -----	61
<i>VI.2.1. Evolution de l'ouverture des fissures en fonction du nombre de cycles lors d'un essai de fatigue-corrosion</i> -----	61
<i>VI.2.2. Vitesse de propagation des fissures lors d'un essai de fatigue-corrosion</i> -----	63
<i>VI.3. Essai de fatigue à l'air</i> -----	65
<i>VI.3.1. Evolution de l'ouverture des fissures en fonction du nombre de cycles lors d'un essai de fatigue à l'air</i> -----	65
<i>VI.3.1. Vitesse de propagation des fissures lors d'un essai de fatigue à l'air</i> -----	67
<i>VI.4. Rupture</i> -----	69
<i>Conclusion générale</i> -----	72



Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Toute pièce mécanique est soumise durant son fonctionnement normal à un certain nombre de sollicitations de causes variables mais qui se traduisent le plus souvent par des variations cycliques des contraintes qui lui sont appliquées.

Or, il est malheureusement souvent constaté, et ce depuis fort longtemps, la ruine, parfois catastrophique, d'un certain nombre de structures alors que celles-ci ne sont soumises qu'à des sollicitations dynamiques jugées modestes par rapport aux capacités statiques des matériaux définis communément par leur résistance à la rupture et leur limite d'élasticité.

Le responsable de ces ruines est très souvent le phénomène de fatigue du matériau, au caractère particulièrement insidieux puisque se développant lentement dans le temps, sans modifications macroscopiquement apparentes des pièces et structures et dans des zones souvent inaccessible mais particulièrement sujettes à cet endommagement de par leur conception.

Ce problème touche plusieurs types de domaines :

- Biomatériaux.
- Chemin de fer.
- Construction automobile, navale, aéronautique et spatiale.
- Moteurs turbomachines.
- Matériels de travaux publics et de mines.
- Et même les constructions métalliques statiques inévitablement soumises à des variations de charges ou d'efforts.

Il est donc apparu indispensable de faire sur des éprouvettes et sur les pièces elles mêmes des essais dans des conditions aussi voisines que possible des conditions d'utilisation. De tels essais sont des essais d'endurance ou de fatigue.

Notre travail consiste en la mise au point d'un dispositif de fatigue-corrosion par flexion, puis en la mise à l'essai de ce dispositif.

Le présent travail est structuré en six chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur la fatigue. Le deuxième chapitre porte sur la corrosion et l'électrochimie. Le troisième chapitre est consacré l'étude de la fatigue-corrosion. Le quatrième chapitre porte sur la conception du dispositif de fatigue-corrosion. Le cinquième chapitre porte sur la description du dispositif expérimental mis au point. Le sixième chapitre est consacré aux résultats expérimentaux obtenus et la discussion.

Enfin nous terminons par une conclusion générale suivie par certaines perspectives envisagées.



Chapitre I

Généralités sur la fatigue

I.1.Introduction

La résistance à la fatigue des pièces et structures mécaniques dépend de nombreux facteurs et bien entendu du matériau qui les constitue. Mais elles seront d'autant plus fiables que leur concepteur aura pris soin de leur éviter toute concentration inopportune de contraintes.

Près de la moitié des avaries survenues en service sur des pièces ou structures mécaniques sont des ruptures par fatigue. Le chargement cyclique des zones critiques où se concentrent les contraintes en est à l'origine. Dans ces zones, l'endommagement progressif du matériau se manifeste par l'apparition de microfissures, apparition plus ou moins rapide selon la nature du matériau et l'importance du chargement appliqué. Après cette période d'amorçage, l'une des fissures ou plusieurs d'entre elles vont se propager dans toute l'épaisseur de la pièce jusqu'à la rupture brutale. D'un point de vue purement mécanique, le phénomène de fatigue peut se résumer ainsi : [1]

Ruptures en service sous des chargements cycliques (effort, couple, contrainte) dont les niveaux sont bien inférieurs aux caractéristiques mécaniques du matériau (la limite d'élasticité R_e et la résistance à la rupture R_m).

Quelques statistiques de cas de rupture

La figure I.1 présente les différents paramètres impliqués dans la destruction d'une pièce

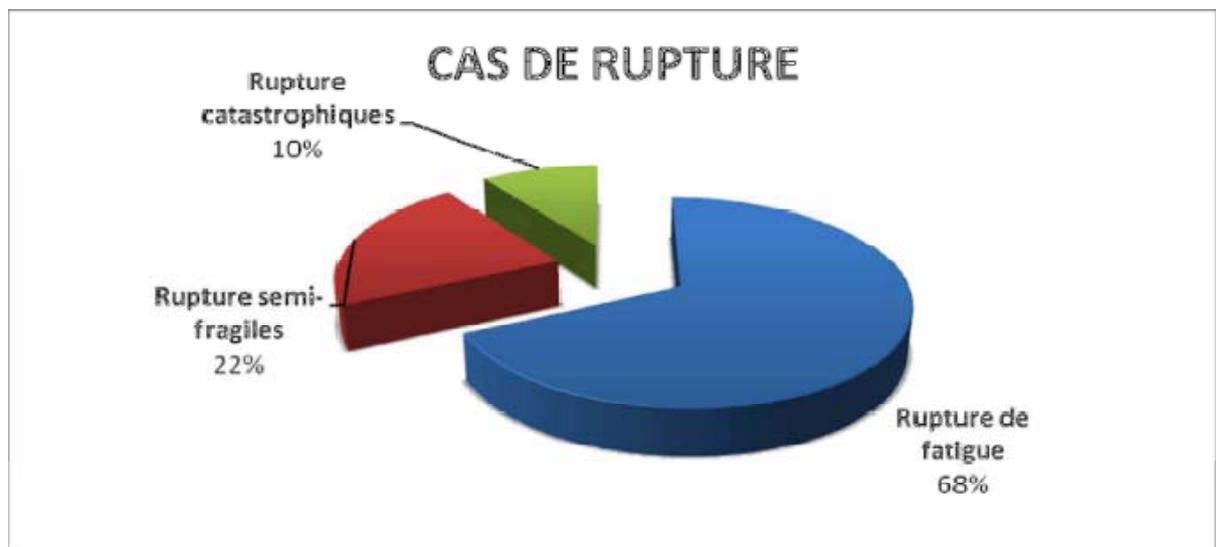


Figure I.1 : Les paramètres impliqués dans la destruction d'une pièce [2]

I.2.Définition de la fatigue

La fatigue est définie comme étant la dégradation ou la rupture d'un matériau provoquée par chargement cyclique. L'étude de la fatigue a commencé par des modèles, qui ignorent les mécanismes par lesquels la rupture ait lieu, mais le but était d'établir un outil avec lequel l'endurance d'un composant peut être prédite. Les modèles de Wöhler et Manson ont servi de base à la prévision de la fatigue et sont toujours employés dans beaucoup de codes de

conception tels que le code ASME vessel (1995). D'autres améliorations ont été proposées (par exemple, Muralidharan et Manson, 1988 ; 1990). [3]

La fatigue est une forme d'endommagement qui survient dans les structures soumises à des contraintes dynamiques et fluctuantes. Sous ces circonstances la rupture peut se produire à des contraintes considérablement inférieures à la résistance à la traction ou à la limite élastique. Le terme fatigue est utilisée car ce type d'endommagement se manifeste après une période prolongée de cycles répétés de contraintes ou de déformations. [4]

I.3. Classification des sollicitations des essais de fatigue

On peut distinguer trois catégories d'essai de fatigue (figure I.2) : les essais sous amplitude constante, les essais sous amplitude variable et sous amplitude aléatoire.

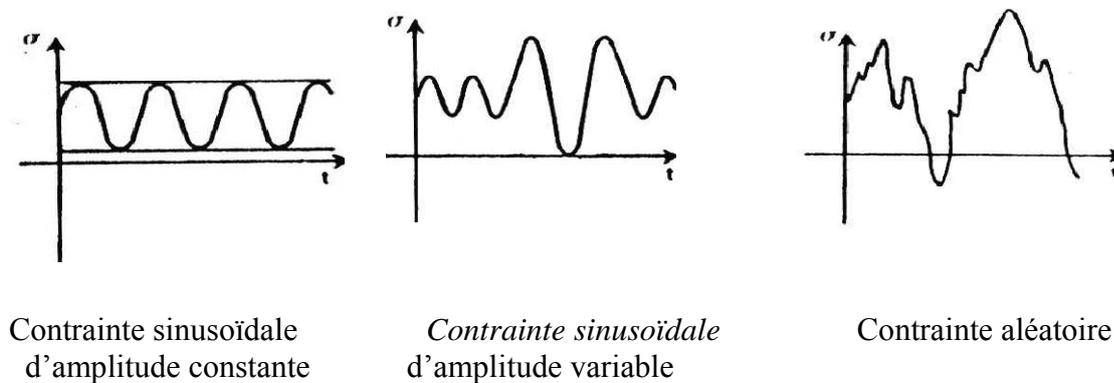


Figure I.2 : types de contraintes lors d'un essai de fatigue. [5]

Généralement, au cours d'essais de fatigue, la contrainte appliquée est une fonction sinusoïdale, ceci en raison des seules possibilités de fonctionnement des machines ou pour des raisons de commodité dans le traitement des résultats d'essais. [5]

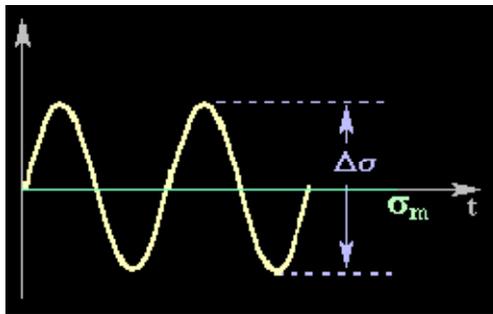
I.3.1 Essai sous amplitude constante

Les sollicitations de service se placent à un seul niveau d'amplitude et elles résultent d'efforts combinés, on peut distinguer trois cas : [6]

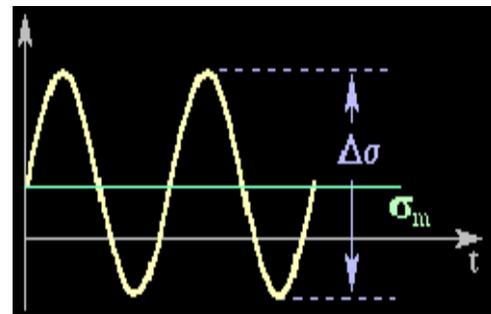
- **Premier cas :** Sollicitations avec efforts statiques et efforts variables de même nature et de même direction, par exemple : traction statique et traction variable alternative.

On peut considérer, quelle que soit la nature des efforts agissant (traction, flexion, torsion), trois sortes de sollicitations en fonction du temps : alternée, répétées, ondulées.

- ✓ **Effort alternés** pour ($\sigma_m < \sigma_a$), la contrainte évolue entre une valeur maximale positive et une valeur minimale négative, l'effort est symétrique si ($\sigma_m=0$, $R=-1$), et il est dissymétrique pour ($0 < \sigma_m < \sigma_a$, $-1 < R < 0$).



a-Contraintes purement alternées



b- Contraintes alternées asymétrique

Figure I.3 : Contraintes alternées. [7]

- ✓ **Effort répétés** pour ($\sigma_m = \sigma_a$, $R=0$). La contrainte varie entre la valeur 0 et une valeur maximale positive ou entre 0 et une valeur maximale négative.

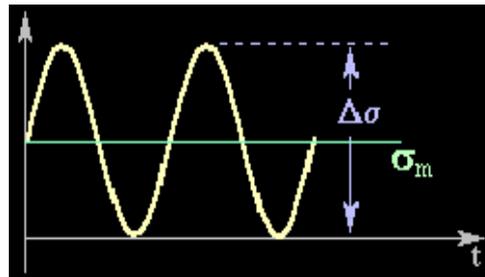


Figure I.4 : Contrainte répétés [7]

- ✓ **Effort ondulés** pour ($\sigma_m > \sigma_a$, $0 < R < 1$). La contrainte varie entre les valeurs maximale et minimale qui sont de même signe.

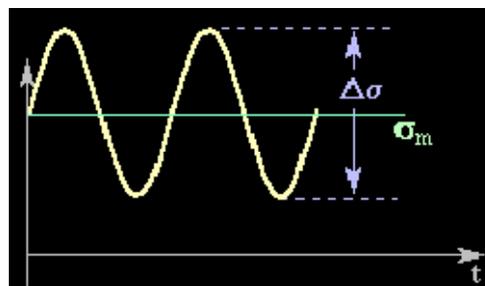


Figure I.5 : Contraintes alternées asymétrique [7]

- **Deuxième cas** : Sollicitations avec efforts statiques et variables de nature différente, par exemple :
 - traction statique et torsion variable, alternative.
 - torsion statique et traction variable, alternative.

- **Troisième cas** : Sollicitations avec efforts combinés variables de nature différente, par exemple :
 - traction et torsion alternatifs, en phase.
 - traction et torsion alternatifs, déphasés.

I.3.2.Essai sous amplitude variable

Actuellement, on utilise de plus en plus, en pratique, les résultats d'essais effectués sous programme de charge, de manière à se rapporter davantage des conditions réelles de service. Des expérimentateurs ont imaginé des essais avec modulation d'amplitude, sinusoïdal ou à programme. [8]

I.3.3.Les paramètres d'un mode de sollicitation

Pour un type d'essai de fatigue donné, on définit différents paramètres pour bien décrire le mode de sollicitation de l'essai de fatigue .dans la Figure I.6 suivante, nous donnons un exemple.

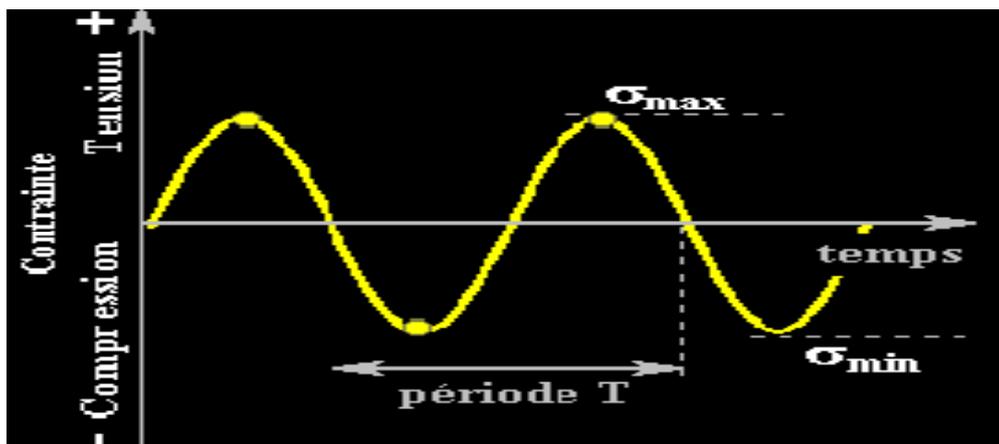


Figure I.6 : Cycle de contrainte de fatigue. [7]

Où :

σ_{\max} : Valeur maximale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte.

σ_{\min} : Valeur minimale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte.

σ_m : Contrainte moyenne définie par la valeur algébrique : $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$

σ_a : amplitude de la contrainte définie par la valeur algébrique $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$

$\Delta\sigma$: Étendue de la variation de la contrainte ou écart limite : $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\sigma_a$.

R : Enfin on définit le rapport de contrainte : $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$

σ_D : limite de fatigue.

N : durée de vie en fatigue.

I.4. Mécanisme de la fatigue

La rupture par fatigue est caractérisée par trois différents stades : (1) initiation (amorçage) des fissures où une fissure de petite taille se forme dans les points de concentration des contraintes élevées ; (2) propagation des fissures, étape durant laquelle les fissures avancent avec chaque cycle de contrainte ; (3) rupture finale, qui survient très rapidement une fois la fissure qui avance atteint une taille critique. La durée de vie N_f (fatigue life) ou le nombre total de cycles à la rupture est donc la somme du nombre de cycles d'initiation des fissures N_i et du nombre de cycles de propagation des fissures N_p :

$$N_f = N_i + N_p \dots\dots\dots(I.1)$$

La contribution de l'étape finale de rupture à la durée de vie est négligeable du fait qu'elle se produit rapidement. Les proportions relatives de N_i et N_p dépendent de la nature du matériau et des conditions d'essai. Pour des niveaux de basses contraintes, la majeure partie de la durée de vie est passée dans la phase d'initiation des fissures. Le niveau de contrainte augmente, N_i diminue et les fissures se forment plus rapidement. Par suite, pour des niveaux de contraintes élevées, l'étape de propagation de fissures prédomine ($N_p > N_i$). [9]

I.4.1. Amorçage d'une fissure

Pendant la période d'amorçage (initiation), une fissure ou des fissures visibles se forment. Les fissures initiées se développent alors et à un certain point les fissures croissantes ont tellement affaibli la structure que la charge maximale est excédée et la rupture finale se produit. Aux amplitudes de charge très basses, près du seuil de fatigue, la majeure partie de la durée de vie du matériau est consommée dans la phase d'initiation de la fissure.

Lorsque les amplitudes de chargement augmentent, la proportion de la durée de vie consommée dans la phase de propagation augmente rapidement. La distinction entre l'étape d'initiation et l'étape de propagation est un peu ambiguë. Avec l'élaboration de meilleures méthodes pour détecter les fissures, de plus petites fissures sont devenues discernables et la période d'initiation a diminué.

En outre il existe des différences considérables dans les définitions actuelles de l'initiation : elle peut signifier l'apparition des fissures visibles à l'œil nu (dans la gamme de 1 - 2 millimètres) ou l'apparition de plus petites fissures vues par microscope électronique (dans la gamme de quelques μm). Dans les modèles récents, l'initiation est tout à fait absente au début et les premières fissures indétectables initient pendant le premier cycle de chargement.

L'initiation (Figure I.7) de fissures a typiquement lieu aux hétérogénéités du matériau. Ça peut être par exemple les bandes de glissement persistantes provoquées par le chargement cyclique, les joints de grain ou les inclusions non métalliques. [10]

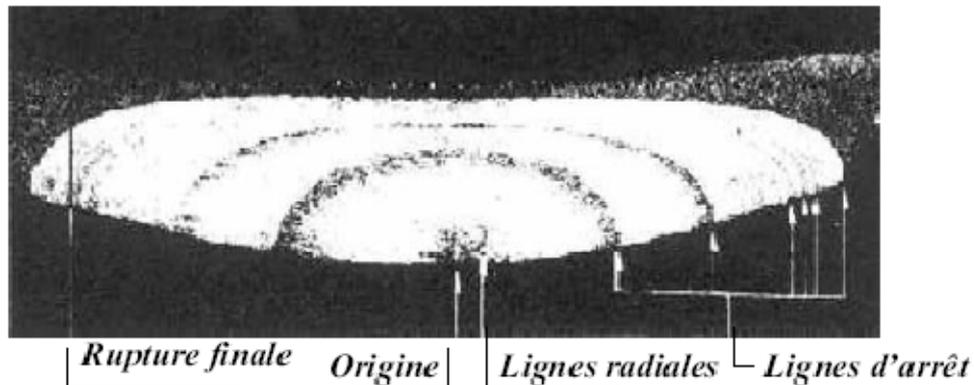


Figure I.7: Aspect macroscopique d'une rupture en fatigue. [6]

I.4.2. Propagation d'une fissure

Après initiation des fissures, les endommagements de fatigue sont concentrés aux entailles. Pour les fissures de petites longueurs le taux de progression dépend fortement de la microstructure locale et de la coalescence des fissures. Dès que la longueur de la fissure atteint une longueur d'environ 3 fois la taille de grain, la progression de la fissure peut être décrite par un paramètre mécanique simple. [11]

Les premières fissures apparues commencent à se propager, tandis que des nouvelles apparaissent. Puis, le réseau commence à se former par coalescence des fissures existantes. Il y a alors formation de cellules à l'intérieur desquelles l'apparition de nouvelles fissures n'est plus possible. Enfin, dans une dernière phase, le réseau ne semble plus évoluer de façon significative en surface, il est complètement constitué, et les fissures périphériques se propagent plus en surface. Le réseau constitué continue cependant à se propager, mais uniquement en profondeur, et non plus en surface. Cette propagation en profondeur se traduit par l'ouverture de plus en plus grande des fissures principales du réseau, signe d'un état biaxial de contraintes de traction. La croissance des fissures dépend du matériau, de l'environnement et de la sollicitation. Le mode de propagation peut-être intergranulaire ou transgranulaire. [10]

I.4.3. Rupture brutale

Le développement des fissures diminue la section soumise aux sollicitations, ce qui provoque la rupture de la pièce. (Figure I.8) [1]



Figure I.8 : Arbre rompu en fatigue [1]

I.4.4. Description de la propagation des fissures

On peut, à partir des enregistrements de la longueur de fissure a en fonction du nombre de cycles N , tracer la vitesse de fissuration da/dN en fonction d'un paramètre caractérisant le chargement (la contrainte alternée σ_a ou la déformation totale par cycle $\varepsilon\sqrt{a}$ pondérée par la longueur de fissure).

Le développement de la Mécanique de la Rupture a permis, grâce notamment à l'utilisation du facteur d'intensité des contraintes (FIC) noté K , de mieux étudier quantitativement les stades de propagation lente et de propagation brutale des fissures de fatigue. K est proportionnel à $\sigma_a\sqrt{a}$. [12]

L'approche s'appuyant sur le FIC est la plus utilisée pour décrire la propagation des fissures de fatigue, tant que la plastification en pointe de fissure qui accompagne la propagation reste confinée dans une zone de taille faible par rapport à la longueur de la fissure et aux dimensions de la structure fissurée. On a pu, avec cette approche, traiter de nombreux cas pratiques où l'on a observé des fissures préexistantes dans une structure. Les nombreux résultats expérimentaux obtenus par cette méthode montrent que les variations de la vitesse de fissuration en fonction de l'amplitude du FIC présentent, en échelle bi-logarithmique, l'allure décrite sur la Figure I.9 : [12]

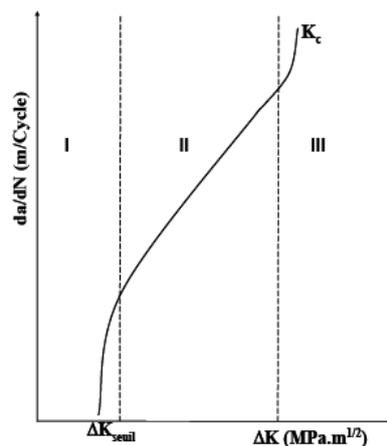


Figure I.9 : Exemple de courbe de propagation. [12]

On distingue habituellement trois domaines dans la propagation des fissures « longues » :

- ✓ Domaine I: domaine des faibles vitesses de fissuration où les effets de l'environnement et de la microstructure sont prédominants. Pour décrire ce domaine, on effectue généralement des essais à ΔK décroissant pour déterminer la valeur de ΔK seuil.
- ✓ Domaine II: domaine des vitesses moyennes ou de Paris où la vitesse de propagation varie linéairement avec ΔK en échelle bi-logarithmique. La fissure se propage le plus souvent dans un plan perpendiculaire à la direction de l'effort appliqué. C'est le domaine où s'applique la loi de Paris.

- ✓ **Domaine III:** domaine correspondant au cas des chargements élevés pour lesquels une déchirure se produit dans le matériau en pointe de fissure. Les vitesses de propagation sont très élevées et conduisent très vite à la rupture de la pièce.

Pour décrire la partie linéaire de cette courbe (domaine II), Paris proposa la relation empirique :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \dots\dots\dots (I.2)$$

Où *C* et *m* sont des constantes dépendant du matériau, des conditions de chargement et de l'environnement.

