

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département de Génie Mécanique



Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme
de Master en Génie Mécanique

Thème :

**FATIGUE SOUS CORROSION EN FLEXION
ROTATIVE EN PRESENCE DE DOUBLE
ENTAILLE : RESUME ET COMPARAISON**

Réalisé par:

Utilisateur

Promoteurs :

Mr. Y. BELKACEMI
Mr. B. GUERGUEB

Octobre 2012

Dédicaces

Je dédie ce travail :

- A mon père, qui a toujours été à mes côtés, et qui a donné beaucoup pour le bien de mes études.
- A ma mère, qui a toujours veillé sur moi, avec un grand amour, et encouragement.
- A mes frères : Mouloud, Mohammed, Mourad, Toufik, Amine et Hacene ; et à mes sœurs : Karima, Roukia et Salima.
- A mon meilleur ami : Mohammed Mustapha ALI OU SALAH, qui a toujours cru en moi, qui m'a aidé et m'a encouragé dans les moments difficiles.
- A Mes amis : Athman TALABOUZROU, Brahim BENAMIRA, Hamza ZIROUR, Imad ZERGUINI, Khalil GUERIOUNE, Massinissa SAHRAOUI, Nabil LITIM, Nacer MOUNIR, Nassim BENRABIA, Sami BENNARI, ... et à tous mes autres amis non cité ici.
- A toute personne qui compte pour moi, ou que je compte pour lui.

Remerciements

- Je tiens à remercier mes promoteurs, Monsieur Y. BELKACEMI et Monsieur B. GUERGUEB, pour leurs encadrements, suivis, conseils et aides.
- Mes remerciements vont aussi vers tous les enseignants de l'École Nationale Polytechnique, et spécialement les enseignants du département des Sciences Fondamentales, et du département de Génie Mécanique.
- Je remercie aussi, toute personne ayant contribué, de proche ou de loin, à réaliser ce travail.

ملخص

في هذا العمل، قمنا بدراسة موجزة عن ظاهرة التعب تحت تأثير التآكل، على عينات من الفولاذ، تحمل اثنين من التخفيضات المتوازية. المسافة بين التخفيضات تتغير. تمت مقارنة النتائج مع اختبارات التعب في الهواء المحيط. تمت مقارنة نتائج اختبارات التعب في الهواء المحيط مع أعمال أخرى.

الكلمات المفتاحية :

تعب، تآكل، عينة، انخفاض، دوران انحنائي.

Résumé

Dans ce travail, le phénomène de fatigue sous corrosion est étudié sur des éprouvettes en acier **XC48**, présentant deux entailles parallèles. La distance entre entailles varie. Les résultats ont été comparés avec des essais de fatigue à l'air ambiant. Les résultats de l'air ambiant ont été comparés avec d'autres travaux en variant le rayon et l'angle en fond d'entaille.

Mots clés :

Fatigue, corrosion, éprouvette, entaille, flexion rotative.

Abstract

The aim of this scientific work study, is the study of stress corrosion fatigue rotating bending phenomenon on steel **XC48** specimens carrying two parallel notches. The distance between notches is taken into account. The results were compared with fatigue tests in the ambient air. The results of the ambient air were compared with other works by varying the radius and notch root angle.

Keywords :

Fatigue, corrosion, notch, rotating bending.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la fatigue	2
I.1. Définition de la fatigue.....	3
I.2. Types de chargement	3
I.3. Courbe de fatigue.....	4
I.4. Mécanisme de la fatigue des métaux	5
I.5. Classification des sollicitations des essais de fatigue.....	5
I.6. Effet d'entaille	5
Chapitre II :Fatigue sous corrosion	7
II.1. Définition de la corrosion.....	8
II.2. Définition de la fatigue sous corrosion	8
II.3. Fatigue sous corrosion dans les environnements liquides	8
Chapitre III :Exploitation et comparaison des résultats	10
III.1. Introduction.....	11
III.2. Les éprouvettes d'essais.....	11
III.3. La machine d'essai de flexion rotative	11
III.4. Les résultats des essais.....	12
III.5. Exploitation et comparaison des résultats.....	14
Conclusion générale	16
Bibliographie	17

Liste des figures

Figure I.1. Courbes de charge typiques à amplitude constante	3
Figure I.2. Courbe complète de la fatigue ou courbe de Wohler	4
Figure I.3. Types de contraintes lors d'un essai de fatigue.....	5
Figure II.2. Effet de l'eau salée sur des courbes S-N . Gough et Soit	9
Figure III.1. Forme et dimensions des éprouvettes	11
Figure III.2. Forme et dimensions des entailles	11
Figure III.3. Variation du nombre de cycles jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les deux entailles X (essais à l'air ambiant).....	13
Figure III.4. Variation du nombre de cycles jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les deux entailles X (sous corrosion)	14
Figure III.5. Variation du nombre de cycles jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les deux entailles X (essais à l'air ambiant).....	15

Liste des photos

Photo III.1. Machine d'essai de flexion rotative	12
---	----

Liste des tableaux

Tableau III.1. Nombre de cycles jusqu'à la rupture des éprouvettes (air ambiant).....	12
Tableau III.2. Nombre de cycles jusqu'à la rupture des éprouvettes (avec corrosion).....	13
Tableau III.3. Nombre de cycles jusqu'à la rupture (air ambiant, résultats de <i>DERARDJA</i>) ...	14

Introduction générale

Toute sorte de pièce a une durée de vie limitée. Cette durée de vie dépend de plusieurs paramètres ; telle que la forme de la pièce, l'environnement et les caractéristiques mécaniques. Ces pièces sont soumises à des différents types de chargement. Sous l'effet de ces chargements, se produit un phénomène générant l'endommagement de ces pièces appelé *fatigue*.

Vue l'utilisation importante de l'acier dans l'industrie, nos essais ont été faits sur des éprouvettes en **XC48**.

De nombreux travaux ont été faits par des ingénieurs, des chercheurs et des scientifiques sur la fatigue. On peut citer les travaux de **Wöhler**. Les travaux **Peterson, Neuber, Heywood** sont essentiellement consacrés au phénomène d'entailles.

Le but de cette étude est de réaliser un travail expérimental en fatigue sous corrosion sur des éprouvettes présentant une double entaille. Les effets de la distance entre entaille, l'environnement sont pris en compte. Une étude comparative sur l'effet du rayon et de l'angle en fons d'entaille est aussi présentée.

Chapitre I :

Généralités sur la fatigue

I.1. Définition de la fatigue

La fatigue est une forme d'endommagement qui survient dans les structures soumises à chargements cycliques. Dans ce cas, 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 [10].

Les catégories de la fatigue sont les suivantes :

- **Fatigue des structures fissurées** : Les fissures préexistent ; propagation contrôlée de la rupture,
- **Fatigue des composants non-fissurées** : Fissure ne préexiste pas ; rupture déclenchement-contrôlée [2].

I.2. Types de chargement

Habituellement, on utilise des formes de charges simples, par exemple les courbes de charge sinusoïdales et triangulaires représentées sur la figure I.1. Ces courbes peuvent être caractérisées par la contrainte minimale σ_{min} , la contrainte maximale σ_{max} et la contrainte moyenne σ_m : [8]