Pour le calcul de FIC Newman et Raju une relation où ils tiennent compte des dimensions géométriques.

$$\Delta K = \frac{2}{\pi} \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \left[1.04 + 0.201 \left(\frac{a}{h} \right)^2 + 0.106 \left(\frac{a}{h} \right)^4 \right] \left[1.1 + 0.35 \left(\frac{a}{h} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (I.3)$$

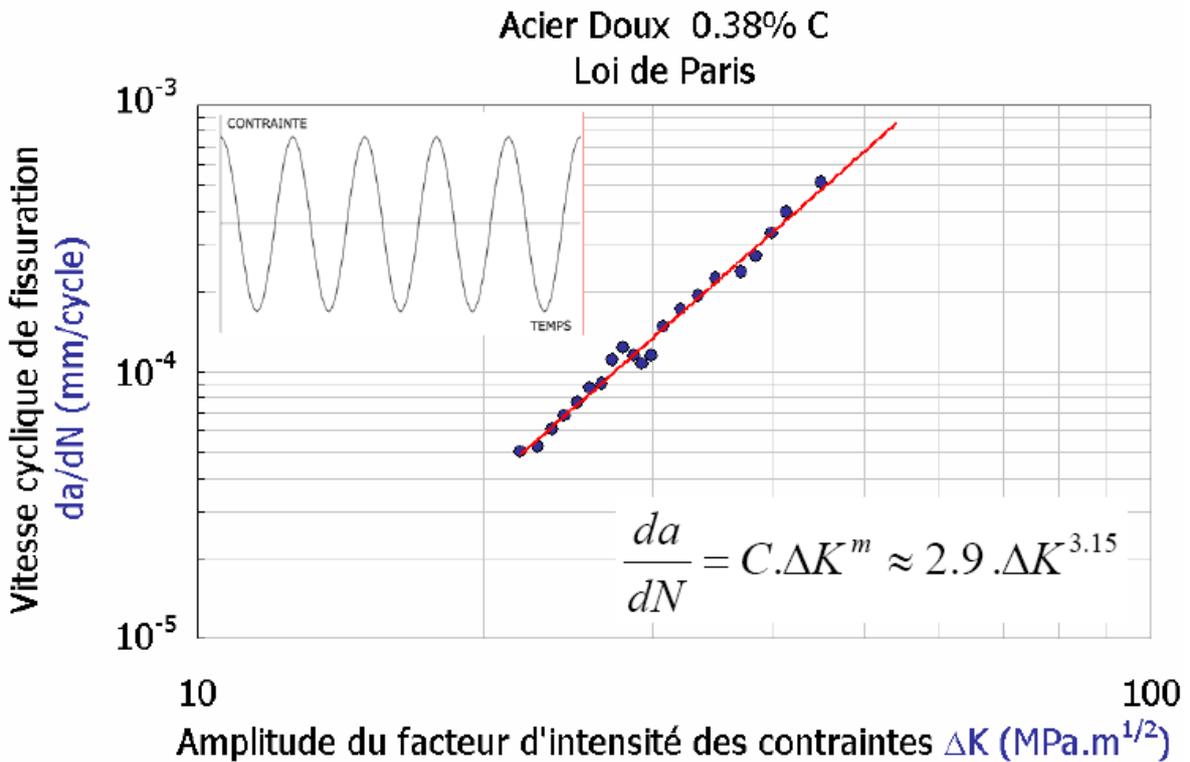


Figure I.10: Loi de Paris [13]

I.5. Résultats des essais de fatigue

I.5.1. Courbe d'endurance ou de Wöhler

Chaque éprouvette étant essayée sous une seule charge maximale, on reporte les résultats des essais de fatigue sur un diagramme (figure I.11) où les contraintes sont en ordonnées et les nombres de cycles en abscisses. Ces résultats se situent sur une courbe qui

représente une allure asymptotique et sépare le plan du diagramme en deux zones : une zone supérieure pour laquelle les conditions d'essai correspondent à des ruptures, et des zones inférieure pour laquelle il n'y a pas de rupture. Cette courbe est connue aussi sous le nom de courbe S-N ou S représente les contraintes (stresses) et N les nombres de cycles à rupture. Pour la commodité de la représentation, on utilise des abscisses logarithmiques; la courbe présente alors une partie droite inclinée tant que la limite d'endurance n'est pas atteinte et une partie parallèle à l'axe des abscisses lorsque cette limite est atteinte. [5]

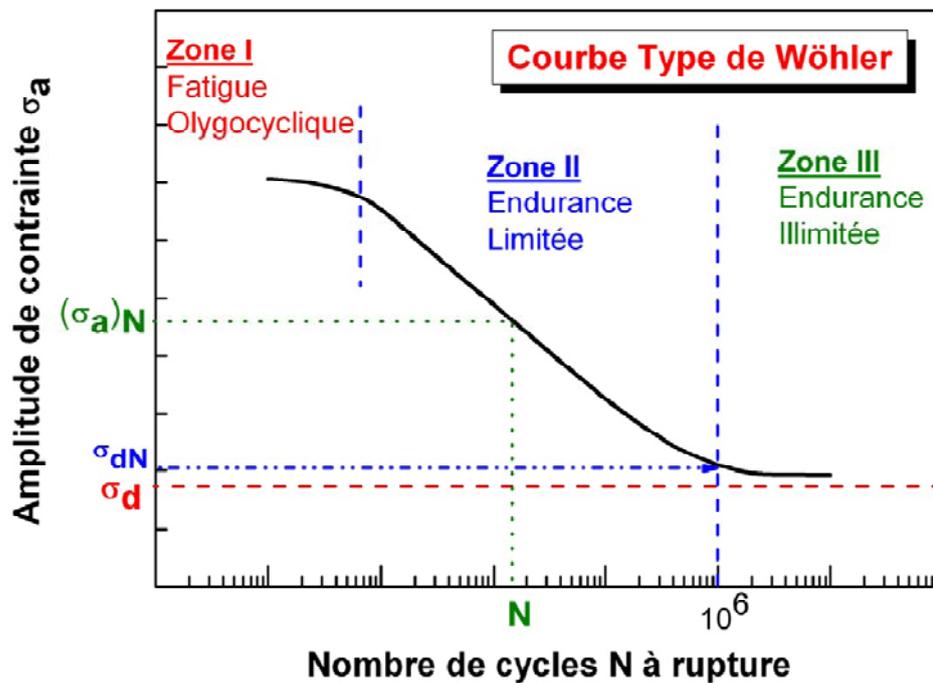


Figure 1.11. Courbe type de Wöhler [2]

La courbe de Wöhler permet de distinguer trois domaines : [14]

- Fatigue plastique oligocyclique sous forte contrainte supérieure à la limite d'élasticité macroscopique. Le nombre de cycles à rupture N_R (entre 1 et 10^5) est relié à la déformation plastique élémentaire $\Delta\varepsilon_p$ accompagnant chaque cycle par la loi de Coffin $N_R^{1/2} \cdot \Delta\varepsilon_p = \text{cte}$
- Fatigue ou endurance limitée, la rupture apparaît après un nombre limité de cycle (10^5 à 10^7). Le nombre de cycles à rupture N_R croît lorsque l'amplitude de la contrainte périodique décroît : $N_R (\sigma - \sigma_d)^n = \text{cte}$
- Endurance illimitée ou zone de sécurité, sous faible contrainte. la rupture ne se produit pas avant un nombre donné de cycles, 10^7 ou plus ; les microfissures ne peuvent pas se former, ou encore ne peuvent pas atteindre un stade de développement critique.

Les courbes de Wöhler sont en outre sensibles à la valeur de la contrainte moyenne appliquée, à la fréquence et à la nature de la sollicitation, à l'état de surface, au milieu ambiant (durée de vie beaucoup plus élevés sous vide qu'à l'air) et à la température.

I.5.2.Endurance

La capacité de résistance à la fatigue des pièces et des assemblages. [15]

I.5.3.La durée de vie,

Le nombre de cycles au bout duquel l'éprouvette casse sous une contrainte de valeur moyenne imposée. [15]

I.5.4.La limite de fatigue

La plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'est pas constaté de rupture après un nombre considéré infini de sollicitations (traditionnellement évalué à 10^7 sollicitations) pour une contrainte moyenne donnée. [15]

I.5.5.La limite d'endurance

La plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il est constaté 50% de rupture après un nombre fini N (appelé censure) de sollicitations en contraintes purement alternées (c'est-à-dire avec une contrainte moyenne nulle). [15]

I.6.Classification des essais de fatigue

On peut établir une classification d'après la nature des efforts agissants, quel que soit le mode de sollicitation en fonction du temps.

On a ainsi quatre catégories principales d'essais : [5]

- Essais sous efforts axiaux (tension, compression)
- Essais de flexion plane ou rotative
- Essais de torsion
- Essais sous efforts combinés, par exemple : flexion et torsion.

I.7. Les éprouvettes utilisées dans l'essai de fatigue

On utilise principalement deux formes d'éprouvettes:

I.7.1.Eprouvettes lisses

Elles sont de formes cylindriques avec une partie utile de diamètre $8 \text{ mm} \pm 0.02$, et de deux têtes (pour le serrage) de diamètre 12 mm compatible avec les fourreaux de serrage de la machine. Ces deux parties sont raccordées par un congé de rayon de 30 mm pour diminuer la concentration de contrainte dans la partie utile de l'éprouvette. Les longueurs et d'autres précisions sont citées dans la figure 1.12. [16]

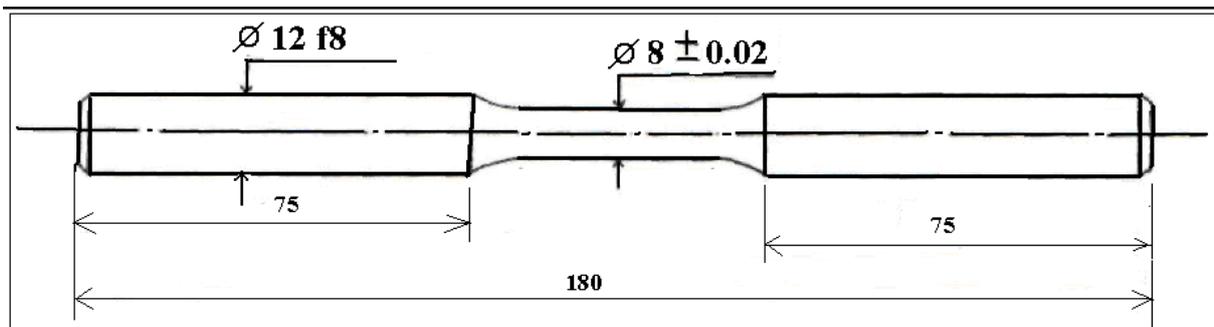


Figure I.12 : Eprouvette lisse [16]

I.7.2.Eprouvette entaillée

L'éprouvette entaillée à la forme générale d'une éprouvette lisse avec les mêmes dimensions seul la partie utile, ou elle a un diamètre extérieur de 10 mm avec une entaille au milieu, de profondeur 1 mm ce qui donne un diamètre de 8 mm (figure 1.13). [16]

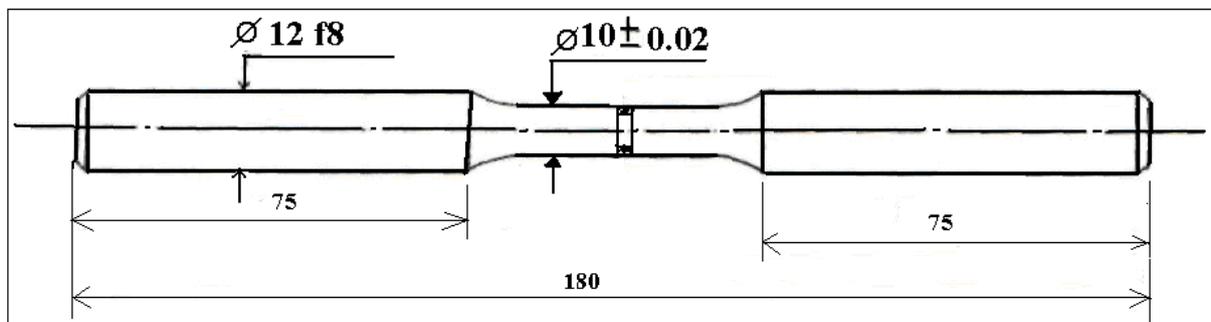


Figure I.13 : Eprouvette entaillée [16]

I.8.Les facteurs qui influent la résistance à la fatigue

Outre la contrainte moyenne σ_m prise en compte par les diagrammes d'endurance, les facteurs qui influencent la résistance à la fatigue sont nombreux. Les plus importants sont la concentration de contrainte, l'état de surface, l'effet d'échelle, les contraintes résiduelles. [1]

I.8.1.État de surface

On sait depuis longtemps que l'état de surface d'une pièce mécanique conditionne sa résistance à la fatigue. Plus cet état sera grossier, plus la limite d'endurance sera abaissée d'un facteur K_s du fait de la présence des défauts superficiels. Ce phénomène est d'autant plus sensible que le matériau est plus résistant. Sur une pièce soumise à un chargement de fatigue, on a donc intérêt à soigner d'autant plus l'état de surface final que le matériau qui la constitue présente de hautes caractéristiques mécaniques. [1]

I.8.2.Effet d'échelle

L'effet d'échelle se traduit en fatigue par le fait qu'à contrainte superficielle égale, une pièce de plus grande dimension présentera une plus faible durée de vie. Cela tient à deux facteurs : effet de gradient et effet statistique.

Pour les pièces travaillant en flexion, en torsion ou en traction avec présence d'entaille, l'évolution de la contrainte sous la surface influence la résistance à la fatigue : plus une pièce est de faible dimension, plus le gradient est élevé et plus la résistance à la fatigue sera grande. Par ailleurs, plus une pièce est de grande dimension, plus on a statistiquement de chance de trouver un défaut qui conduira à l'amorçage d'une fissure de fatigue. [1]

I.8.3.Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles, qui résultent de la fabrication, sont présentes dans la pièce mécanique en l'absence de tout effort extérieur. Elles vont se superposer au chargement de fatigue et donc modifier la contrainte moyenne. On peut tenir compte de ces contraintes dans un calcul en utilisant les diagrammes d'endurance de Haigh ou de Goodmann ou mieux les diagrammes de fatigue multiaxiale. [1] Mais attention, ces contraintes résiduelles se relaxent sous l'effet du chargement de fatigue, relaxation qui peut d'ailleurs être modélisée par le calcul. C'est bien sûr l'état stabilisé de ces contraintes qu'il faudra utiliser dans le calcul en fatigue.

I.8.4.Effet de l'environnement

Un milieu agressif (températures élevées, milieux corrosifs...) aggrave le phénomène de fatigue (figure I.14). Il apparaît des phénomènes nouveaux comme le fluage ou la corrosion. Leur action est liée au temps d'exposition.

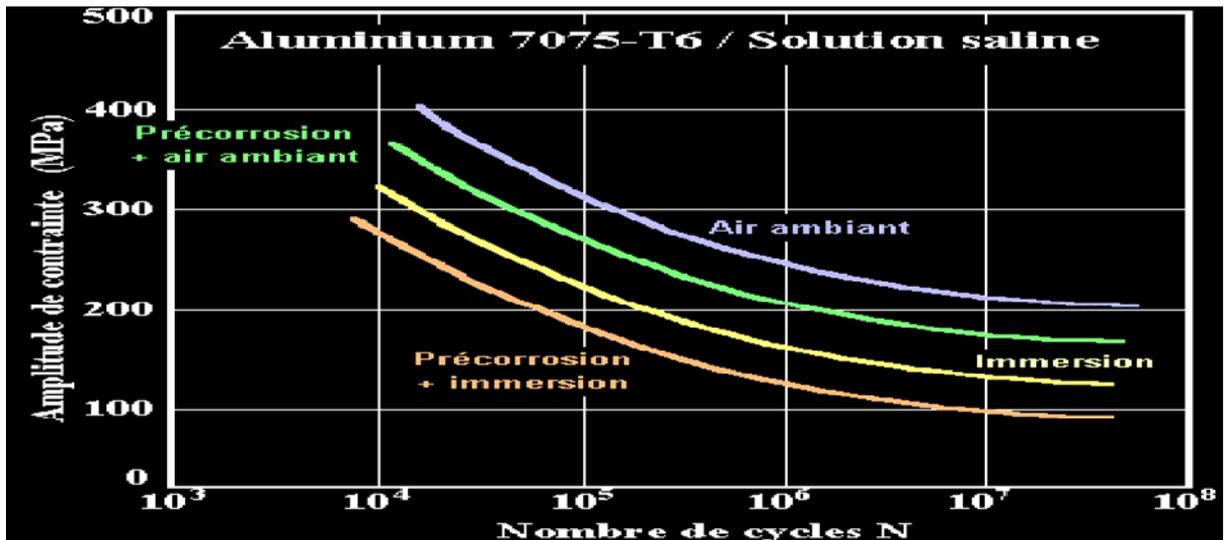


Figure I.14 : L'influence de l'environnement. [7]

Il résulte des expériences que la diminution de résistance à la fatigue par corrosion, avant l'essai est en général faible, tandis que l'influence de la corrosion exercée durant l'essai de la fatigue est considérable. [8]

L'influence de la corrosion peut donc être envisagée de deux points de vue, selon que :

- Les efforts de fatigue s'exercent sur les pièces préalablement corrodées.
- La fatigue et la corrosion agissent simultanément. Ce processus est appelé fatigue sous corrosion.

I.8.5. Influence de la contrainte moyenne

Pour une amplitude de contrainte cyclique donnée, la durée de vie est d'autant plus courte que le rapport R est élevé (figure I.15).

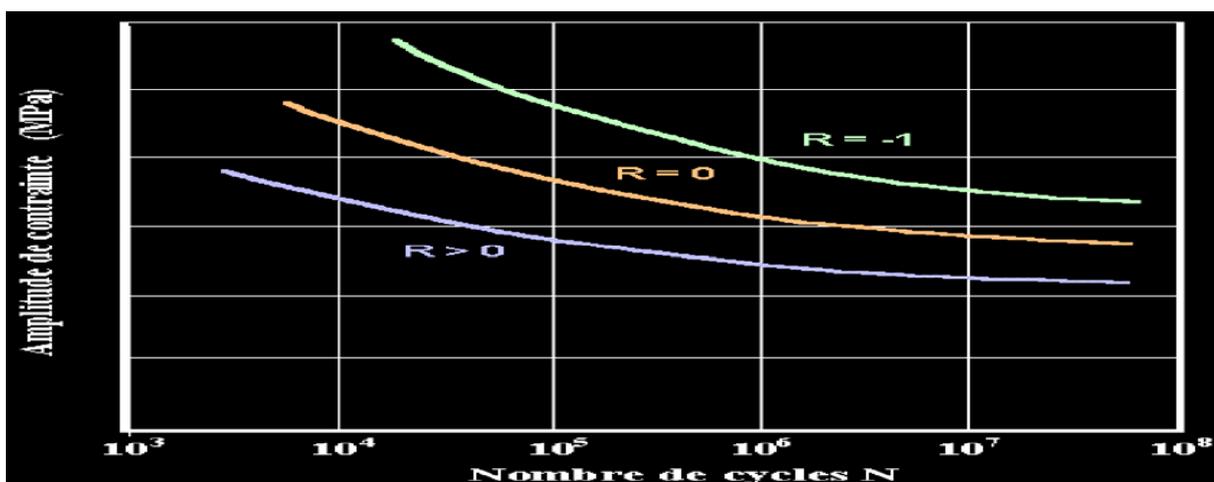


Figure I.15 : Influence de la contrainte [7]

I.8.6. Influence de la fréquence

En règle générale, à l'ambiante, l'augmentation de la fréquence des efforts cycliques augmente la résistance du métal à la fatigue, car la durée d'application de la contrainte maximale diminue. [6]

I.9. Une démarche pour résister à la fatigue

La conception d'une pièce mécanique soumise à la fatigue, si elle dépend au premier chef du choix du matériau, doit surtout tenir compte des modes successifs de mise en œuvre de ce matériau pour aboutir à la pièce. [1]

Par ailleurs, d'autres paramètres extérieurs au matériau conditionnent fortement la résistance à la fatigue (figure I.16).

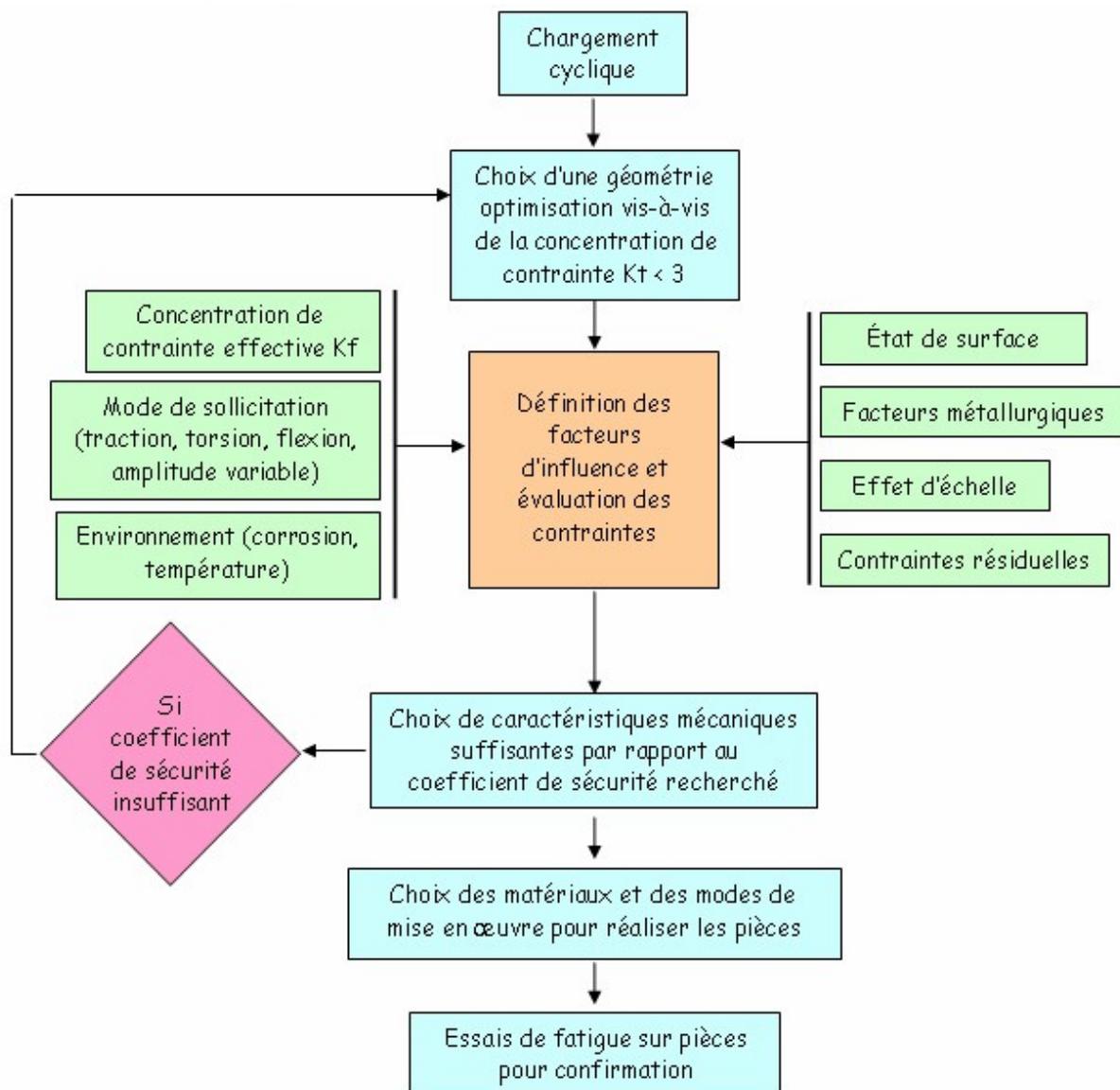


Figure I.16 : Schéma général de conception d'une pièce devant tenir en fatigue. [1]



Chapitre II

Corrosion et électrochimie

II.1.Introduction

Le phénomène de corrosion correspond à l'attaque des matériaux par les agents chimiques qui les entourent. Il est le résultat de l'action exercée sur les métaux et alliages par leur environnement liquide ou gazeux. La corrosion entraîne une destruction plus ou moins rapide d'un matériau métallique en le transformant en un état chimiquement plus stable.

Ce phénomène se traduit par une réaction chimique ou électrochimique qui se produit à la surface du matériau. Dans tous les cas, le phénomène de corrosion est un problème de surface ou plus précisément d'interface entre un métal et un milieu agressif liquide ou gazeux.

Les différents cas industriels de corrosion peuvent être classés en deux catégories selon le type de processus intervenant dans les réactions: [17]

- 1- corrosion chimique: corrosion par les gaz à hautes températures représentant 3% du total des cas.
- 2- corrosion électrochimique: (en solution) représentant 97% des cas.

II.2.Définition de la corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique (humide) est le résultat d'une réaction électrochimique, (une réaction est un échange - gain ou perte de particules). Les particules proviennent d'une électrode métallique et d'un électrolyte qui réagissent au contact l'un de l'autre. Ces réactions, à l'interface d'une phase métallique et d'une phase aqueuse, mettent en jeu à la fois les électrons du métal et certains éléments chimiques, neutres ou ionisés, contenus dans la solution. [18]

Elle se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité, soit dans le métal, soit dans le réactif.