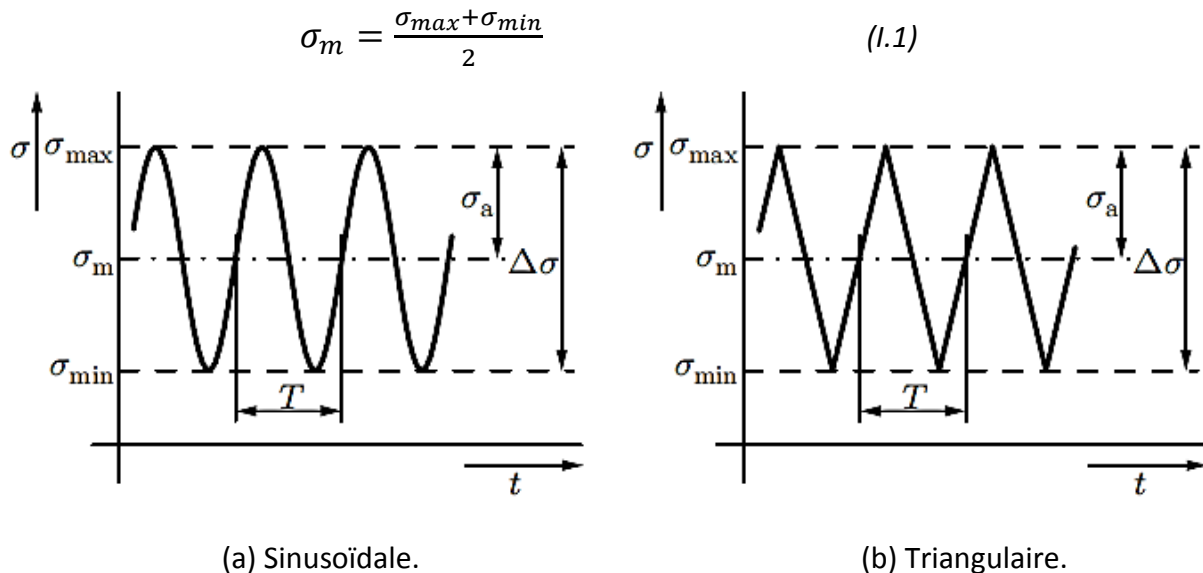


Figure I.1. Courbes de charge typiques à amplitude constante [8].

avec :

L'amplitude de contrainte σ_a : [8]

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

La variation de contrainte $\Delta\sigma$: [8]

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1.3)$$

Et la période T . Une période correspond à un cycle de charge. Pour atteindre un certain nombre de cycles de contrainte N , un moment de $t = NT$ est nécessaire [8].

I.3. Courbe de fatigue

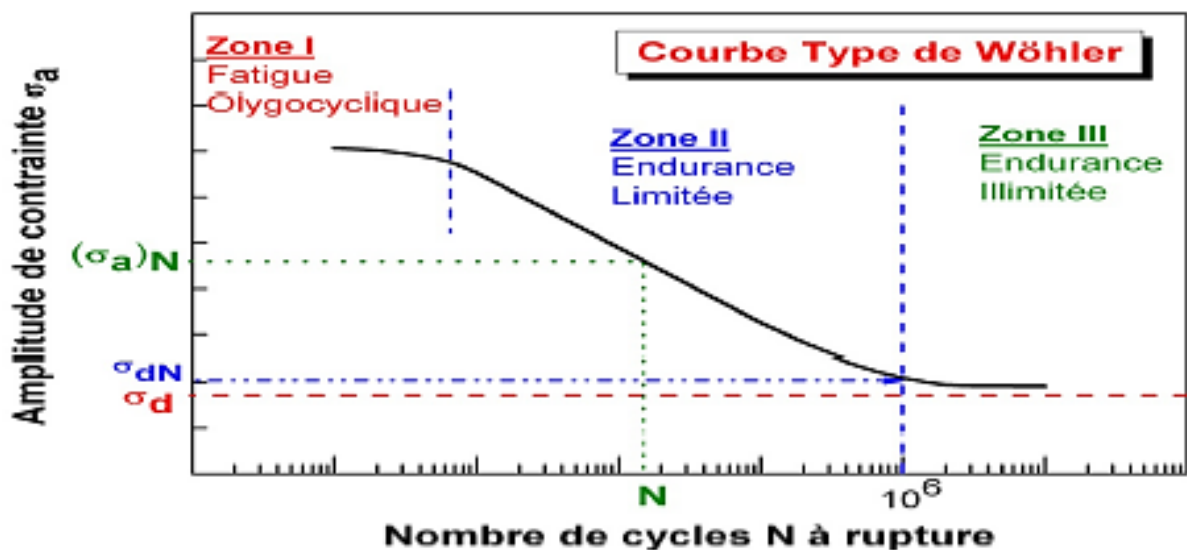


Figure I.2. Courbe complète de la fatigue ou courbe de Wohler [3].

Dans le cas d'un chargement cyclique, la courbe de Wohler montre les informations les plus complètes sur la résistance à la fatigue des composants d'une structure. Cette information est habituellement obtenue expérimentalement à l'aide de nombreux essais de spécimens nominalemt identiques [3].

Zone I : zone de fatigue oligocyclique ou de déformation plastique, zone de fortes charges provoquant la rupture après un faible nombre de cycles.

Zone II : zone d'endurance limitée ou de fatigue. Le comportement peut être supposé élastique linéaire. La courbe est linéaire et décroissante.

Zone III : zone d'endurance illimitée. Pour les aciers, la courbe admet une asymptote permettant de définir une limite de fatigue σ_d en dessous de laquelle, la pièce est supposée « vivre indéfiniment ».

Dans la pratique, une limite de fatigue conventionnelle, appelée *limite d'endurance* est obtenue par troncature sur le nombre de cycle à rupture N , soit σ_{dN} .

I.4. Mécanisme de la fatigue des métaux

Les différentes étapes du mécanisme de la fatigue sous des charges cycliques sont :

- Initiation de la fissure,
- Propagation des fissures,
- Rupture finale du composant [8].