L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, un courant électrique circule entre anodes et cathodes et les zones qui constituent les anodes ataquées. Il est important de noter que le produit final de corrosion se développe en général à une certaine distance de la zone corrodée, dans la région où se rencontrent les produits élémentaires de corrosion anodiques et cathodiques. [14]

II.3.Morphologie de la corrosion

La corrosion peut se développer de cinq façons principales. [14]

II.3.1.Corrosion uniforme

Elle se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal. On l'observe aussi bien dans le cas de la corrosion sèche que s'il s'agit de corrosion en milieu liquide. Les caractéristiques mécaniques du métal rapportées à l'unité de section ou de longueur, ne sont pas modifiées. [14]

II.3.2. Corrosion inter-granulaire

Elle se manifeste aux joints inter granulaires. Elle est due en général à la précipitation d'une phase ou à la formation préférentielle d'un produit de corrosion aux joints de grains. C'est un type de corrosion particulièrement dangereux car, bien que la quantité de métal attaquée soit faible, les caractéristiques mécaniques du métal sont altérées car les fissures ainsi produites affaiblissent le métal. [14]

II.3.3. Corrosion par piqures

Elle se localise en certains points de la surface métallique. Ce type de corrosion peut avoir plusieurs origines, par exemple l'existence d'une solution de continuité dans la couche protectrice ou la couche passive recouvrant le matériau métallique, l'existence d'inclusion ou bien encore la présence de gouttelettes d'un électrolyte à la surface du métal. [14]

II.3.4. Corrosion caverneuse

Il s'agit alors d'une corrosion qui se manifeste au niveau des interstices existant entre une pièce métallique et une autre pièce, métallique ou non, entre lesquelles l'électrolyte peut séjourner. [14] Elle est particulièrement dangereuse dans le cas de certains aciers inoxydables.

II.3.5. Corrosion intra-granulaire

Elle se manifeste à l'intérieur des cristaux. Ce type de corrosion apparaît en particulier dans les matériaux de structure cubique à face centrées soumis à une contrainte de traction et plongés dans un milieu spécifique. [14]

II.4. Potentiel d'équilibre d'une électrode

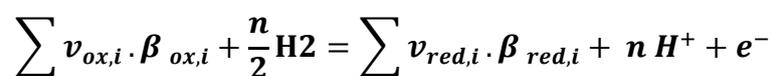
Le potentiel d'équilibre ou potentiel réversible d'une électrode représente la différence de potentiel électrique entre le métal et la solution à l'équilibre.

L'électrochimie permet de calculer le potentiel réversible d'une électrode en utilisant la relation de NERNST. [19]

II.4.1. Equation de Nernst

Cette équation sert à calculer le potentiel réversible à partir du potentiel standard en fonction des activités et de la température. [19]

Prenant la réaction d'oxydoréduction telle que :



$\beta_{ox,i}$ et $\beta_{ox,i}$: espèces chimiques conjuguées.

n : Nombre d'électrons mis en jeu.

v : Coefficient stœchiométrique.

Le potentiel réversible de la réaction d'oxydoréduction.

$$E_{rev} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{P_{H_2}^{n/2} \cdot \prod a_{oxi}^{v_{oxi}}}{a_{H^+}^n \cdot \prod a_{redi}^{v_{redi}}} \dots\dots\dots (II.1)$$

A l'état standard, l'activité $a_{H^+}=1$, la pression $P_{H_2}=1 \text{ atm}$

$$E_{rev} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{\prod a_{oxi}^{v_{oxi}}}{\prod a_{redi}^{v_{redi}}}$$

Où :

$a_{ox,i}$, $a_{red,i}$: Expriment les activités des espèces oxydées et des espèces réduites.

π : produits.

n : Nombre de charges participants.

R : constante des gaz parfaits.

T : température absolue.

F : Constante de Faraday = 96485 C/mol.

E^0 : potentiel standard.

II.4.2.Processus aux interfaces

II.4.2.1.Interface électrode / électrolyte

Quand une électrode métallique est plongée dans un électrolyte, il apparaît à la surface du métal une répartition de charges électriques : c'est la double couche électrique, zone d'interface contenant une séparation de charges.

Plusieurs modèles ont été proposés et développés pour décrire les propriétés électriques de la double couche, à savoir le modèle de Helmholtz, le modèle de Gouy-Chapman et le modèle de Stern (figure II.1).Le comportement électrique d'une interface métal-électrolyte peut être assimilé à une capacité branchée en parallèle avec une résistance, appelée résistance de transfert de charges. [19, 20]

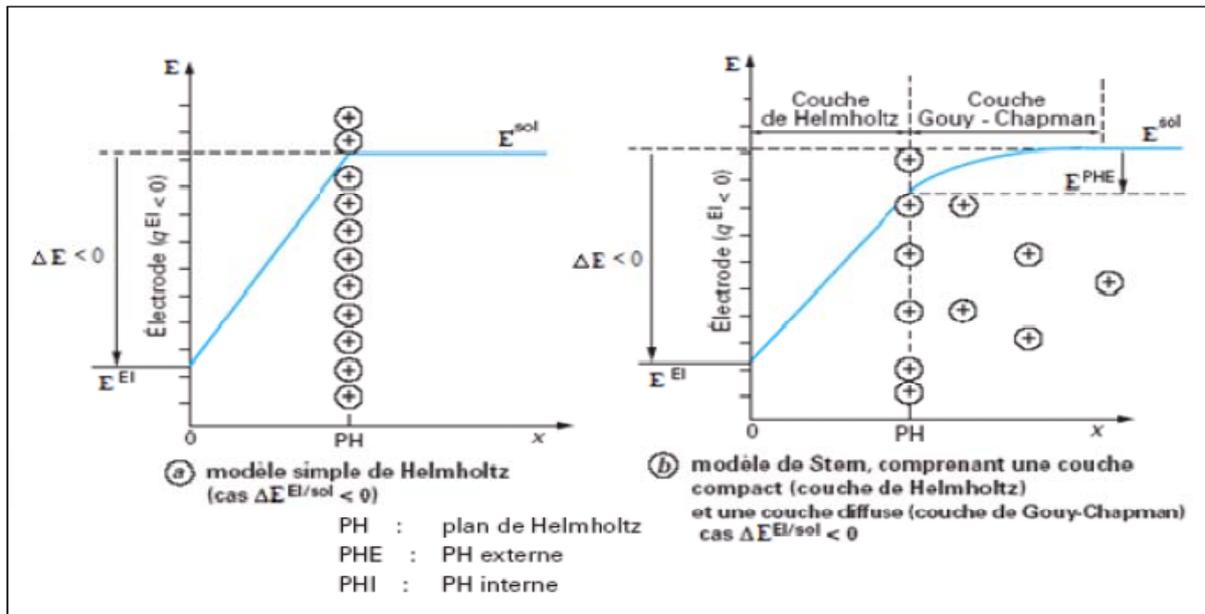


Figure II.1 : Distribution des charges et variation du potentiel électrique E en fonction de la distance (x) à la surface de l'électrode [21]

II.4.2.2. Condition de corrosion et de prévision thermodynamique

La corrosion métallique se produit lorsque le système métal/solution est déplacé de son équilibre par une polarisation anodique.

Les réactions de corrosion des métaux dépendent à la fois du potentiel métal/solution et du pH, les prévisions sont facilitées par l'examen de diagrammes tension-pH dus au professeur M. Pourbaix. Dans ce type de diagramme, on matérialise par les droites obliques les équilibres faisant intervenir à la fois des protons et des électrons, par des horizontales les équilibres qui ne mettent en jeu que des électrons, et par des verticales, ceux qui ne concernent que les échanges de protons. [22]

La figure II.1 présente un diagramme très simple du système Fe-H₂O.

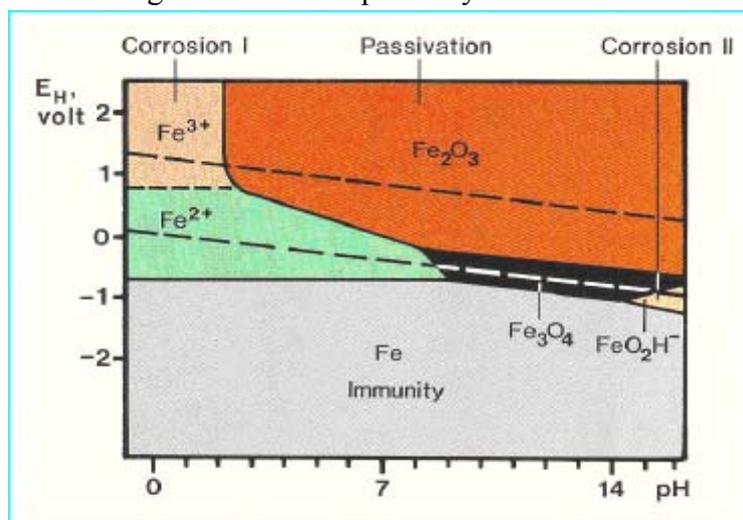


Figure II.2 : Diagramme potentiel – pH du fer (T= 25°C) [23]

Ce diagramme comporte trois zones distinctes : [22]

- ❖ Une zone où la corrosion peut thermodynamiquement avoir lieu, mais elle se déroule à une très faible vitesse parce que la surface du métal est protégée par les produits de corrosion : passivité.
- ❖ Une zone d'immunité, dans laquelle la corrosion est thermodynamiquement impossible.
- ❖ Une zone, où la dissolution anodique du métal peut se dérouler : corrosion.

II.5. Aspect électrochimique

La corrosion est avant tout un phénomène électrochimique ; ce qui introduit la notion de Transfert de Charge Électrochimique. C'est pour cela qu'il nous faut bien connaître les notions de base en électrochimie, ainsi que les grandeurs et lois qui régissent ce mécanisme. Selon la loi de Faraday, lorsque N moles d'un métal réagissent, une quantité de charges électriques proportionnelles Q passe à travers l'interface électrode/électrolyte :

$$Q = N.F .n \dots\dots\dots(II.2)$$

F : désigne la constante de Faraday, $F = 96490$ c/mol.

n : nombre de charge, exprime le coefficient stœchiométrique des électrons dans l'équation de la réaction d'électrodes.

N : nombres de moles électrolysées.

En dérivant l'équation de Faraday par rapport au temps, on obtient la loi de Faraday sous sa forme la plus utilisée :

$$I = nF \frac{dN}{dt} = \frac{dQ}{dt}$$

$I = \frac{dQ}{dt}$: représente l'intensité du courant électrique, en Ampères.

$v = \frac{dN}{dt}$: représente une vitesse de réaction en mol/s

Donc :

$$v = \frac{dN}{dt} = \frac{I}{nF}$$

$i = \frac{I}{A}$: représente la densité du courant [A/cm^2].

On a donc :

$$v = \frac{iA}{nF}$$

La loi de Faraday indique que la vitesse d'une réaction d'électrode est proportionnelle à l'intensité de courant électrique à travers l'interface électrode / électrolyte.

Interpréter la vitesse d'une réaction électrochimique est souvent plus complexe que comprendre une réaction homogène, car un processus électrochimique est une réaction hétérogène (qui n'a lieu qu'à l'interface électrode/ électrolyte) avec une vitesse qui dépend du

transfert de masse vers l'électrode et d'effets de surface variés, en plus des variables cinétique habituelles. [19]

II.6.Polarisation et surtension d'une électrode

Lorsque dans un système métal/milieu, une seule réaction d'électrode se produit à la surface, il s'agit d'un système d'électrode simple. Le potentiel au repos correspond au potentiel que prend spontanément une électrode, en l'absence d'un courant externe. Pour une électrode simple, le potentiel au repos équivaut au potentiel réversible, E_{rev} . [24]

Si le potentiel d'une électrode diffère du potentiel au repos, un courant électrique traverse l'interface électrode-électrolyte. La surtension η correspond à l'écart entre le potentiel d'électrode et le potentiel réversible d'une réaction d'électrode.

$$\eta = E - E_{rev}$$

Lorsque plusieurs réactions d'électrode ont lieu simultanément dans un système métal-électrolyte, il s'agit d'un système d'électrode mixte. Dans le cas d'électrode mixte, le potentiel au repos équivaut au potentiel de corrosion E_{corr} . Au passage de courant, le potentiel que prend l'électrode diffère du potentiel de corrosion. Cet écart de potentiel est appelé polarisation ξ .

$$\xi = E - E_{corr}$$

Généralement le processus électrochimique est caractérisé par trois types distincts de polarisation. La polarisation totale est la somme de ces polarisations :

$$E_{app} - E_{eq} = \eta_{act} + \eta_{conc} + iR$$

η_{act} : est la surtension d'activation qui est une fonction complexe décrivant la cinétique du transfert de charge des processus électrochimiques. La surtension d'activation (η_{act}) est prédominante aux faibles valeurs de polarisation en courants ou en potentiels.

η_{conc} : est la surtension de concentration qui est une fonction qui décrit les limitations du transport de masse liées aux processus électrochimiques. La surtension de concentration est prédominante aux polarisations élevées en courants ou en potentiels.

iR : est la polarisation de résistance, elle correspond à la formation d'un film à la surface de l'électrode. Cette polarisation est souvent assimilée à une chute ohmique. [19, 24]

II.7. Les courbes de polarisations

La densité de courant mesurée en fonction du potentiel donne une courbe de polarisation qui renseigne sur la cinétique des réactions d'électrode en jeu. Selon la méthode employée, contrôle du potentiel ou contrôle du courant on obtient respectivement les courbes de polarisation potentiostatique $I = f(E)$ ou galvanostatique $E = f(I)$. (Figure II.3) [19]

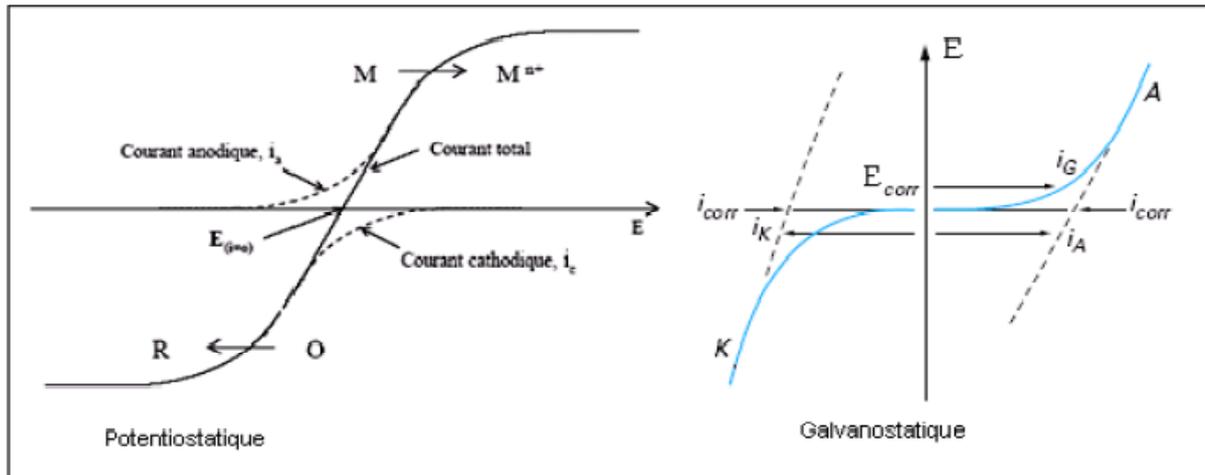


Figure II.3 : Représentation schématique de courbe de polarisation [25]

Pour tracer les courbes de polarisation, on utilise un appareil appelé potentiostat.

Les courbes de polarisation sont déterminées en appliquant un potentiel entre une électrode de travail (ET) et une électrode de référence (ER). Un courant stationnaire s'établit après un certain temps (quelques minutes à quelques heures) et il est mesuré entre l'électrode de travail et une contre électrode (électrode auxiliaire EA). (Figure II.4)

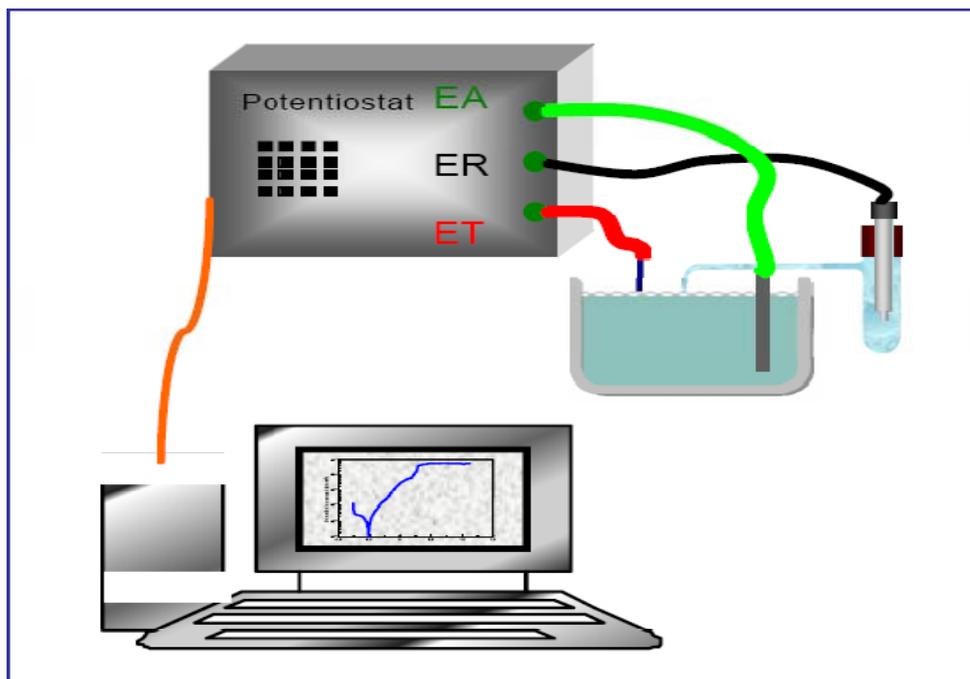


Figure II.4 : Dispositif expérimental permettant de tracer les courbes de polarisation

Les courbes de polarisation des réactions contrôlées par l'activation suivent une loi de Butler-Volmer:

$$i=i_a+i_c= i_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{\beta n F \eta}{RT}\right) \right] \dots\dots\dots (II.3)$$

Où :

- i : est la densité de courant anodique ou cathodique.
- i_0 : est la densité de courant d'échange.
- α et β : les coefficients de transfert de charge anodique et cathodique.
- η : est la polarisation (E-E_{rev}).

Leur tracé en échelle semi-logarithmique, laisse apparaître, loin de l'équilibre, l'existence de deux branches, dites droites de Tafel, d'équation **log i = log i₀ ±βη**, qui signifient que la réaction liée à la polarisation appliquée est prédominante (figure II.5).

Les pentes des droites ou coefficients de Tafel β_A et β_C, et la densité de courant d'échange i₀, liés aux vitesses des réactions partielles anodiques et cathodiques à l'équilibre, sont représentatifs du mécanisme réactionnel et de la vitesse de dissolution du métal. [19,26]

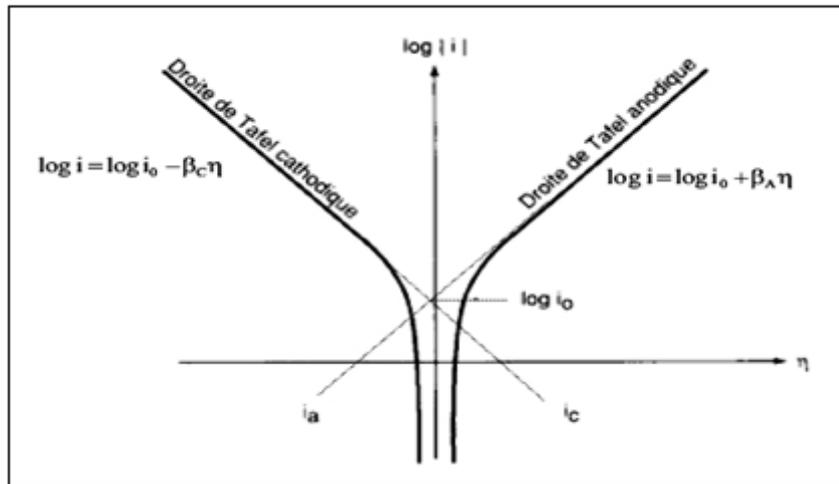


Figure II.5 : Courbes de polarisation et droites de Tafel d'un système redox à l'équilibre [27]

II.8. Phénomène de passivité

La passivité d'un métal est l'état de haute stabilité chimique qu'acquiert ce métal dans certaines conditions particulières, il se comporte comme un métal d'activité normale.

Lorsqu'on plonge le fer dans une solution de NaCl, il se corrode d'une manière intense.

Lorsqu'on augmente la concentration de NaCl, la vitesse de la corrosion augmente ; mais quand on atteint une concentration critique (figure II.6), la corrosion cesse brusquement et le fer passe sans transition de l'état actif à un état passif, qui est défini comme la présence d'une couche protectrice contenant de l'oxygène.

Cette couche peut atteindre 0.3 μm et plus ; elle constitue une barrière efficace pour le passage des ions métallique, donc freiner la corrosion. [28]

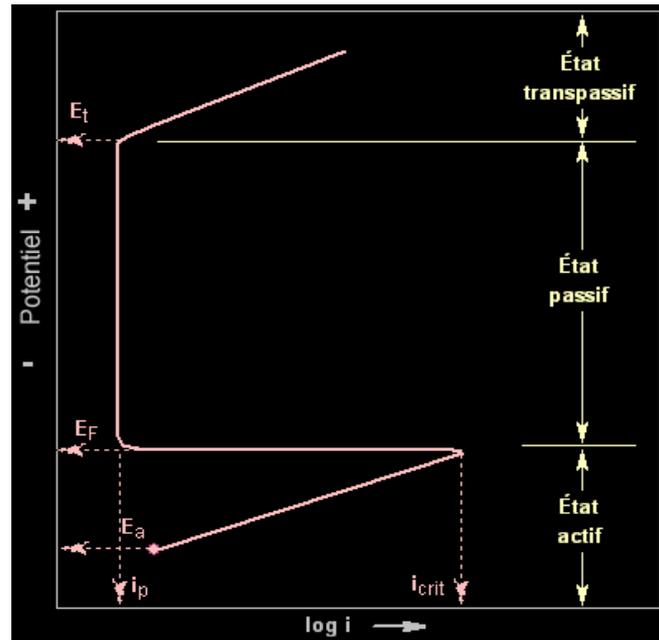


Figure II.6 : Courbe de polarisation anodique d'un métal ou alliage passivable [7]

II.9.Méthodes électrochimiques

Les méthodes électrochimiques de mesure de la corrosion reposent sur l'exploitation des courbes de polarisation.

Avant chaque test électrochimique, les électrodes de travail sont immergées à leur potentiel d'abandon jusqu'à l'obtention d'un état stationnaire ou quasi-stationnaire. Le test de polarisation potentiostatique consiste à imposer une perturbation en potentiel pendant un temps t et à enregistrer l'évolution du courant pendant le temps t . En général le balayage en potentiel s'effectue depuis les potentiels cathodiques (300mV plus négatifs que le potentiel de corrosion) vers les potentiels anodiques. [29]

- **La méthode de Tafel**

Appelée aussi première méthode de Stern dont le principe repose sur l'extrapolation des branches anodiques et cathodiques assimilées à des droites de Tafel, sur la courbe $\log I = f(E)$ donnant le point $(I_{\text{corr}}, E_{\text{corr}})$ (figure II.7) à leurs intersection. [30]

Néanmoins, certaines conditions sont à vérifier :

- ✓ Corrosion uniforme du métal
- ✓ Produits de corrosion sous forme d'ions dissous,
- ✓ Mécanisme réactionnel indépendant du potentiel,
- ✓ Absence d'effets dus au transport de masse

- ✓ Effets ohmiques négligeables.

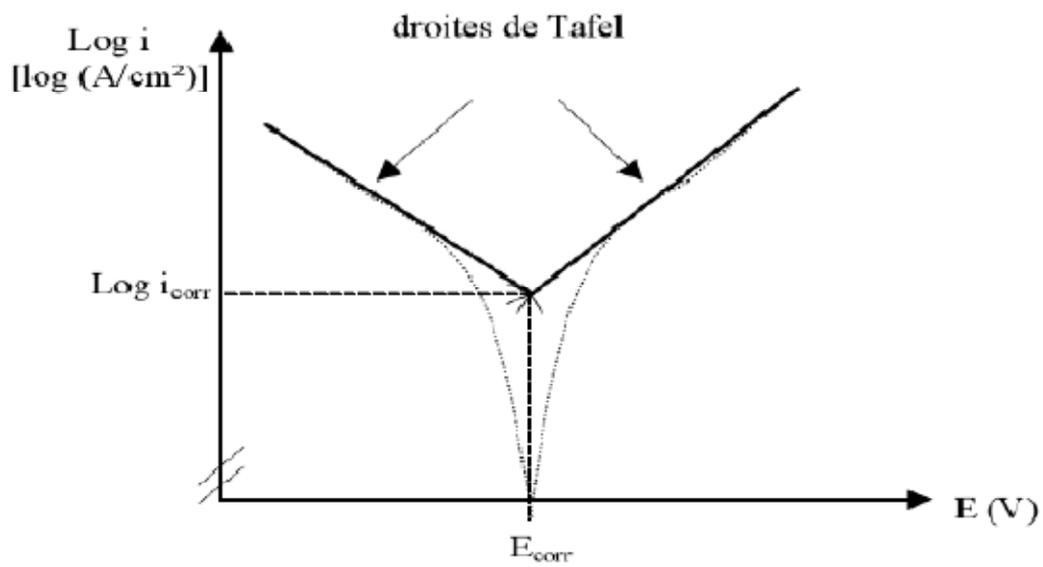


Figure II.7 : Détermination de courant de corrosion par la méthode des droites de Tafel. [31]



Chapitre III

Fatigue-corrosion

III.1.Introduction

Bien que l'expression (fatigue corrosion) ait été utilisée auparavant par McAdam en 1926, ce n'est qu'en 1971 que s'est tenue à Storrs, Connecticut, USA, une conférence internationale sur la fatigue-corrosion pour passer en revue et analyser ce problème complexe.

Les comptes rendus de la conférence de Storrs contiennent une grande quantité de données expérimentales et quelques modèles théoriques excellents. Cette conférence n'a pas permis de comprendre complètement la fatigue-corrosion, mais elle a fourni une excellente approche interdisciplinaire du problème en analysant les facteurs environnementaux, mécaniques et métallurgiques qui affectent ce type de rupture. [6]

III.2.Définition

Fatigue-corrosion : effet combiné de la fatigue et d'un environnement agressif agissant simultanément, qui conduit à une dégradation du comportement en fatigue. [32]

La fatigue-corrosion se distingue de la corrosion fissurante sous contrainte mécanique par le fait que les contraintes appliquées ne sont plus statiques mais cycliques, par exemple contraintes périodiques alternées.

Dans le cas des aciers, la limite de fatigue classique relevée sur les courbes Wöhler, contrainte appliquée en fonction du nombre de cycles [$\sigma = f(N)$], n'existe plus lorsque l'essai est effectué dans un milieu corrosif. Quel que soit le niveau de contrainte, la rupture va s'effectuer pour un nombre déterminé de cycles.

Les fissures sont généralement de type transgranulaire avec peu d'embranchements secondaires. Quelques petites fissures peuvent apparaître au voisinage de la fissure principale.

L'amorçage de la fissure fait appel soit à l'existence d'un défaut de surface (rayure d'usinage, congé de raccordement avec un angle trop aigu), soit à un processus de glissement de plans atomiques aux endroits où les contraintes sont les plus fortes (figure III.1) : glissements qui vont se traduire par l'apparition au niveau de la surface de protubérances (extrusions) et de retraits (intrusions). Chaque marche (bande de glissement) correspond à l'empilement de plusieurs centaines de plans atomiques.

Ces intrusions seraient à l'origine de nombreuses fissures de fatigue-corrosion. Le milieu corrosif permet la poursuite du mécanisme de déformation plastique éliminant les « barrières » (empilements de dislocations par exemple). Il diminue ainsi la résistance au phénomène de fatigue. Le fond des piqures constitue un site de concentration de contraintes : les fissures de fatigue-corrosion s'amorcent souvent à partir d'une piqure. [33]

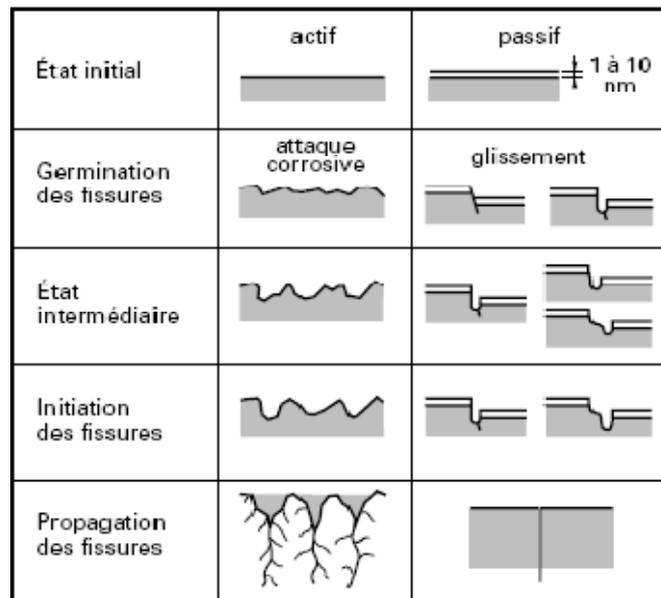


Figure III.1 : Représentation des différentes étapes d'endommagement en fatigue-corrosion[32]

III.3.Mécanisme de la fatigue-corrosion

La fatigue-corrosion dépend à la fois de paramètres, mécaniques et électrochimiques, ce qui conduit à des comportements complexes dépendant des processus dominants : [33]

- Les dommages mécaniques, essentiellement liés au nombre de cycles, sont dominants sous forte sollicitation mécanique et à fréquence élevée.
- Les dommages par corrosion, dépendants du temps, sont souvent dominants à sollicitation mécanique modérée et à faible fréquence. A très faible fréquence ou à faible caractère cyclique de la sollicitation ($\Delta\sigma$ faible, $\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ proche de 1), la morphologie des fissures peut même se rapprocher de celle de la corrosion sous contrainte.

En conséquence, la description des phénomènes de fatigue-corrosion doit prendre en compte non seulement le niveau de sollicitation mécanique, mais aussi la fréquence et la forme des cycles dont dépendent les vitesses locales de déformation et la durée d'application des contraintes. A la représentation des vitesses de fissuration en termes d'avancée de la fissure par cycle (da/dN), universellement utilisée en fatigue, devrait se substituer, ou moins s'adjoindre, une représentation en fonction du temps (da/dt) pour la fatigue-corrosion. [33]

III.4.Amorçage des fissures de fatigue-corrosion

La présence d'un milieu corrosif accélère pratiquement toujours l'amorçage des fissures, ce qui se traduit par la diminution, voire la disparition, de la limite d'endurance (au moins dans la limite des nombres de cycles expérimentalement possible), même en l'absence de tout risque identifié de corrosion sous contrainte. [33]

La figure.III.2 illustre cet effet sur un acier inoxydable.
On notera l'effet très défavorable de la dissolution en milieux acide.

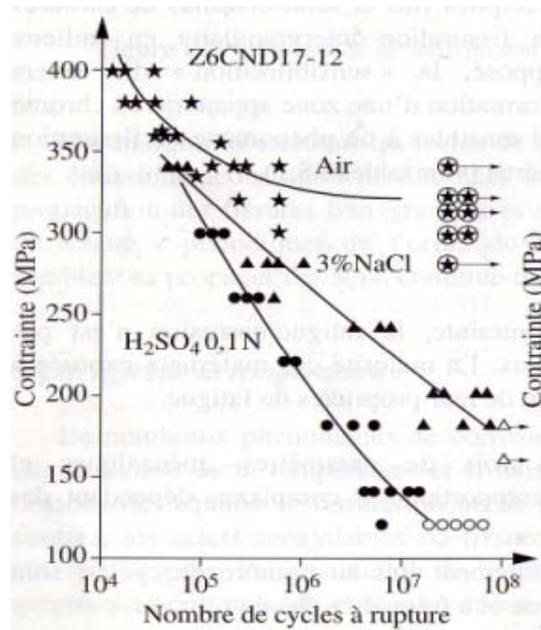
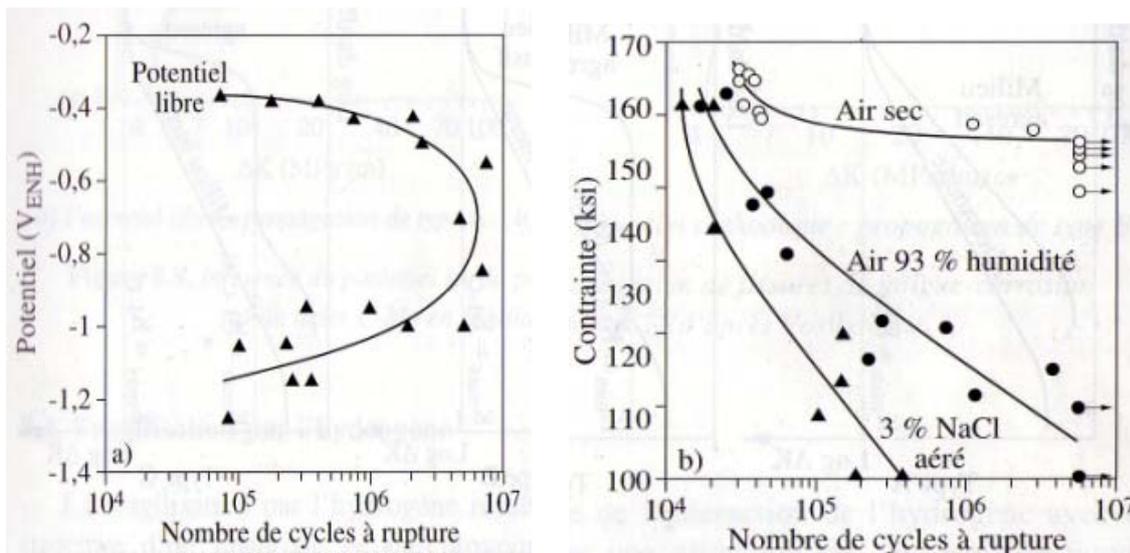


Figure III.2 : Durée de vie d'acier inoxydable (nuance austénitique Cr17-Ni12-mo) en fatigue-corrosion [33]

Sur des matériaux sensibles à la fragilisation par l'hydrogène, la production d'hydrogène consécutive à certains phénomènes de corrosion est à l'origine de réduction dramatique de la résistance à l'amorçage de fissures de fatigue. C'est notamment le cas de certains aciers à haute limite d'élasticité en milieu marin, particulièrement sous protection cathodique (figure.III.3.a) mais aussi sous le simple effet de l'humidité de l'air (figure.III.3.b)



a) effet d'un potentiel cathodique en eau de mer

b) effet de l'air humide

Figure III.3 : fatigue-corrosion sur un acier à haute limite d'élasticité [33]

III.5. Propagation des fissures de fatigue-corrosion

L'effet d'un milieu sur la propagation de fissures de fatigue est d'en augmenter la vitesse, au moins dans une gamme donnée de ΔK . Ceci conduit à différents comportements qui ont été séparés en trois catégories (figure.III.4) : [33]

- Le comportement A habituellement nommé fatigue-corrosion « vrai ». La vitesse de fissuration suit une loi de Paris avec une vitesse accrue par rapport à la vitesse en atmosphère neutre. Le comportement à la fatigue à l'air peut souvent être considéré comme un cas de fatigue-corrosion de type A (tout au moins quand il diffère du comportement sous vide).
- Le comportement B est souvent appelé « fatigue-corrosion par corrosion sous contrainte » parce qu'il est souvent celui des systèmes sensibles à la corrosion sous contrainte. Il se caractérise par un « plateau » qui apparaît pour une gamme de valeur de ΔK supérieures à une valeur seuil K_{th} . En fait, il semble qu'il soit aussi observé sur certains systèmes non sensibles à la corrosion sous contrainte, par exemple sur des aciers faiblement alliés dans l'eau à haute température désaérée ou sur des aciers ferritiques soumis à des polarisations cathodiques en eau de mer. Il est alors souvent attribué à un phénomène de fragilisation par l'hydrogène.
- Le comportement C est une combinaison des comportements A et B.

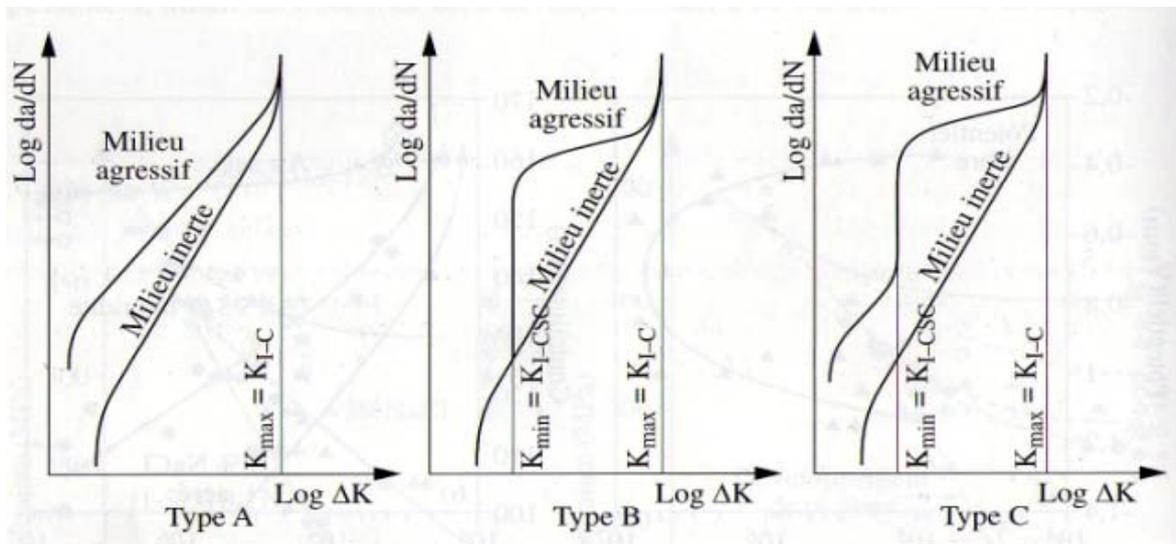
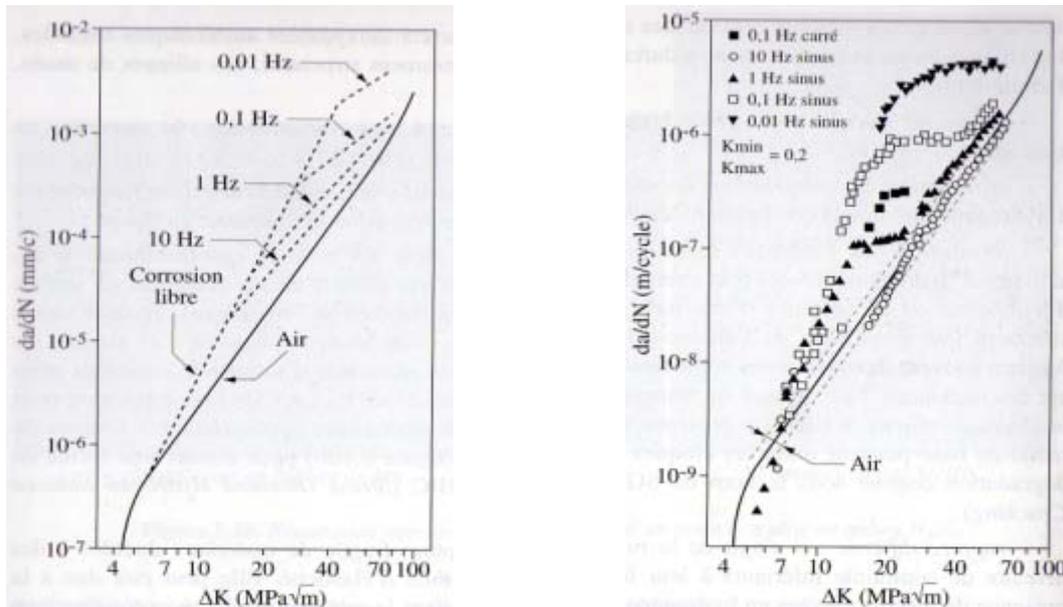


Figure III.4 : les différents types de propagation des fissures de fatigue-corrosion [33]

L'exemple de la figure.III.5 montre que le même acier peut avoir des comportements de type A et B (ou C) selon le potentiel appliqué, le comportement C étant associé à une fragilisation par l'hydrogène due à la polarisation cathodique.

Cette figure montre aussi un effet très fréquemment observé de la fréquence de la sollicitation mécanique : la diminution de la fréquence augmente la vitesse de propagation par cycle da/dN (mais diminue la vitesse de propagation par unité de temps da/dt) et augmente le facteur seuil d'intensité de contrainte ΔK_{th} .



a) potentiel libre : propagation de type A b) potentiel cathodique: propagation de type B

Figure III.5 : influence du potentiel sur la propagation de fissures de fatigue-corrosion sur un acier C-Mn en solution NaCl [33]

III.6.Exemples d'essais de fatigue-corrosion sur un alliage d'Aluminium

III.6.1.Principales propriétés de l'aluminium

III.6.1.1.Historique

L'élément aluminium a été découvert par le savant allemand Wöhler, à l'Université de Göttingen en 1827. C'est l'élément métallique le plus présent à la surface de la terre. En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2 % environ de celle des aciers. Cependant, ce métal (et ses alliages) arrive en seconde position après l'acier lorsque l'on parle de l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable.

III.6.1.2.Propriétés physiques

L'aluminium est un élément du groupe III de la classification de MENDELEEV. Il cristallise dans une structure cubique à faces centrées ($a = 0.4041$ nm), fond à 660°C . C'est un métal léger de masse atomique de 26.97 g.mole $^{-1}$, de numéro atomique $Z=13$ et de masse volumique de $2,7$ g.cm $^{-3}$ à 20°C . [34]

Il caractérise aussi par :

-Un coefficient de dilatation tel que :

$$\alpha = 23.8 \cdot 10^{-6} \text{ k}^{-1} \text{ (de } 20 \text{ }^{\circ}\text{C à } 100 \text{ }^{\circ}\text{C)}$$

$$\alpha = 25.4 \cdot 10^{-6} \text{ k}^{-1} \text{ (de } 20 \text{ }^{\circ}\text{C à } 300 \text{ }^{\circ}\text{C)}$$

$$\alpha = 28.7 \cdot 10^{-6} \text{ k}^{-1} \text{ (de } 20 \text{ }^{\circ}\text{C à } 600 \text{ }^{\circ}\text{C)}.$$

-Une capacité thermique massique a 20 °C: $C=950 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

-Une conductibilité thermique a 20 °C : $\lambda=217.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

-Une résistivité électrique à 20 °C : $\rho=2.63 \text{ }\mu\Omega.\text{cm}$. Ce qui correspond à 65% de celle du cuivre.

III.6.1.3.Propriétés mécaniques

Les propriétés de l'aluminium non allié recuit sont très faibles ; ainsi pour l'aluminium à 99.5% : une résistance mécanique $R_m=70\text{-}80 \text{ MPa}$, une limite élastique conventionnelle $R_p 10\text{-}20 \text{ MPa}$, un allongement $A\%=50\text{-}60$, un module de Young $E=65\ 000 - 70\ 000 \text{ MPa}$ et un coefficient de poisson $\nu=0,36$.

En effet, les propriétés mécaniques sont fortement modifiées par la déformation plastique à température proche de l'ambiante ; ainsi après écrouissage, le chauffage entraîne des phénomènes de restauration et de recristallisation analogues à ceux décrits dans le cas des aciers, mais dans le cas de l'aluminium, ces processus se produisent à des températures basses qui peuvent être proche de l'ambiante pour les nuances les plus pures. [34]

III.6.1.4.Propriétés chimiques

L'aluminium est fortement oxydable ($E^{\circ}_{\text{Al}/\text{Al}^{+3}} = -1.66 \text{ V}/_{\text{ENH}}$), mais il se retrouve d'une pellicule d'oxyde (Al_2O_3) épaisse, adhérent, qui protège le métal.

Par contre, cette alumine n'a qu'une résistance chimique limitée ; elle résiste cependant bien dans les solutions d'acide chlorhydriques, sulfurique et nitrique. Cependant les bases attaquent violemment le métal. Cette protection peut être améliorée par anodisation : il s'agit d'un traitement qui permet d'obtenir une couche épaisse de Al_2O_3 mais poreuse, et qui est ensuite colmatée par un traitement à l'eau chaude. Cette anodisation a un but décoratif, car une coloration est possible par des colorants spéciaux avant le colmatage. [34,35]

III.6.2 Résultats de l'essai de fatigue-corrosion sur un alliage d'Aluminium

La fatigue-corrosion a d'abord été attribuée à l'effet d'entaille associé à la formation de piqures de corrosion, du fait qu'il a été souvent observé que des fissures de fatigue s'amorçaient au creux des piqures. Il ne fait aucun doute que l'altération de l'état de surface joue un rôle important dans la diminution de la résistance à la fatigue d'un alliage. Cependant cet effet de surface ne peut expliquer à lui seul tous les effets de la fatigue-corrosion.

Prenons pour exemple l'alliage d'aluminium 7075-T6 qui est très susceptible à la formation de piqures et à la fatigue corrosion dans l'eau de mer. La figure.III.6 montre trois

courbes S-N typiques de cet alliage sous atmosphère d'azote sec, à l'air ambiant et dans une solution de 3% de NaCl. [6]

Les essais ont été menés en flexion alternée ($R = -1$) à 1800 tours/mn.

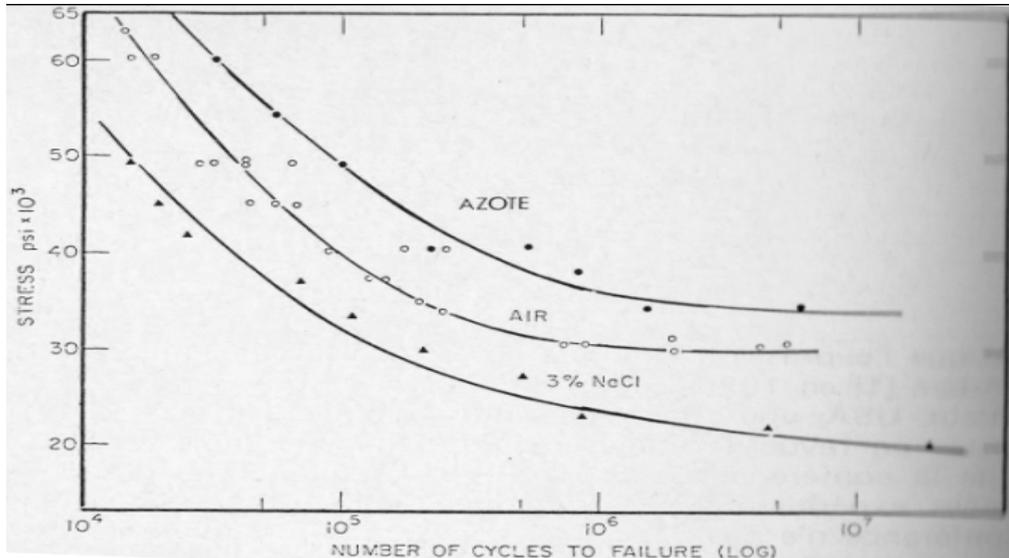


Figure III.6 : courbe S-N pour du 7075-T6 : en présence d'azote asséché, d'air ou d'une solution à 3% de NaCl. [6]

Cependant, quand les échantillons statiquement précorrodés sont testés dans la solution à 3% NaCl (figure.III.7), la résistance à la fatigue à 10^7 cycles est encore beaucoup plus basse que la résistance à la fatigue dans l'air.

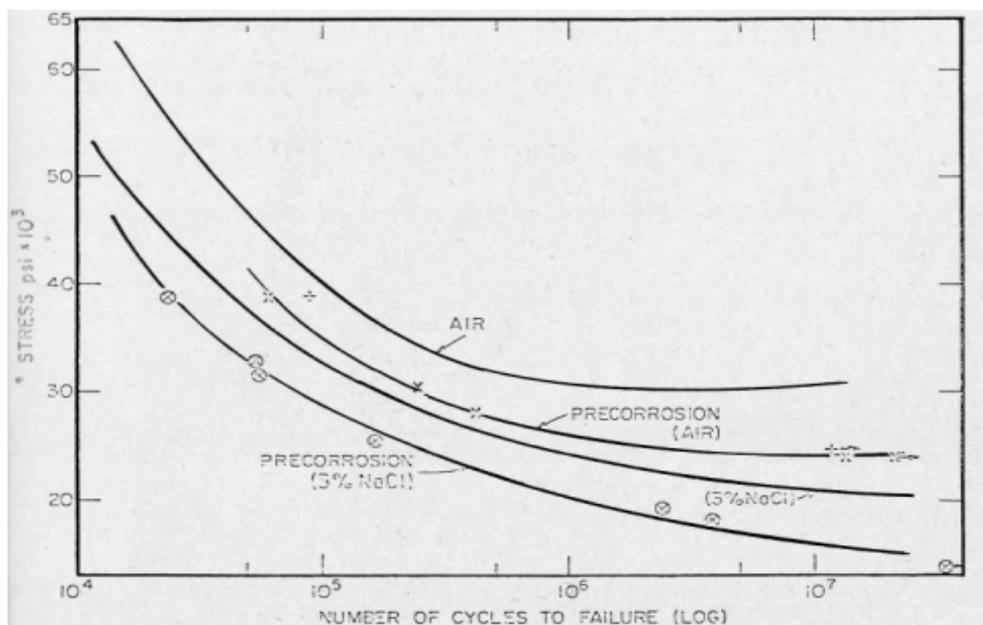


Figure III.7 : effet du dommage causé par la corrosion «statique» sur la résistance à la fatigue du 7075-T6 dans une solution chlorurée [6]

La différence de résistance entre les essais menés à l'air ou dans une solution à 3% NaCl est environ le même pour les échantillons précorrodés et pour les échantillons non corrodés. [6]

Par conséquent, il est clair que les endommagements causés par la corrosion et par la fatigue ne sont pas simplement additifs, mais qu'il existe un effet synergique entre ces deux causes.

III.7.Conclusion

La simulation correcte des conditions de fatigue-corrosion passe par une évaluation soignée des sollicitations à la fois mécaniques et environnementales du composant considéré. L'utilisation de moyens d'essais ainsi adaptée permet, non seulement de reproduire les endommagements qui peuvent être rencontrés en service, mais aussi de tester et d'optimiser des moyens de prévention contre la fatigue-corrosion. [32]



Chapitre IV

Conception d'un dispositif de fatigue- corrosion

IV.1.Introduction

Le processus de conception est le passage de l'idée à l'objet. En d'autres termes, la conception est la base de toutes les réalisations industrielles, car c'est le chemin le plus efficace pour avoir un produit de précision en un moindre temps, ce qui explique l'importance de la conception dans un projet de réalisation.

Les essais de fatigue-corrosion ont généralement deux objectifs principaux :

- Étudier l'influence d'un milieu corrosif sur le comportement en fatigue d'un matériau, en fonction de différents paramètres mécaniques, physico-chimiques et électrochimiques.
- Caractériser la tenue d'une pièce ou d'une structure dans des conditions d'environnement données.

L'essai de fatigue-corrosion le plus utilisé consiste à appliquer à une éprouvette cylindrique, tournant suivant son axe, un moment de flexion variable ou constant. Ce type d'essai, dit de flexion rotative.

IV.2.Conception d'un dispositif de fatigue-corrosion par flexion rotative

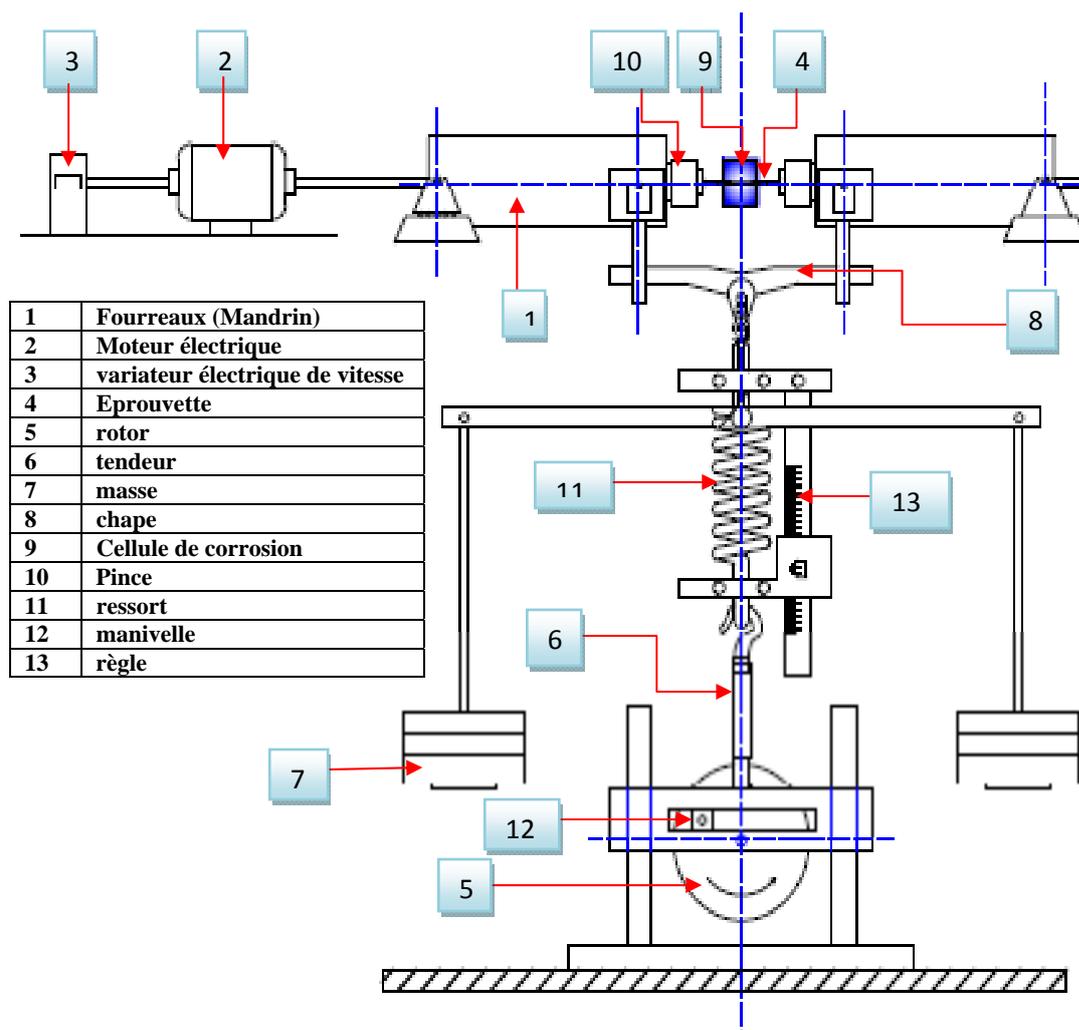


Figure IV.1 : Schéma du dispositif de fatigue-corrosion par flexion rotative (Réalisé sous Auto CAD)

Nous avons, dans un premier temps, conçu un dispositif de fatigue-corrosion, dans lequel la sollicitation mécanique se fait par flexion rotative. Le dispositif (figure IV.1) est structuré en deux parties principales:

- **Une partie tournante :**

Elle est composée de deux fourreaux, à l'intérieur de chacun est montée une pince qui permet le serrage de l'éprouvette et deux roulements rotules à deux rangés de billes qui assurent le guidage en rotation. L'un des fourreaux (gauche) est relié à un moteur électrique tournant. Le moteur est relié à un variateur électrique de vitesse. Quel que soit le type de sollicitation utilisé, il devra être possible de faire varier la fréquence du cycle de chargement.

- **Une partie de chargement:**

Dans ce dispositif la charge est rendue oscillante à l'aide d'un système à excentrique et coulisseau agissant sur la tension d'un ressort. Une chape est reliée aux deux fourreaux de manière à transmettre à la partie tournante l'effort produit par la masse coulissante.

IV.3. Application du milieu corrosif

- **Principes généraux :**

L'éprouvette est immergée dans le milieu corrosif se trouvant dans une cellule de corrosion fixe. La circulation du milieu corrosif doit être réalisée par l'intermédiaire d'une pompe entre la cellule de corrosion et un récipient de capacité au moins 10 fois supérieure à celle de la cellule. Ceci de manière à conserver l'homogénéité chimique et thermique du milieu corrosif pendant l'essai et, qu'il faut vérifier régulièrement. Une attention particulière est accordée à la teneur en oxygène et au pH de la solution. [32]

Par ailleurs, il est nécessaire que l'éprouvette soit isolée électriquement de la machine d'essais, pour ne pas modifier l'interface métal-solution. Dans le cas d'études de mécanismes ou de la mise au point des conditions électrochimiques qui doivent être appliquées à une structure, l'utilisation d'une contre-électrode peut s'avérer indispensable. Grâce à cette contre-électrode, il est en effet possible de faire varier de manière continue le potentiel de l'éprouvette, en utilisant un potentiostat. [32]

- **Conception de la cellule de corrosion :**

Pour la fabrication de la cellule, on utilise de préférence des matériaux minéraux ou organiques, résistant au milieu corrosif et évitant tout phénomène de couplage galvanique indésirable. Enfin, le choix d'un matériau transparent permet de voir le contenu de la cellule. Ainsi le plexiglas peut présenter une bonne solution.

L'alimentation de la cellule se fait à partir d'un réservoir qui assure un volume tampon suffisant de façon à ne pas dégrader trop rapidement le milieu. Dans tous les cas, la solution est renouvelée à intervalles réguliers pour maintenir les paramètres chimiques dans la gamme voulue. La cellule est alimentée à l'aide d'une pompe et un retour au réservoir par trop-plein (figure IV.2). Il est bon de rappeler que la circulation du milieu joue un rôle important sur la

corrosion en évacuant les produits de corrosion et en favorisant l'arrivée d'oxygène à la surface du métal. [32]

L'étanchéité doit être assurée entre les bords de la partie utile de l'échantillon et les parois de la cellule de corrosion. Ceci est surtout important lors de sollicitation par traction et par flexion rotative.

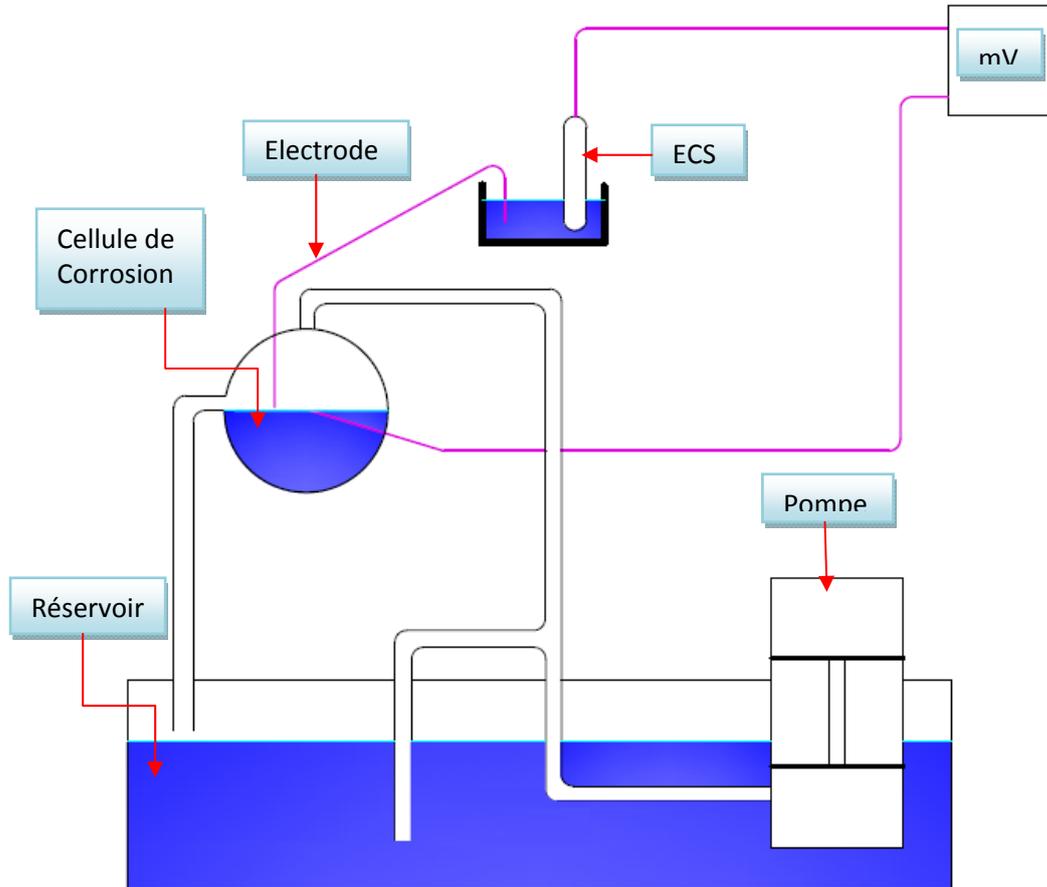


Figure IV.2 : schéma de cellule de corrosion

IV.4. Conception d'un dispositif de fatigue-corrosion par flexion plane

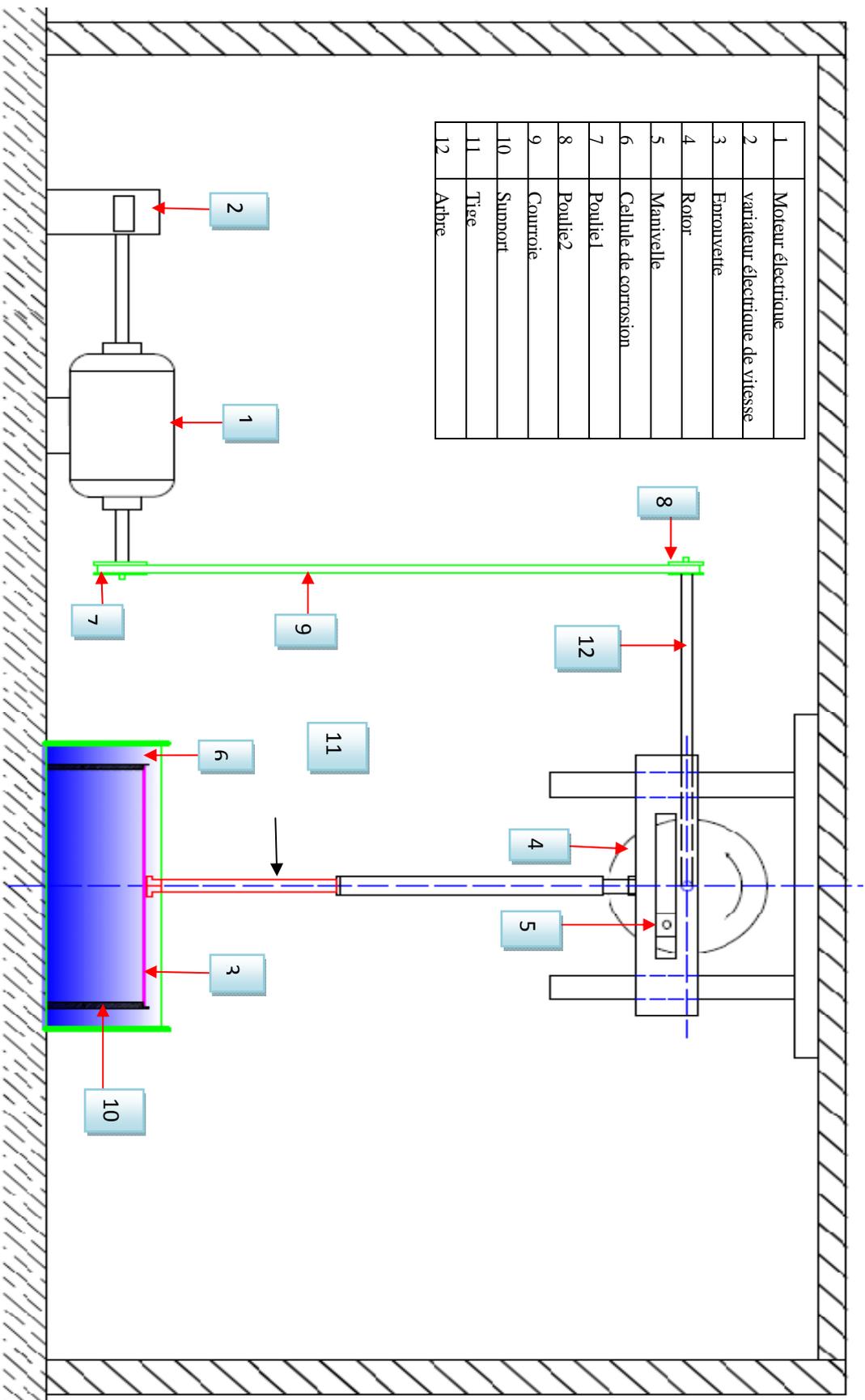
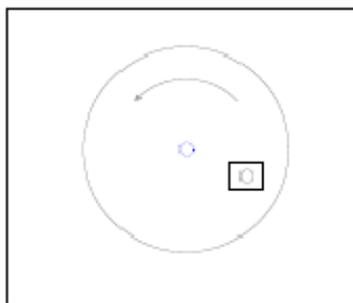


Figure IV.3 : Schéma du dispositif de fatigue-corrosion par flexion plane

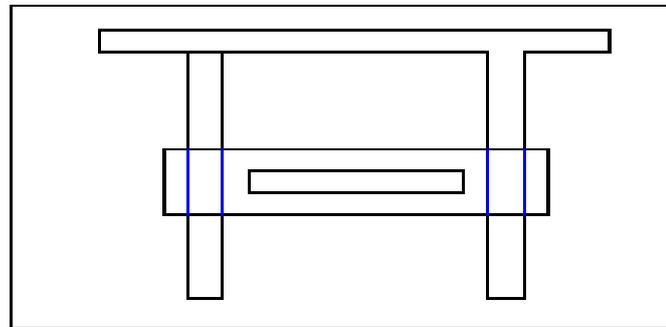
Nous avons conçu un dispositif de fatigue-corrosion, dans le quel la sollicitation mécanique se fait par flexion plane. Le dispositif (figure IV.1) transforme le mouvement circulaire continu engendré par la rotation du moteur à un mouvement rectiligne cyclique avec une fréquence donnée et une réduction de vitesse de rotation.

Dans ce dispositif l'effort est rendu cyclique à l'aide d'un système à excentrique et coulisseau (figure IV.4), le système excentrique est composé d'un rotor (disque) tournant, auquel on fixe une manivelle dont l'axe de rotation ne passe par le centre. La fixation de la manivelle se fait par l'intermédiaire d'un roulement d'une manière est ce qu'elle puisse tourner avec le disque d'une part, et tourner sur elle-même d'une autre, associée à un système coulisseau qui permet de se déplacer par glissement.

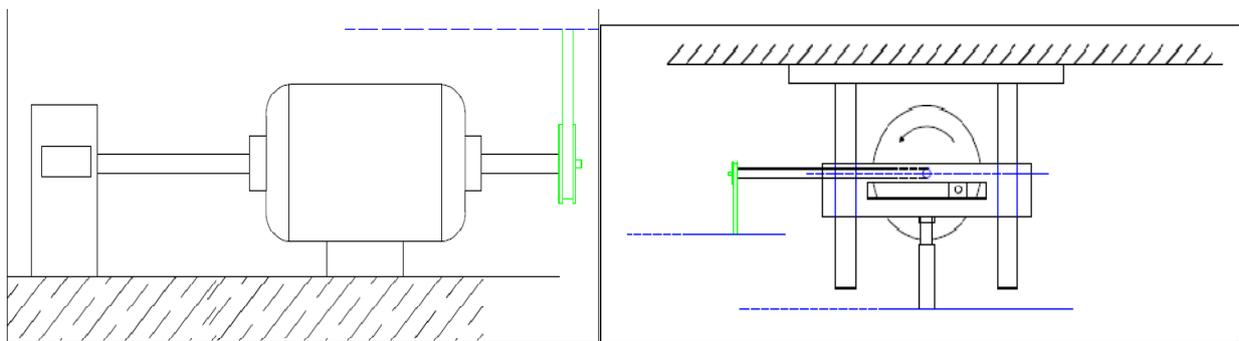
La liaison mécanique entre l'arbre du moteur et celui du rotor, ainsi que la réduction de vitesse sont assurées par un système de transmission (figure IV.5) qui est composé de deux poulies reliées par une courroie.



a) Système excentrique



b) Système coulisseau

Figure IV.4 : système à excentrique et coulisseau

a) liaison entre l'arbre du moteur et la poulie 1 b) liaison entre l'arbre du rotor et la poulie 2

Figure IV.5 : système de transmission

Comme les supports sur lesquels repose l'éprouvette ainsi que la tige sont en contact avec le milieu corrosif (figure IV.6), ils seront fabriqués en téflon, une matière plastique d'une grande résistance aux agents chimiques pour ne pas influencer sur le processus électrochimique.

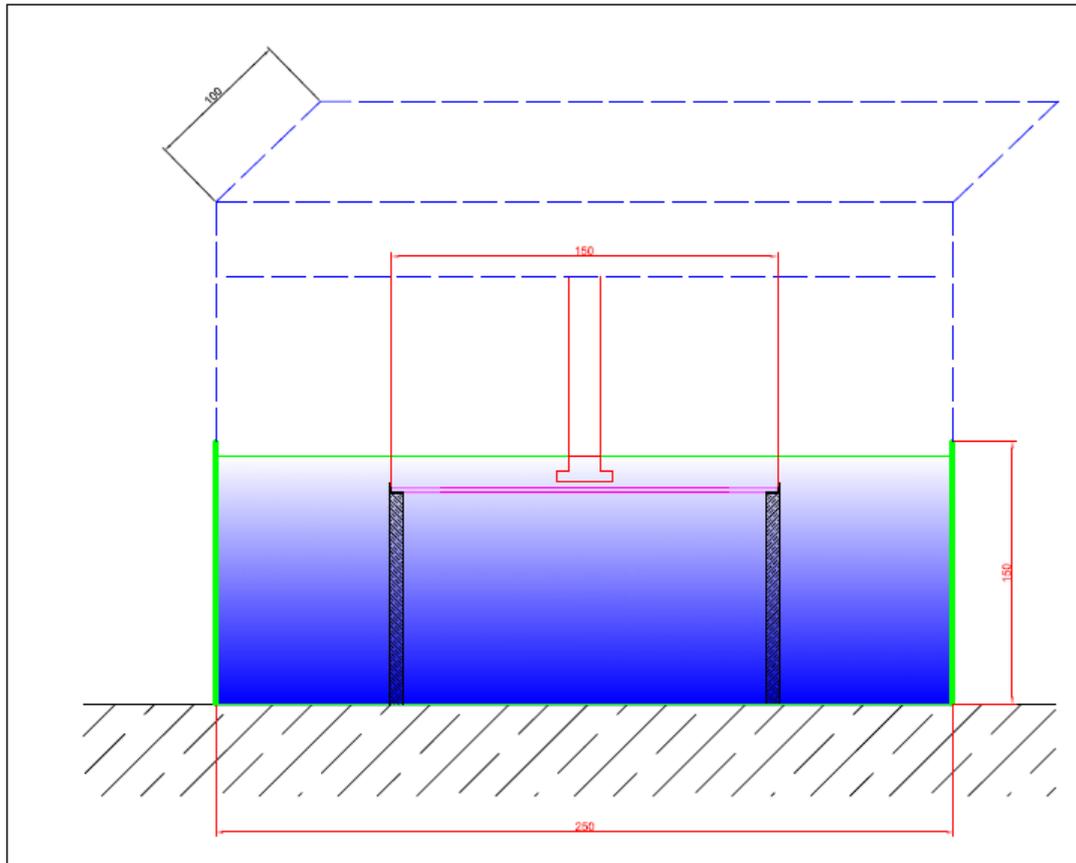


Figure IV.6 : enceinte de l'essai de fatigue-corrosion

IV.5. Dimensionnement des composants du dispositif

IV.5.1. Dimensionnement de l'éprouvette

Les éprouvettes sont en Aluminium de dimension :

- Longueur : $L=150\text{mm}$
- Largeur : $b=10\text{mm}$
- Hauteur : $h=3\text{mm}$

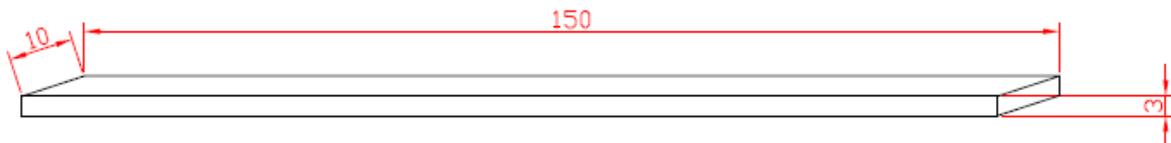


Figure IV.7 : éprouvette

IV.5.2. Dimensionnement de la cellule de corrosion

La cellule est en plexiglas de dimension :

- Longueur : $L=250\text{mm}$
- Largeur : $b=100\text{mm}$
- Hauteur : $h=150\text{mm}$

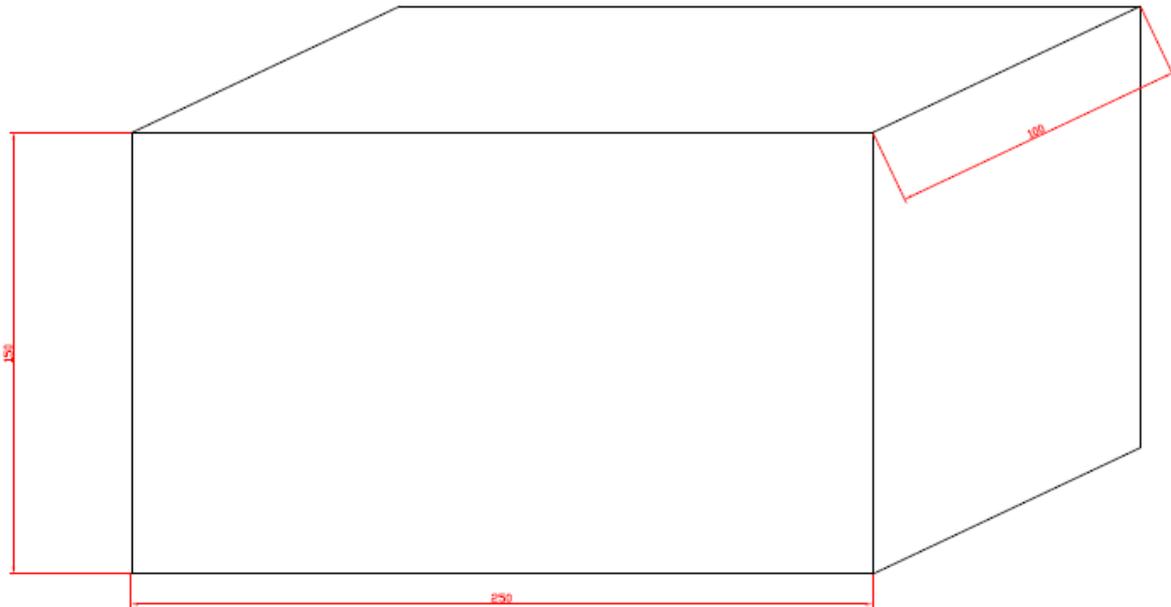


Figure IV.8 : cellule de corrosion

IV.5.3. Dimensionnement des poulies

Poulie 1 :

La poulie 1 est en fonte de dimension :

- rayon intérieur : $R=20\text{mm}$
- Rayon extérieur : $R=40\text{mm}$

Poulie 2 :

La poulie 2 est en fonte de dimension :

- rayon intérieur : $R=10\text{mm}$
- Rayon extérieur : $R=20\text{mm}$

Le diamètre de la poulie1 est égal au double de celui de la poulie2 (figure IV.9) de telle façon que la vitesse de cette dernière soit deux fois supérieure à celle de la poulie1. Ainsi on aura le nombre de tours par minute effectué par le moteur sera égal au nombre de cycles N.

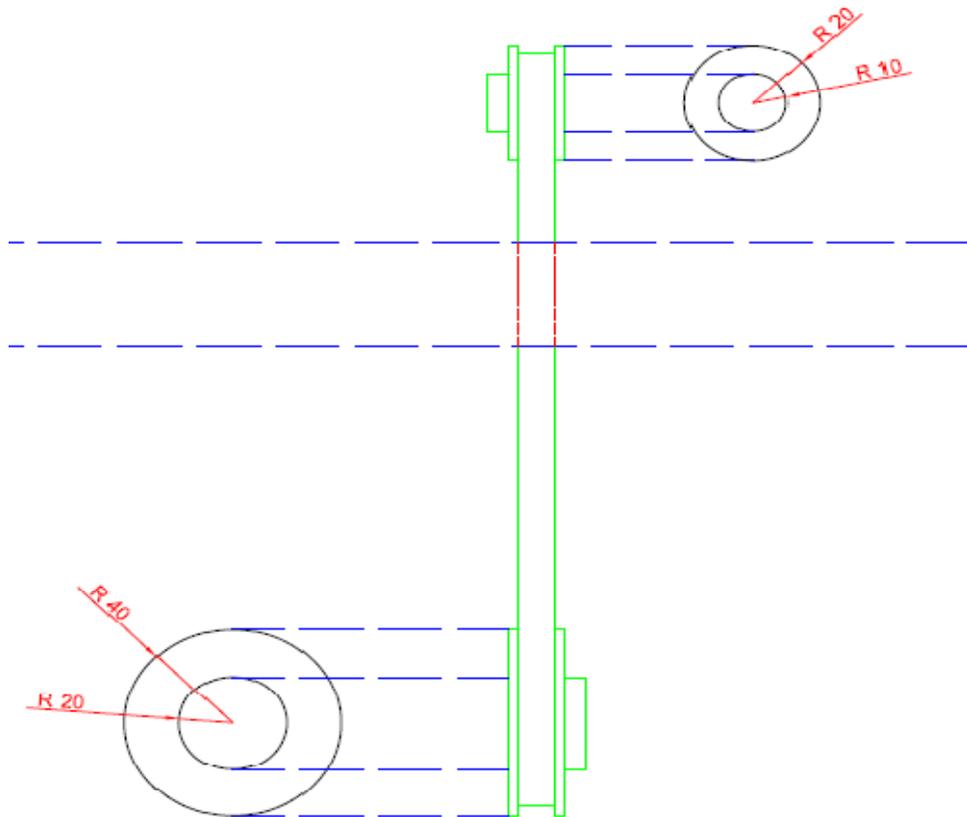


Figure IV.9: assemblage poulies-courroie

IV.6. Calcul de la contrainte nécessaire lors d'un essai de flexion plane

Lors d'un essai de flexion plane à trois points d'appuis, l'éprouvette repose sur deux supports (figure IV.10).

On applique une force F (figure IV.11) dont le niveau soit bien inférieur aux caractéristiques mécaniques du matériau (la limite d'élasticité R_e et la résistance à la rupture R_m).



Figure IV.10 : éprouvette de flexion plane [7]

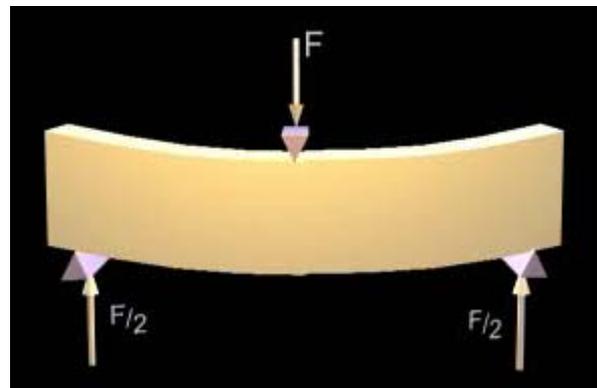


Figure IV.11 : application de la force [7]

- **Calcul de la contrainte nécessaire lors d'un essai de flexion à trois points d'appuis**

La force est appliquée une distance $\frac{L}{2}$ (figure IV.12).

La contrainte nécessaire est donnée par l'équation (IV.1) :

$$\sigma_{max} = \frac{3}{2} \left(\frac{FL}{bh^2} \right) \dots\dots\dots(IV.1)$$

-L = 150 mm.

-b = 10 mm.

-h = 3 mm.

A.N:

Après remplacement, l'équation (IV.1) devient :

$$\sigma_{max} = \frac{5}{2} F$$

F : la force appliquée.

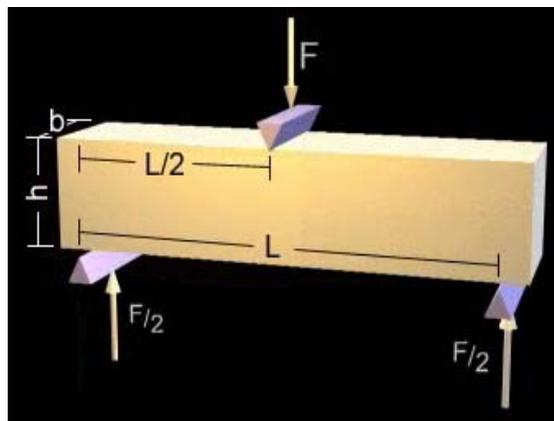


Figure IV.12 : essai de flexion à trois points d'appuis [7]

- **Calcul de la force appliquée lors d'un essai de flexion à trois points d'appuis**

Soit **Y** la flèche lors de l'essai.

Le **Y** est donné par l'équation (IV.2) :

$$Y = \frac{F.l^3}{6.E.I} \dots\dots\dots(IV.2)$$

I: moment d'inertie

Hors $I = \frac{bh^3}{12}$

Après remplacement l'équation (IV.2) devient :

$$Y = \frac{F.l^3.12}{6.E.b.h^3}$$

Donc

$$Y = \frac{25000}{E} F$$

D'où

$$F = \frac{E}{25000} Y$$

E : module de Young



Chapitre V

description du dispositif expérimental

V.1.Introduction

Pour étudier expérimentalement le comportement des métaux en fatigue-corrosion, on applique une contrainte ou une déformation périodique.

Les machines sont semblables à celles que l'on utilise pour les tests de fatigue, mais dans ce cas les essais se déroulent dans un milieu corrosif.

On compare généralement les résultats obtenus dans un milieu corrosif à ceux obtenus dans un milieu inerte.

V.2. Machine d'essai de fatigue- Corrosion

Afin d'étudier la fatigue d'un alliage d'aluminium dans un milieu corrosif, ce matériau est soumis à des tests de Fatigue- Corrosion. Le choix du type de test dépend des éprouvettes utilisées. Puisque les éprouvettes qui font l'objet de ces tests sont des éprouvettes planes de 3mm d'épaisseur, le test qui convient c'est la flexion plane cyclique (Figure V.1).

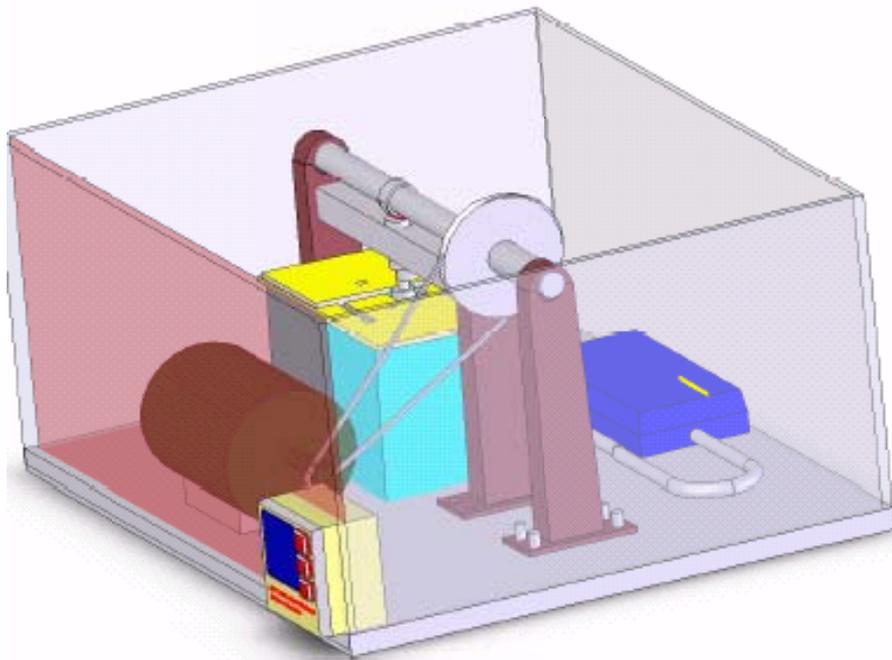


Figure V.1 : machine d'essai

La machine se compose de trois parties principales :

V.3.La partie mécanique (partie fatigue)

Cette partie transforme le mouvement circulaire engendré par la rotation du moteur à un mouvement rectiligne cyclique avec une fréquence donnée et une réduction de vitesse de

rotation. Pour cela, on opte pour le système de transmission (courroie-poulie) pour la réduction de vitesse et le système arbre à cames pour la transformation du mouvement.

Le dimensionnement de la partie mécanique se base sur trois paramètres :

- **Le type d'éprouvettes**

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes plates de dimensions (150x10x3) mm. Donc, la partie utile de l'éprouvette est de 150mm au maximum. Alors, il faut des appuis distants de 130mm. L'épaisseur de l'éprouvette est de 3mm, cette dimension entre dans le calcul de la hauteur des appuis.

- **La flèche maximale de flexion**

Pour rester dans le domaine élastique du matériau, on prévoit une petite valeur de la flèche. Cette dernière est liée aussi à la petite épaisseur. Le choix de la flèche est fixé par 3mm. Donc, cette valeur va déterminer les dimensions de la tige poussoir, du ressort, la came ainsi que les logement et supports de la tige.

- **La fréquence de rotation de la came**

Le dispositif est conçu pour tester le comportement à la fatigue-corrosion d'un alliage aluminium dans un milieu corrosif (eau de mer).

V.4. Les organes de la partie mécanique

V.4.1. Le bras de guidage

Afin d'éviter tous risque de déplacements de la tige poussoir, (Figure V.2).

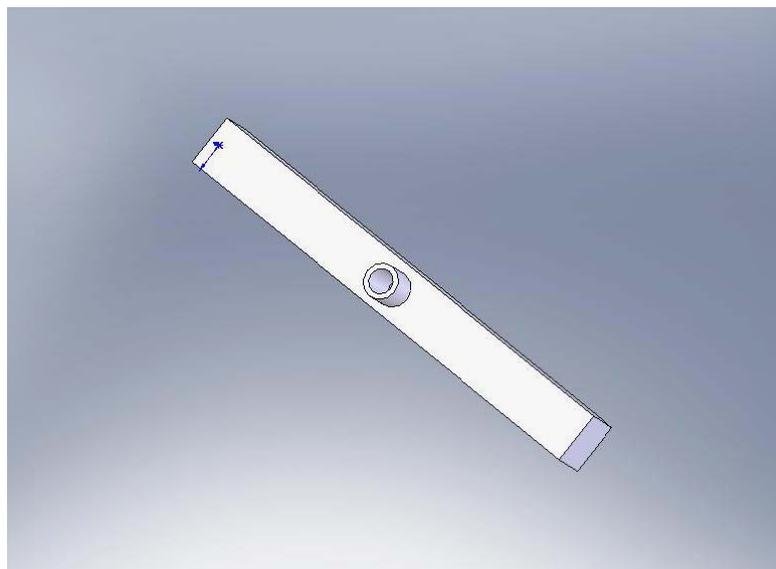


Figure V.2 : le bras de guidage

V.4.2. Les supports de l'éprouvette

A l'intérieur de l'enceinte, deux supports en matière résistante à la corrosion sont implantés pour la mise en place de l'éprouvette, l'éprouvette est placée dans une rainure pour éviter tout déplacement lors des essais, avec la largeur de la rainure est de 12mm, avec un jeu de 1mm de chaque cote de l'éprouvette. L'extrémité de ces supports est sous forme d'un demi-cylindre pour assurer un contact linéaire et non surfacique entre l'éprouvette et le support (appui simple) (Figure V.3).

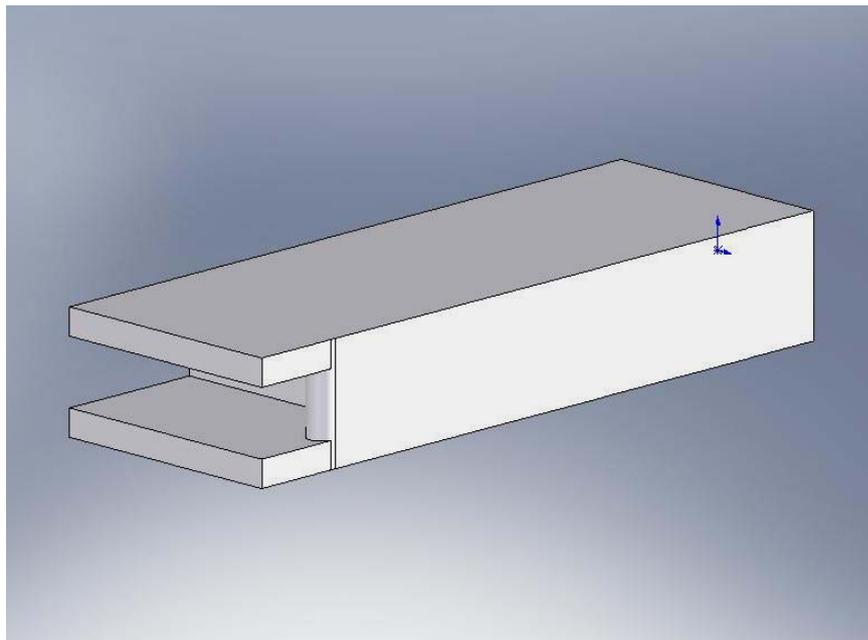


Figure V.3 : le support de l'éprouvette

V.4.3. Le dispositif du mouvement cyclique

Le mouvement rectiligne cyclique est assuré par un moteur qui peut tourner à une vitesse maximale de 1330 tours/mn qui est équivalente à une fréquence maximale de 50 Hertz.

Le moteur est relié un variateur électrique de vitesse.

Une réduction de vitesse est imposée, nous choisissons le mode (poulie-croie) (figure V.4).

Les dimensions des poulies :

$$D_1 = 40\text{mm.}$$

$$D_2 = 187\text{mm.}$$

Comme la vitesse de rotation de l'arbre du moteur N_1 est connue, alors on peut calculer celle de l'arbre réducteur N_2 en utilisant la relation suivante :

$$N_1 \cdot D_1 = N_2 \cdot D_2 \dots\dots\dots (V.1)$$

D_1 = diamètre de la poulie relié à l'arbre moteur.

D_2 = diamètre de la poulie relié à l'arbre réducteur.

N_1 = vitesse de rotation de la poulie 1.

N_2 = vitesse de rotation de la poulie2.

L'arbre est muni d'une came de qui donne une vitesse linéaire de à une tige poussoir qui agit directement sur l'éprouvette.

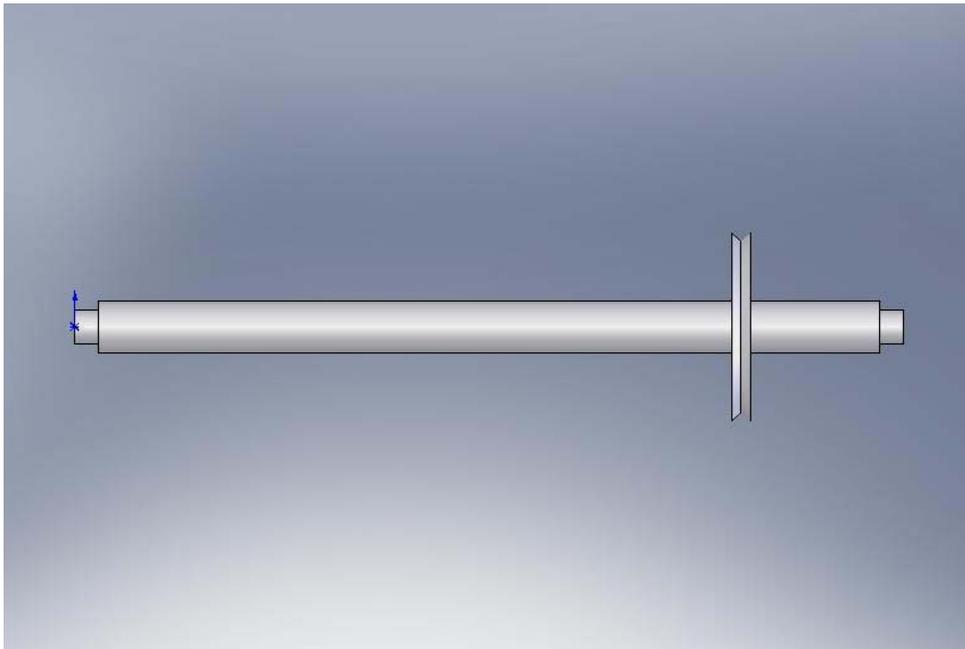


Figure V.4 : le dispositif de mouvement cylindrique

V.4.4.Guidage en rotation

Pour maintenir la rotation faible de l'arbre, on utilise des roulements à billes pour le guidage en rotation de l'arbre. Etant normalisés, on doit choisir un diamètre qui convient avec l'arbre réducteur.

V.4.5.La tige poussoir

C'est une tige cylindrique munie d'une gorge utilisée pour l'emplacement d'un ressort qui assure le retour de la tige vers le haut. La partie qui est en contact direct avec l'éprouvette est résistante à la corrosion, et elle est remplaçable dans le cas nécessaire. Elle est cylindrique pour assurer un contact linéaire avec l'éprouvette afin d'éviter tout endommagement de la surface de cette dernière causé par l'exercice d'une sollicitation cyclique (figure V.5).

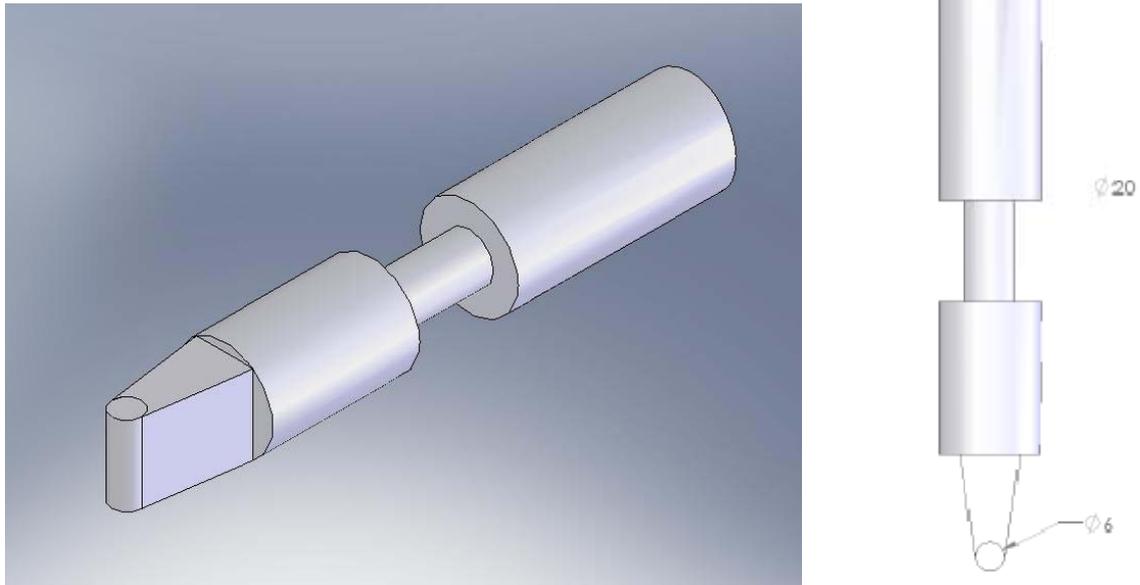


Figure V.5 : la tige poussoirs

V.4.6.Les supports

L'arbre réducteur est porté par deux supports fixés sur la plate forme (figure V.6). Avec un alésage pour le logement de roulement, et d'une profondeur de logement pour héberger le roulement .Au dessous de l'arbre, un support est placé pour héberger la tige poussoir.

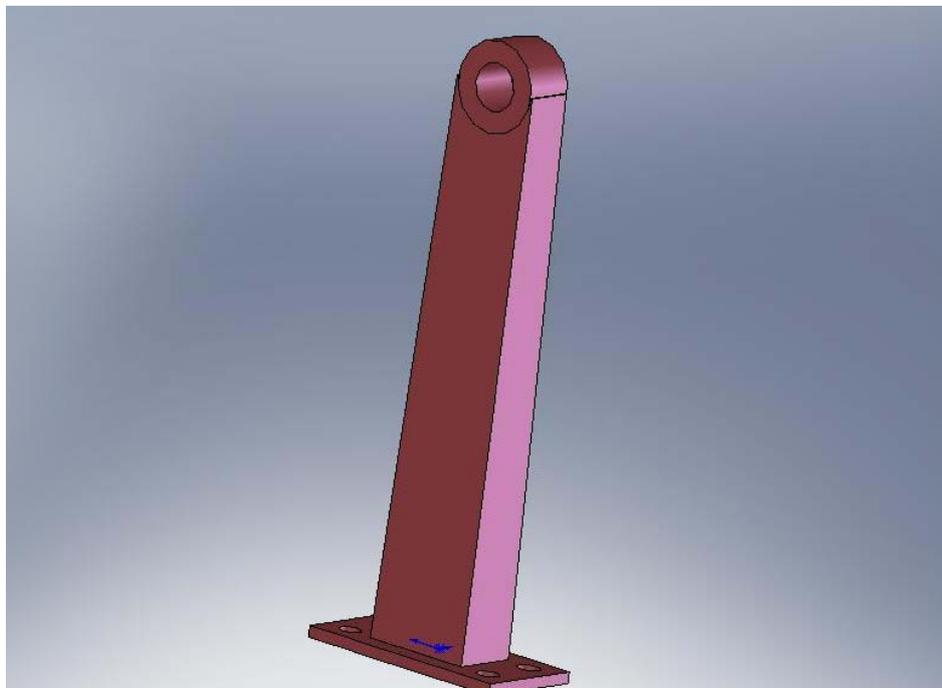


Figure V.6 : le supporte

V.5.La partie corrosion

En général, le milieu agressif est composé essentiellement d'une solution chimique concentrée de telle sorte qu'elle attaque le matériau et cause la dégradation de matière. La solution utilisée est l'eau de mer aérée à une température ambiante avec un pH 8.13.

Puisque il y aura un échange de matière est de concentration avec le matériau, une homogénéisation de la solution est obligatoire.

La cellule de corrosion contient une électrode de référence et une contre-électrode pour permettre la mesure du courant ainsi du potentiel.

Pour assurer le bon fonctionnement du système, les appuis de l'éprouvette doivent être fabriqués avec une matière non corrosive, (le téflon ou le plexiglas).

V.5.1.L'enceinte du bain corrosif

Elle est fabriquée en plexiglas transparent de dimensions 250x200x150 mm (figure V.7, V8).

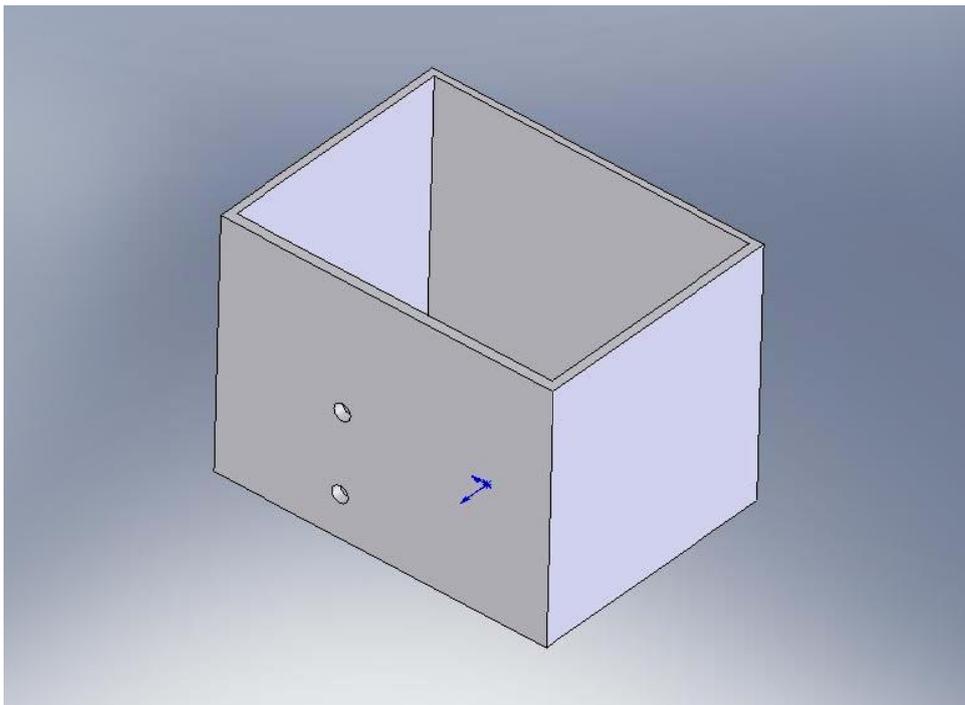


Figure V.7 : l'enceinte

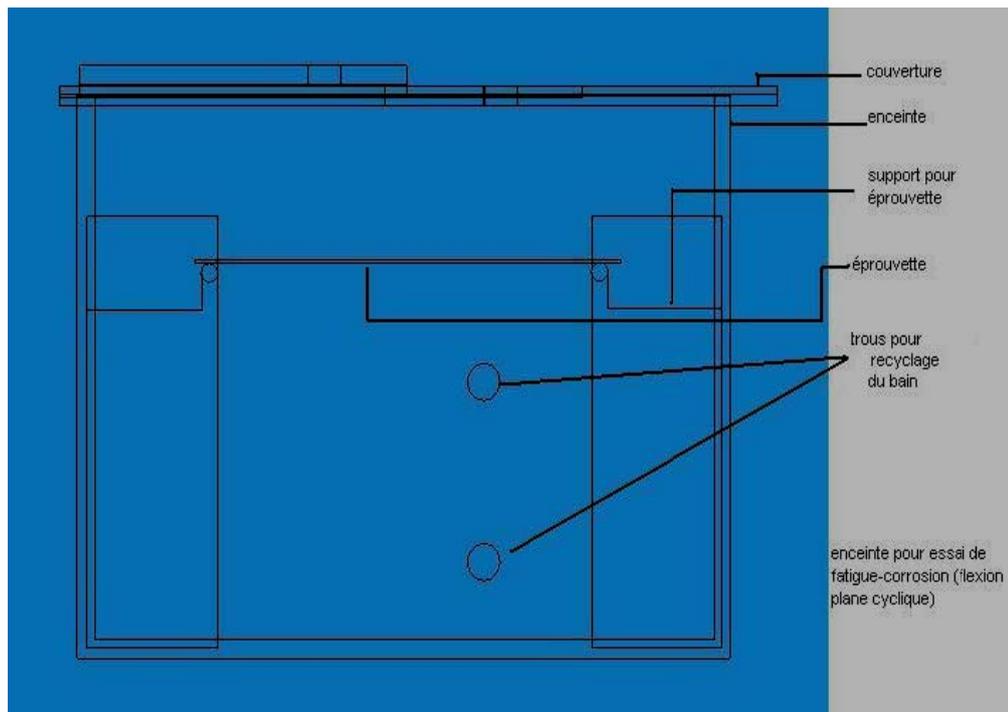


Figure V.8 : enceinte pour essai de fatigue-corrosion

V.6. Plateforme

La machine d'essai repose sur une plateforme en acier de dimensions suivantes (figure V.9)

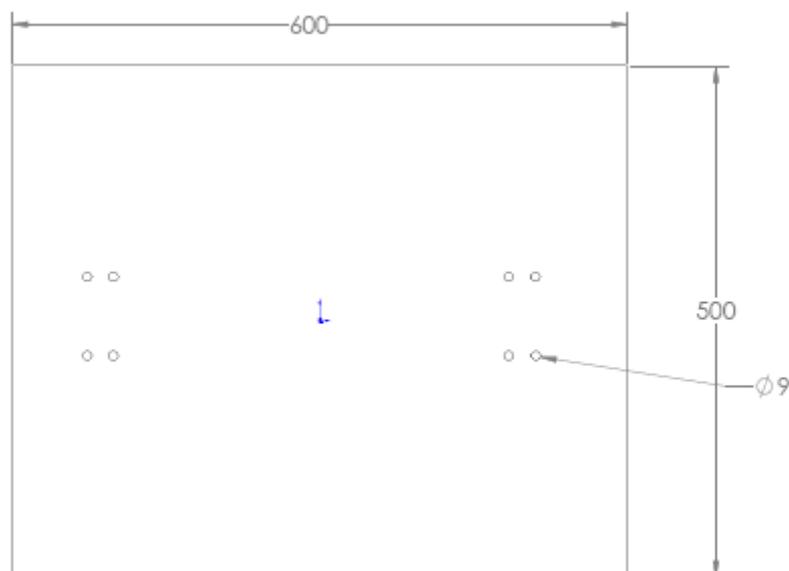


Figure V.9 : Plateforme

V. 7.Appareillage

Un **micro-ordinateur** muni d'un logiciel PotentioStat pour l'acquisition et le traitement des données.

Un **capteur de force** de marque FUTEK (Figure 10), pouvant capter des forces allant jusqu'à 8996 N ce capteur est placé entre la came et la tige poussoir.



Figure V.10 : capteur de force

Un **variateur de vitesse** de marque HITACHI modèle X200, qui est relié au moteur pour permettre de varier sa vitesse (figure 11).



Figure V.11 : variateur de vitesse

Un **potentiostat** de marque EG & G PRINCETON modèle 362. (Figure 12)

Le montage électrochimique utilisé est un montage à trois électrodes comprenant l'électrode de référence, la contre électrode et l'électrode de travail.

L'électrode de référence ECS est une électrode au calomel saturée dont le potentiel est de +241 mV par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH).

L'électrode auxiliaire (la contre électrode) en graphite.



Figure V.12 : potentiostat

Une carte d'acquisition et de pilotage munie d'une carte mémoire de 1GB. (Figure 13)

Le capteur de force, le variateur de vitesse et le potentiostat sont reliés à la carte d'acquisition elle-même reliée à un ordinateur.

Le potentiostat et le variateur de vitesse sont pilotés par ordinateur grâce au logiciel **PotentialStat**.



Figure V.13 : carte d'acquisition

Un microscope optique type OLYMPUS à différents grossissements, allant de 50 à 1000, équipé d'une camera numérique qui sert à prendre des photos vues au microscope optique, et liée au micro-ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition des photos ATLAS avec lequel on peut transférer les images à l'écran du micro-ordinateur (figure 14). Le grossissement utilisé pour nos échantillons est de 100.



Figure V.14 : microscope optique

V.8.Paramètres d'essai

V.8.1.Données mécanique

Les essais réalisés sont de flexion plane, avec déplacement imposé $Y_{\max} = 3\text{mm}$. Ce déplacement nous donne une charge appliquée d'une valeur de 7.8 N. La contrainte appliquée est calculée par la formule (IV.1), elle donne valeur de 19.5 MPa largement inférieur à la limite élastique du matériau. Une fréquence de cycle est égale à 1 cycle/s, ceci est obtenu par une vitesse de rotation de l'arbre de 120 tr/min, par une fréquence du moteur égal à 21.1Hertz, ce qui donne une vitesse de rotation du moteur égale à 561tr/min.

V.8.2.Données électrochimiques

-Une solution d'eau de mer qui a les caractéristiques suivantes :

Tableau V.1 : La composition chimique de l'eau de mer

composants	NaCl	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl	NaHCO ₃	KBr	H ₃ BO ₃	SrCl ₂	NaF
Concentration (g/l)	24.53	5.20	4.09	1.16	0.69	0.201	0.101	0.027	0.025	0.003

-pH est égal à 8.13.

-Homogénéisation du bain corrosif.

-Solution aérée.



Chapitre VI

Résultats et discussion

VI.1.Introduction

Après avoir mis au point notre dispositif, nous avons procédé à des essais de fatigue-corrosion sur des éprouvettes entaillées en alliage d'aluminium. Le suivi de l'évolution de la dégradation du matériau s'est fait à travers l'observation du faciès de rupture et la mesure de l'ouverture de la fissure.

Les essais de fatigue-corrosion ont deux objectifs principaux :

- ✓ Etudier l'influence du nombre de cycles sur la propagation de la fissure.
- ✓ Comparer le comportement en fatigue de l'échantillon en milieu marin et à l'air.

VI.2.Essais de fatigue-corrosion

Dans ce genre d'essais l'effet combiné de la fatigue et d'un environnement agressif agissant simultanément, ce qui conduit à une dégradation du comportement en fatigue. La fatigue-corrosion dépend à la fois de paramètres mécaniques et électrochimiques.

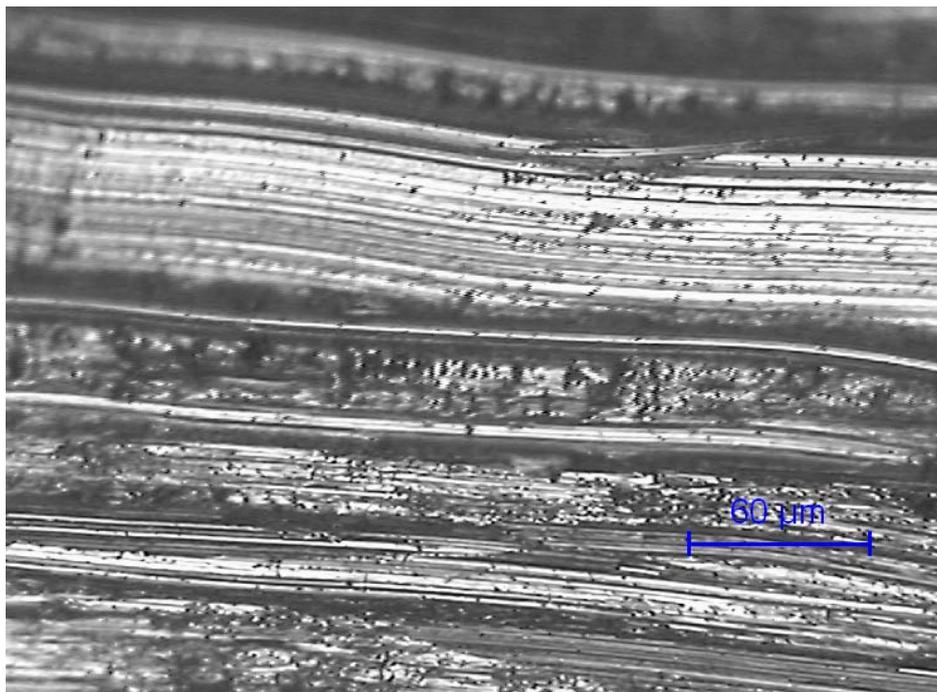


Figure VI.1 : micrographie optique sans polissage de l'éprouvette avant l'essai.

VI.2.1.Evolution de l'ouverture des fissures en fonction du nombre de cycles lors d'un essai de fatigue-corrosion

Sur la figure VI.2 sont présentées les morphologies du faciès de rupture de l'éprouvette en alliage d'aluminium, respectivement après 43200 cycles, 49500 cycles, 56700 cycles, 63900 cycles, 71100 cycles et 78300 cycles, de sollicitation dans l'eau de mer.

Les valeurs de l'ouverture des fissures en fonction du nombre de cycles sont représentées sur le tableau VI.1 et elles sont rassemblées sous forme graphique sur la figure VI.3.

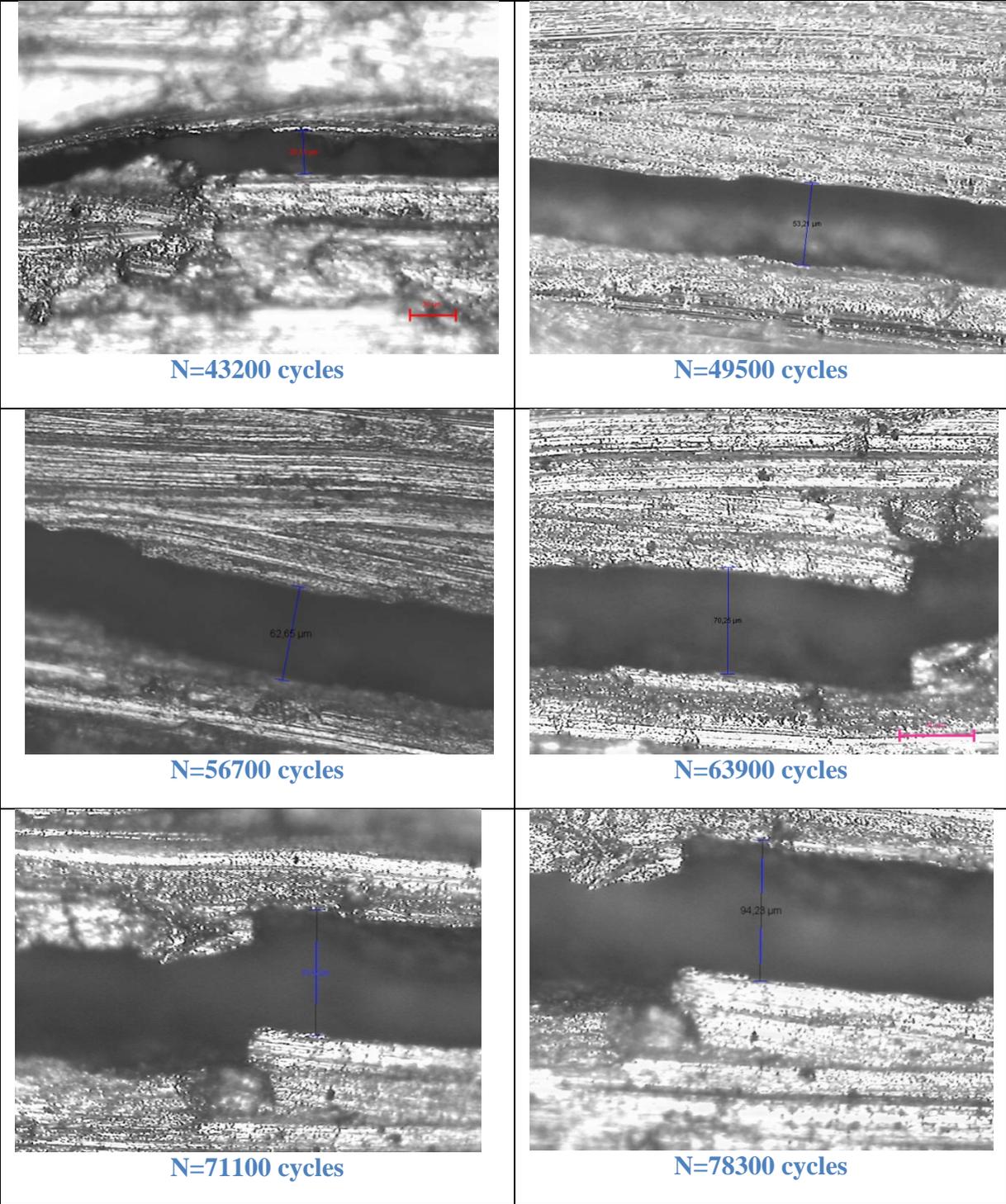
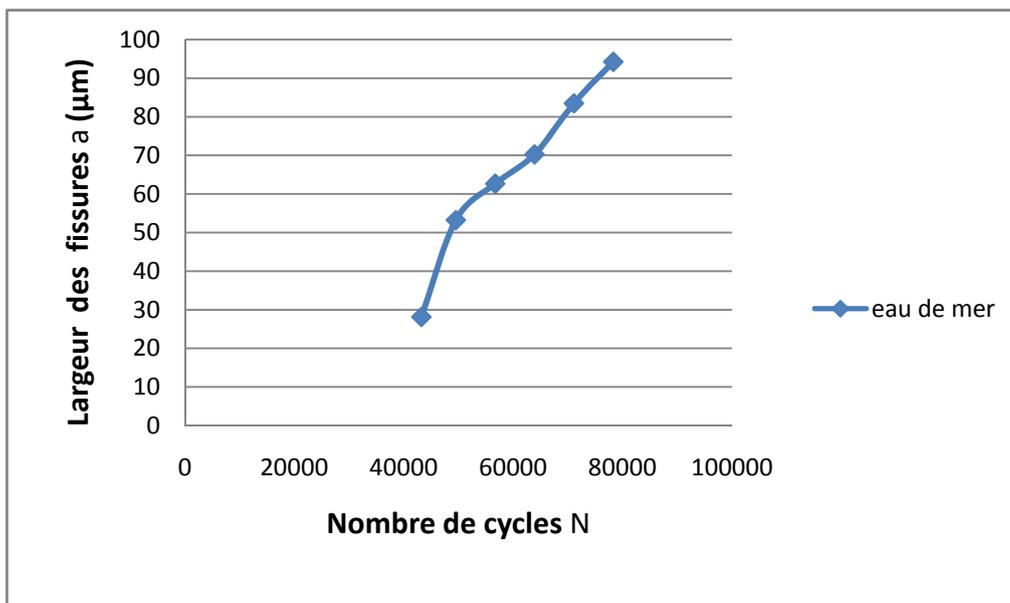


Figure VI.2 : micrographie optique mettant en évidence l'évolution des facies de rupture en fonction du nombre de cycle (N) lors d'un essai de fatigue-corrosion

Tableau VI.1 : les valeurs de la largeur des fissures correspondant aux nombre de cycles

Largeur des fissures a (μm)	28,13	53,21	62,65	70,25	83,47	94,23
Nombre de cycles N	43200	49500	56700	63900	71100	78300

**Figure VI.3** : graphe représente l'évolution de la largeur des fissures (a) en fonction du nombre de cycles N lors d'un essai de fatigue-corrosion

Nous pouvons observer :

- Un accroissement constant de l'ouverture de la fissure
- Un phénomène de décrochement entre grains de l'alliage d'aluminium, qui semble suivre les joints de grains.

Ceci peut s'expliquer par le fait que les endommagements de fatigue sont concentrés aux entailles, là où il y a une concentration de contraintes élevée. Le faciès de rupture se présente sous forme de décrochements entre grains, qui sont le signe d'une corrosion feuilletante. Celle-ci est due à la microstructure typique de tels alliages d'aluminium. Ainsi, la fissure se manifeste à travers la décohésion entre grains, qui est aggravée par la sollicitation mécanique.

Le taux de progression dépend fortement de la microstructure locale, de l'environnement et de la sollicitation.

VI.2.2. Vitesse de propagation des fissures lors d'un essai de fatigue-corrosion

On peut, à partir des enregistrements de la largeur des fissures a en fonction du nombre de cycles N , tracer la vitesse de fissuration da/dN en fonction du facteur d'intensité des contraintes K .

En substituant les valeurs de a dans l'équation de Newman et Raju (chapitre I) pour le calcul du facteur d'intensité des contraintes on aura :

Tableau VI.2 : Les valeurs de la vitesse de propagation (da/dN) en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes (ΔK) lors d'un essai de fatigue-corrosion.

Nombre de cycles N	43200	49500	56700	63900	71100	78300
$\Delta a/\Delta N$ (mm/cycle)	$6,51.10^{-7}$	$3,98.10^{-6}$	$1,31.10^{-6}$	$1,055.10^{-6}$	$1,83.10^{-6}$	$1,49.10^{-6}$
ΔK (MPa.m ^{1/2})	$133,57.10^{-3}$	$183,69.10^{-3}$	$199,29.10^{-3}$	$210,99.10^{-3}$	$230,1.10^{-3}$	$244,53.10^{-3}$

Les valeurs du tableau VI.2 sont rassemblées sous forme graphique sur la figure VI.4

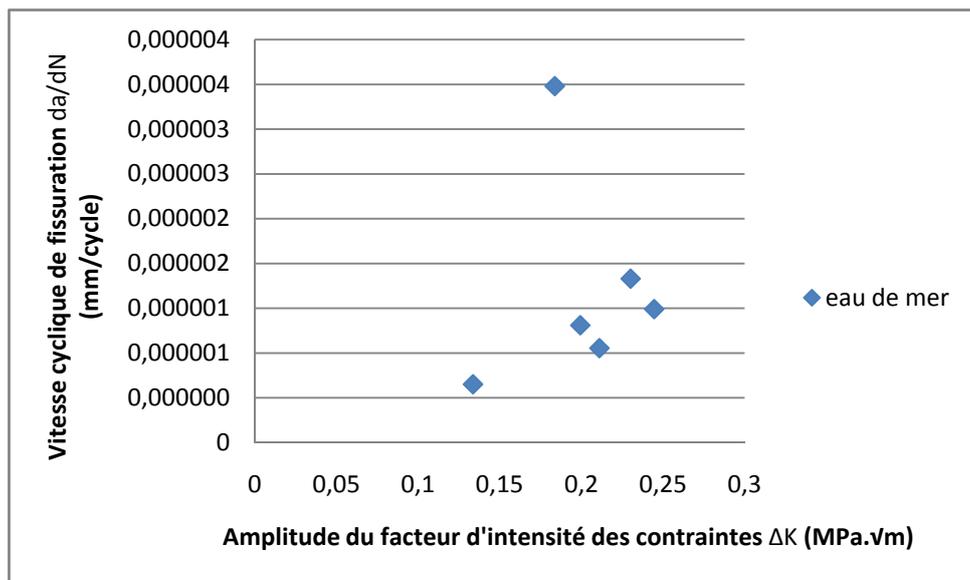


Figure VI.4 : Evolution de la vitesse de propagation (da/dN) en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes (ΔK) ; essai dans l'eau de mer.

Quand l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes ΔK croît, on constate l'augmentation de la vitesse de propagation, d'une façon générale. Un point singulier est toutefois observé, à 49500 cycles, et peut s'expliquer par un comportement microstructural particulier de l'alliage d'aluminium.

La variation de la vitesse de propagation peut être liée à la cohésion des grains. Lorsque l'énergie locale du joint de grain est supérieure à celle du front de fissure, celle-ci peut se traduire par un décrochement entre grains, tel que les morphologies observées l'indiquent.

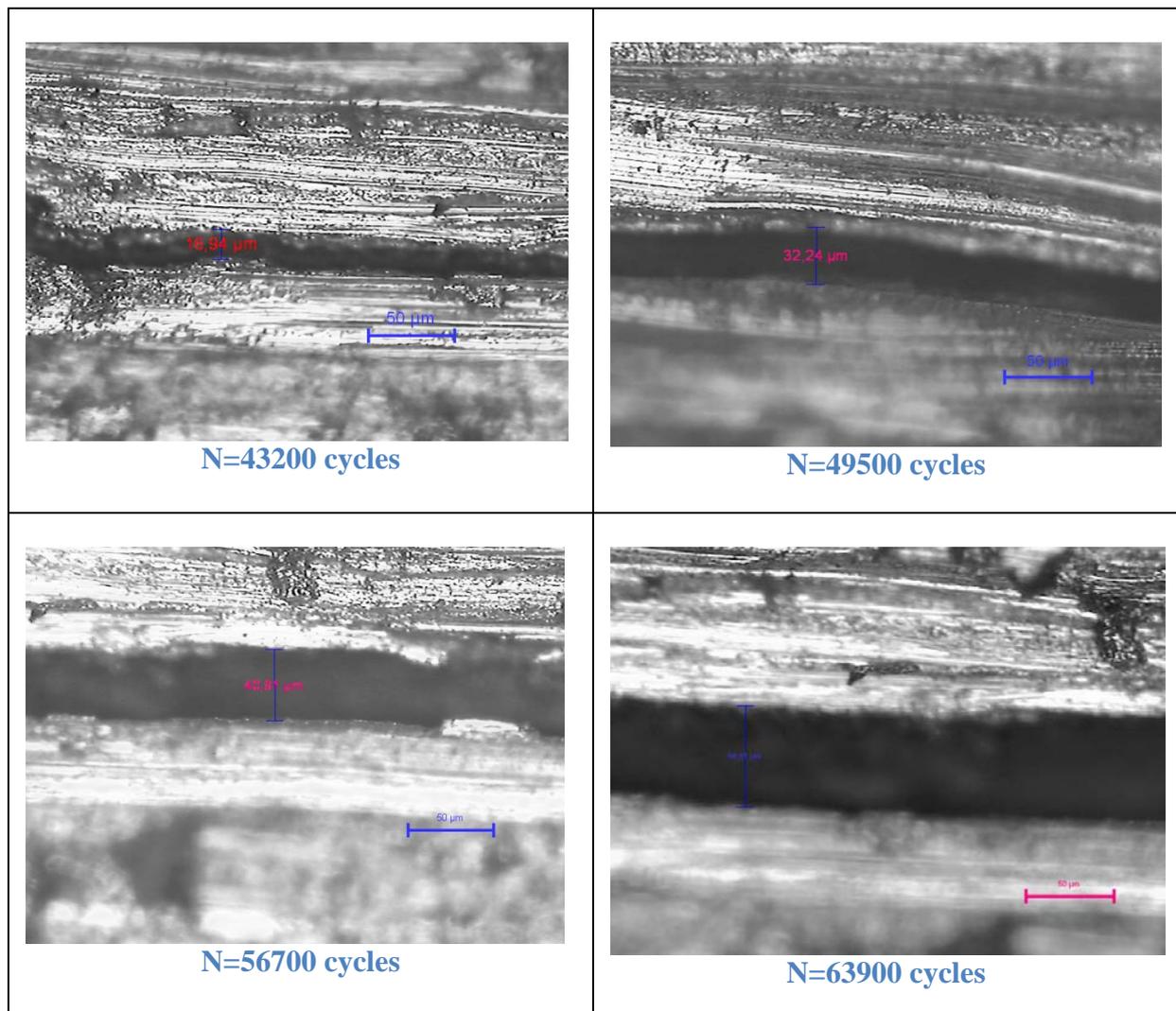
VI.3.Essai de fatigue à l'air

La fatigue est définie comme étant la dégradation ou la rupture d'un matériau provoqué par chargement cyclique.

VI.3.1.Evolution de l'ouverture des fissures en fonction du nombre de cycles lors d'un essai de fatigue à l'air

Sur la figure VI.5 sont présentées les morphologies du faciès de rupture de l'éprouvette en alliage d'aluminium, respectivement après 43200 cycles, 49500 cycles, 56700 cycles, 63900 cycles, 71100 cycles et 78300 cycles, de sollicitation à l'air.

Les valeurs de l'ouverture des fissures en fonction du nombre de cycles sont représentées sur le tableau VI.3 et elles sont rassemblées sous forme graphique sur la figure VI.6.



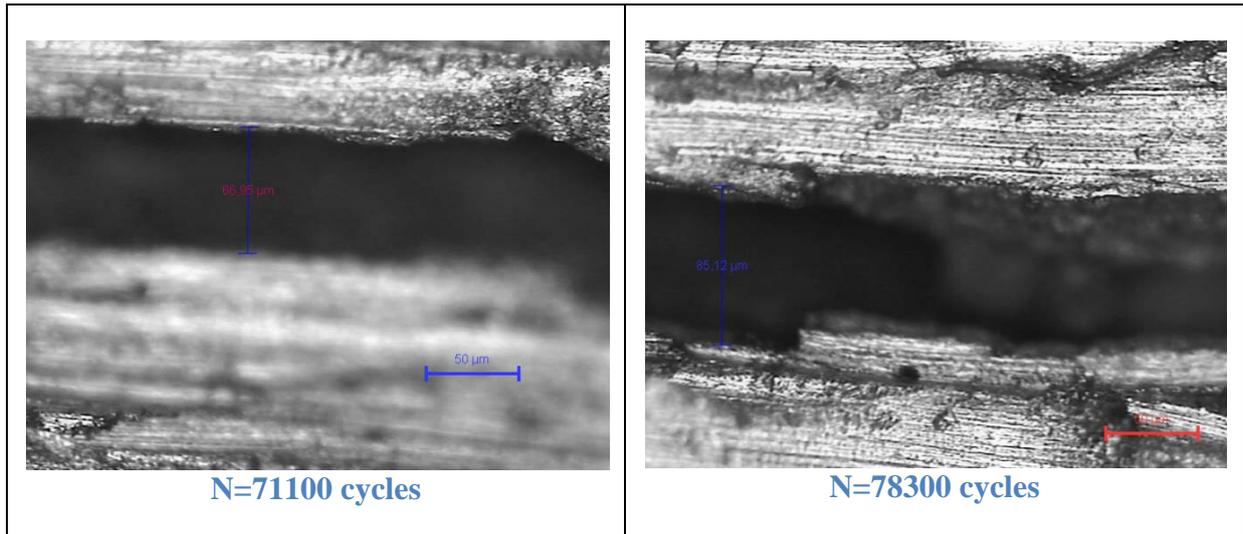


Figure VI.5 : micrographie optique mettant en évidence l'évolution des faciès de ruptures en fonction du nombre de cycle (N) lors d'un essai de fatigue à l'air.

Tableau VI.3 : les valeurs de la largeur des fissures correspondant aux nombre de cycles.

Largeur des fissures a (μm)	16,94	32,24	40,91	56,61	66,95	85,12	92,15
Nombre de cycles N	43200	49500	56700	63900	71100	78300	85500

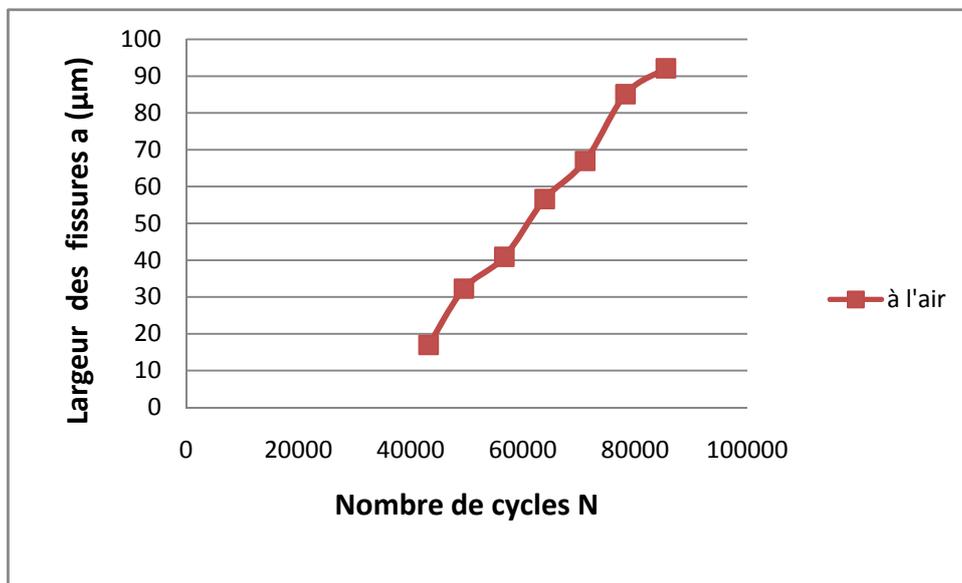


Figure VI.6 : graphe représente l'évolution de la largeur des fissures (a) en fonction du nombre de cycles N lors d'un essai de fatigue à l'air.

Nous pouvons observer un accroissement constant de l'ouverture de la fissure.

Cependant l'évolution de cette augmentation est moins importante que celle qui a été constatée lors de l'essai de fatigue-corrosion. (Figure VI.7)

Il est à noter que le phénomène de décrochement n'est pratiquement pas présent, ce qui confirme le rôle de la microstructure, vis-à-vis de la corrosion.

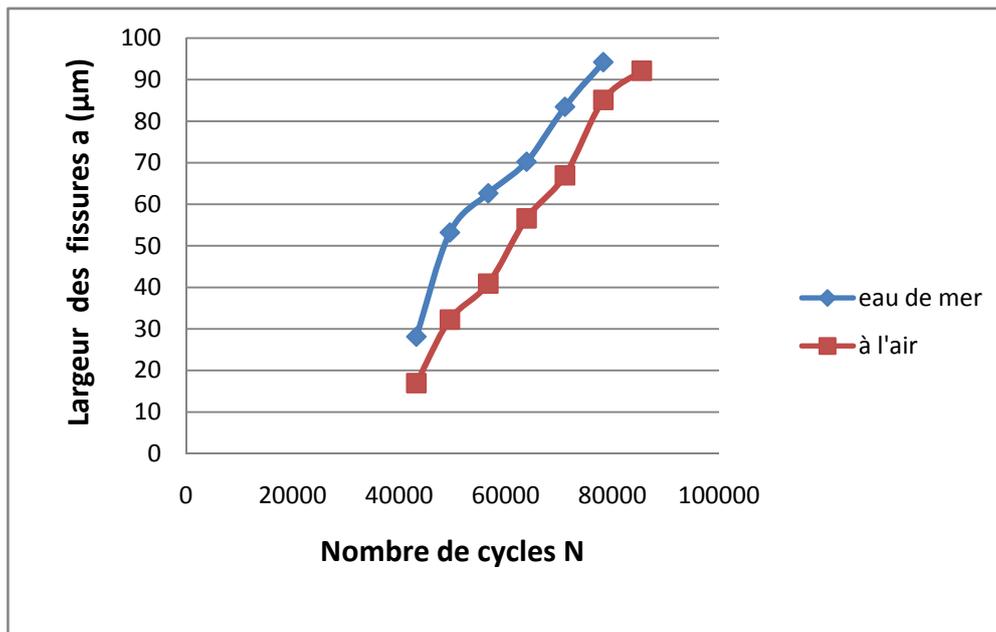


Figure VI.7 : graphe représente l'évolution de la largeur des fissures (a) en fonction du nombre de cycles N pour l'essai de fatigue à l'air et l'essai de fatigue-corrosion.

VI.3.1. Vitesse de propagation des fissures lors d'un essai de fatigue à l'air

En substituant les valeurs de a dans l'équation de Newman et Raju (chapitre I) pour le calcul du facteur d'intensité des contraintes on aura :

Tableau VI.4 : Les valeurs de la vitesse de propagation (da/dN) en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes (ΔK) lors d'un essai de fatigue à l'air.

Nombre de cycles N	43200	49500	56700	63900	71100	78300
$\Delta a/\Delta N$ (mm/cycle)	$3,92 \cdot 10^{-7}$	$2,42 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,18 \cdot 10^{-6}$	$1,43 \cdot 10^{-6}$	$2,52 \cdot 10^{-6}$
ΔK (MPa.m ^{1/2})	$103,62 \cdot 10^{-3}$	$142,96 \cdot 10^{-3}$	$161,04 \cdot 10^{-3}$	$189,44 \cdot 10^{-3}$	$206,06 \cdot 10^{-3}$	$232,29 \cdot 10^{-3}$

Les valeurs du tableau VI.4 sont rassemblées sous forme graphique sur la figure VI.8

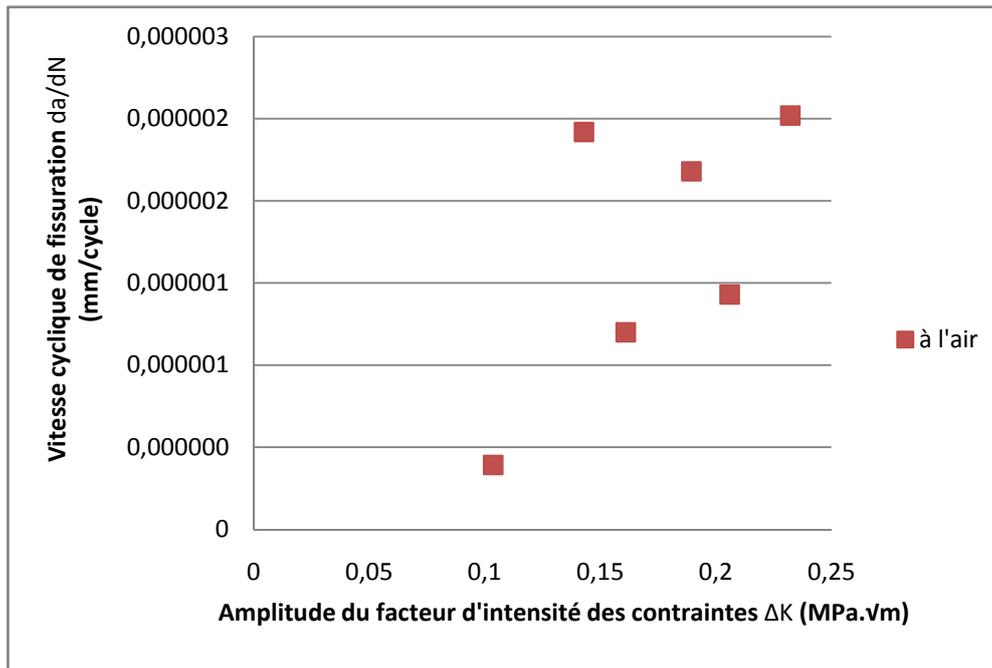


Figure VI.8 : graphe représente l'évolution de la vitesse de propagation (da/dN) en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes (ΔK) lors d'un essai de fatigue à l'air.

Quand l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes ΔK croît, on constate l'augmentation de la vitesse de propagation, d'une façon générale. Un point singulier est toutefois observé, et peut s'expliquer par un comportement microstructural particulier de l'alliage d'aluminium.

L'explication de cette variation de la vitesse est la même qui a été faite pour la figure VI.4. Pour le reste, la cinétique de propagation de la fissure est nettement ralentie à l'air (Figure VI.9), ce qui permet de conclure à une durée de vie moins importante dès que le matériau est exposé au milieu marin.

Cette différence est due à l'effet du milieu corrosif, car dans tous les cas, l'amorçage de la fissure fait appel soit à l'existence d'un défaut de surface, soit à un processus de glissement de plans atomiques aux endroits où les contraintes sont les plus fortes, mais le milieu corrosif permet la poursuite du mécanisme de déformation en éliminant les barrières.

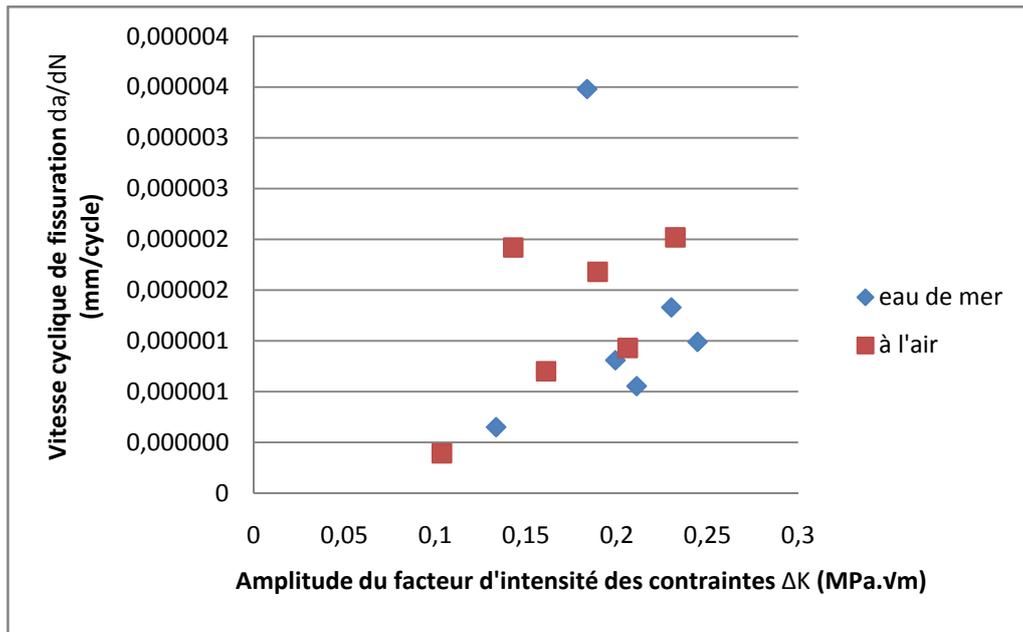


Figure VI.9 : graphe représente l'évolution de la vitesse de propagation (da/dN) en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes (ΔK) pour l'essai de fatigue à l'air et l'essai de fatigue-corrosion.

VI.4.Rupture

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

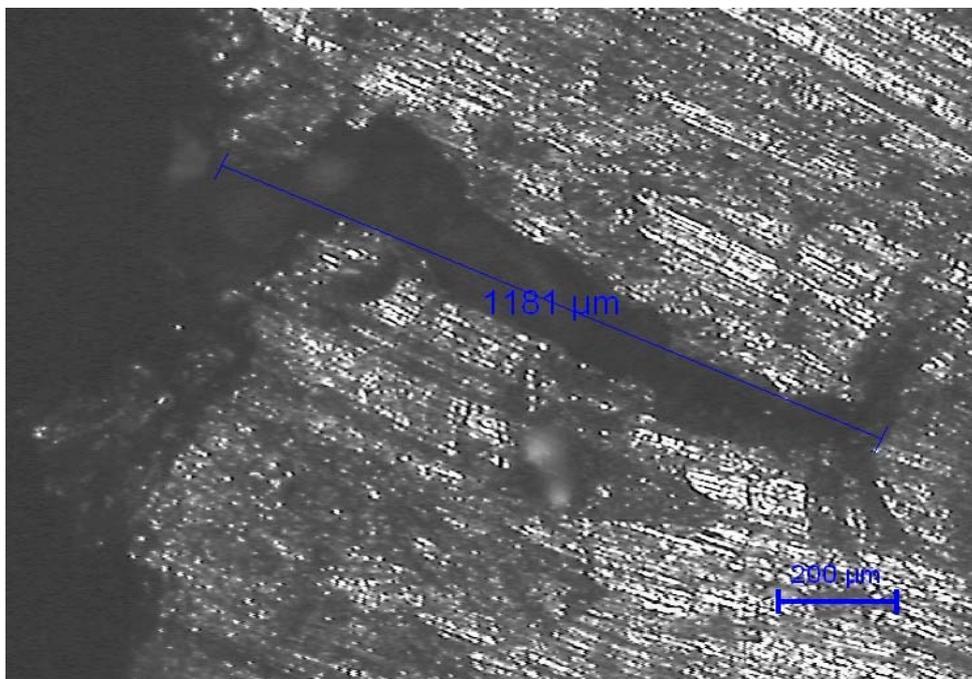


Figure VI.10 : micrographie optique mettant en évidence la propagation des fissures en profondeur.

Cette propagation en profondeur se traduit par l'ouverture de plus en plus grande des fissures principales du réseau.

Dans nos essais, on n'a pas pu aller jusqu'à la rupture, la limite de l'essai étant liée à la déformation plastique globale qui a touché les deux lèvres de l'éprouvette plate. Ce phénomène confirme la présence d'une déformation hétérogène du matériau qui ne présente pas d'isotropie suite à la mise en œuvre par laminage. La microstructure présente une nette différence entre le sens longitudinal et transversal.



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la mise au point d'un dispositif de fatigue-corrosion par flexion plane.

Après une première étape de conception du dispositif expérimental, nous avons procédé à des tests pratiques, afin de contrôler le bon fonctionnement du système mis en oeuvre.

Des tests ont été réalisés sur des éprouvettes entaillées en alliage d'aluminium, à l'air puis en utilisant l'eau de mer.

Les conclusions que nous pouvons tirer de cette étude sont :

- La conception est la base de toutes les réalisations industrielles, car c'est le chemin le plus efficace pour avoir un produit de précision en un moindre temps.
- L'endommagement de la structure se caractérise par l'amorçage au fond de l'entaille puis la propagation de la fissure. Celle-ci est de type inter-granulaire.
- La présence d'un milieu corrosif accélère l'amorçage des fissures et augmente leur vitesse de propagation.

Ce travail peut être poursuivi afin de se rapprocher des conditions industrielles et pour affiner les résultats pour permettre une meilleure interprétation des phénomènes.

Nous recommandons la poursuite des travaux suivants :

- ✓ Etudier les effets de la microstructure du matériau sur la fatigue-corrosion.
- ✓ Faire une caractérisation plus fine de la fissuration inter-granulaire, par exemple déterminer la densité et la profondeur des microfissures au cours de l'essai.
- ✓ Effectuer des essais sur d'autres matériaux, afin de parfaire la mise au point du dispositif que nous avons réalisé.

Bibliographie

- [1] : J. Flavenot, P.Merrien, J.Lu, H.P Lieurade, *Données technologiques sur la fatigue*, CETIM informations 139,2000.
- [2] : A.Brand « *Fatigue des alliages ferreux* » *Technique de l'ingénieur*, B5050.
- [3] : M.E.Djehlal, *contribution à l'étude du comportement en fatigue et en choc thermique d'une fonte à graphite sphéroïdale en fonction de la structure de la matrice et des éléments d'alliages*, Thèse de magister, USTHB, 1990.
- [4] : S.Bugat. *Thèse de Doctorat: Comportement et endommagement des aciers austéno-ferritiques vieillis : une approche micromécanique*. L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, décembre 2000.
- [5] : R.Cazaud *la fatigue des métaux DUNOB Paris 1969*.
- [6] : C.Bathias J.P.Bailon « *La fatigue des matériaux et des structures* » Maloine paris, 1980.
- [7] : J.P Bailon, J.M Dorlot, *presse internationale polytechnique 2001*.
- [8] : A. Brand, J.F. Flavenot, R. Grégoire, C.Tournier « *Données technologiques sur la fatigue* » CETIM, Paris, 1992.
- [9] : D.LAVEISSIERE. *Thèse de Doctorat, Modélisation de la remontée de fissure en fatigue dans les structures routières par endommagement et microfissuration de l'expérimentation à l'outil de dimensionnement pour l'estimation de la durée de vie*. L'Université de Limoges Faculté des Sciences, Ecole Doctorale STS, 2002.
- [10] : K.LAZAZI *étude de comportement en fatigue thermique d'une soudure en acier inoxydable austénitique de nuance AISI 304*, Thèse de magister Enp 2008.
- [11] : A. BATAILLE, T. MAGNINE. *Surface damage accumulation in low-cycle fatigue: physical analysis and numerical modelling*, Université de Lille 1, 1993.
- [12] : A.EL MALKI ALAOUI, *Influence du chargement sur la propagation en fatigue de fissures courtes dans un acier de construction navale*, Thèse de Doctorat, METZ, février 2005.
- [13] : S.Pommier, *propagation de fissures de fatigue sous chargement aléatoire*, LMT-Cachan/ENS-Cachan/université de Paris VI/CNPS UMR8535.
- [14] : J.BENARD, A.MICHEL, J.PHILIBERT et J.TALBOT *métallurgie générale Edition MASSON 1984*.
- [15] : B.MILLION, B.LEFEBVRE ; *Etude de la rupture par fatigue*, lien internet <http://perso.crans.org/lefebvre/tp/fatigue.pdf>.

- [16] : S.Mokrane Conception d'un système de fixation pour la machine de flexion rotative Application avec Solidworks Thèse de magister Enp 2007.
- [17] : P. LACOMBE, B. BAROUX, G. BERANGER « Les aciers inoxydables » les éditions de physique, 1990.
- [18] : H.H. Uhlig; *Corrosion et Protection*, Edition DUNOD 1970.
- [19] : D. LANDOLT ; *Corrosion et chimie de surface des métaux, traité des matériaux* 1ère édition, Paris 1993.
- [20] : H. H, Girault ; *Electrochimie physique et analytique*. Edition PPUR 2004.
- [21] : J-C.CATONNÉ ; *Grandeurs caractéristiques d'électrochimie appliquée (technique de l'ingénieur)* 2005.
- [22] : G. Béranger, G. Henry, G. Sauz ; *Le livre de l'acier*. 1ère édition 1975.
- [23] : MEKKI DAOUADJII. *Les Techniques de Mesure de la Vitesse de Corrosion*. Séminaire Mars, IAP. 2002.
- [24] : M.BOUNOUGHAZ ; *Etude de la protection des fonds de bacs pétroliers contre la corrosion par des anodes en zinc*. Thèse Présentée au Département de Métallurgie pour l'obtention du grade de Docteur d'Etat. Ecole national polytechnique d'Alger. 28 Novembre 2006.
- [25] : D.DEVILLIERS et M.CHEMLA ; *Cinétique électrochimique dans les systèmes inorganiques (cor930 technique de l'ingénieur)* 2005.
- [26] : J. BESSON ; *Précis thermodynamique et cinétique électrochimique*, édition Masson, 1972.
- [27] : DJ.DJEZIRI ; *Comportement électrochimique d'un dépôt en acier inoxydable réalisé par projection thermique*. Mémoire de magister à l'ENP le 15 novembre 2007.
- [28] : D.Landolt, *corrosion et chimie de surface des métaux*, édition Dunod 1994
- [29] : C. GABRIELLI ; *Méthodes électrochimiques (mesure d'impédance) (Technique d'ingénieur P2210)*.
- [30] : B. NORMAND, N. PEBERE ; *Prévention et lutte contre la corrosion*. Ed Dunod 1993.
- [31] : L.JAUBERT; *Etude de la corrosion uniforme d'acier non alliés et inoxydables*. Thèse pour obtenir le grade de docteur. I.N.S.A de Lyon 24 Septembre 2004.
- [32] : *Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques M135*.
- [33] : G.Beranger H.Mazille *corrosion des métaux et alliages LAVOISIER* 2002.
- [34] : BARRALIS MEADER, *précis de métallurgies 5^{eme} édition*, afnor, Nathan 1990.

[35] : *CHRISTIAN VARGEL, le comportement de l'aluminium et ses alliages, Dunod, Paris 1979.*