I.5. Classification des sollicitations des essais de fatigue

On peut distinguer trois catégories d'essai de fatigue (figure I.3) : les essais sous amplitude constante, les essais sous amplitude variable et sous amplitude aléatoire. Généralement, au cours d'essais de fatigue, la contrainte appliquée est une fonction sinusoïdale [5].

Actuellement, on utilise de plus en plus, en pratique, les résultats d'essais effectués sous-programme de charge, de manière à se rapprocher d'avantage des conditions réelles de service. Des expérimentateurs ont imaginé des essais avec modulation d'amplitude, sinusoïdal ou à programme [6].

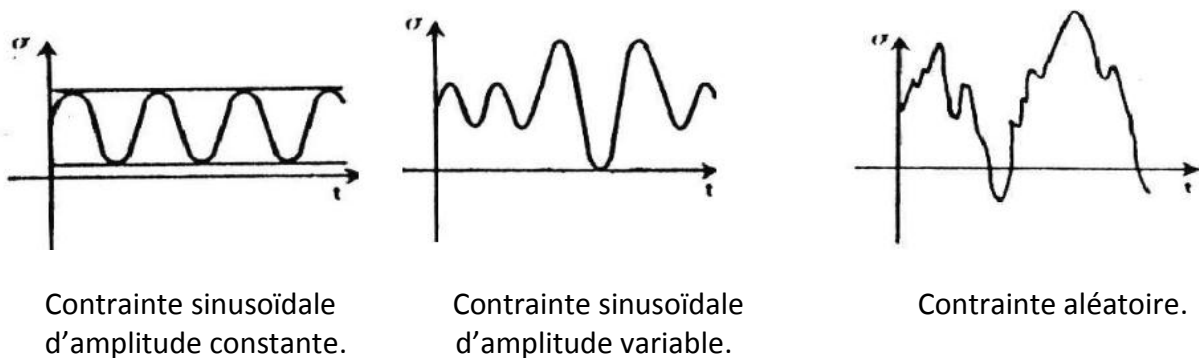


Figure I.3. Types de contraintes lors d'un essai de fatigue [5].

I.6. Effet d'entaille

La fatigue des matériaux est un domaine très vaste qui peut être étudié sous différents aspects. Pour cela, beaucoup de chercheurs du domaine ont fait des études et des essais pour trouver l'influence des différents paramètres sur la fatigue.

Les entailles sont des changements brusques de la géométrie d'un composant. Elles peuvent être nécessaires pour des raisons de conception. Elles provoquent des concentrations de contrainte[8].

Le *facteur de concentration de contrainte* (théorique), K_t , est défini comme le rapport entre la contrainte maximale à la racine de l'entaille de la contrainte nominale qui serait présente si une concentration de contrainte ne se produisait pas : [1]

$$K_t = \frac{\sigma_{peak}}{\sigma_{nominal}} \quad (1.4)$$

Le *facteur de concentration de contrainte en fatigue* est obtenu expérimentalement. Il est toujours inférieur ou égal au facteur de concentration de contrainte [1].

La sensibilité à l'entaille d'un matériel comme considéré par **Peterson** a été définie par un facteur q (*facteur de sensibilité à l'entaille*) comme : [1]

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (1.5)$$

Chapitre II :

Fatigue sous corrosion

II.1. Définition de la corrosion

La corrosion selon la norme **ISO 8044**, est définie comme « interaction physico-chimique (habituellement d'une nature électrochimique) entre un métal et son environnement [4].

La corrosion, au sens large, peut s'exprimer comme la détérioration d'un matériau, par le milieu dans lequel il se trouve [7].

II.2. Définition de la fatigue sous corrosion

La fatigue sous corrosion est par définition la fatigue dans un environnement corrosif. Puisque la corrosion est un mécanisme dépendant du temps, il est évident que la fréquence de la charge appliquée et la forme de l'onde des cycles de charge puissent être significatives en fatigue sous corrosion [1].

II.3. Fatigue sous corrosion dans les environnements liquides

Deux types d'environnements devraient être considérés :

- Environnements gazeux,
- Environnements liquides [1].

L'environnement liquide le plus utilisé dans les programmes d'essai est l'eau salée. L'effet nuisible de l'eau salée a été connu il y a bien longtemps à partir d'applications industrielles. Des expériences sur l'effet de l'eau salée ont été déjà effectuées au début des années **30** par **Gough** et al. Des résultats de ce travail sont donnés sur la figure II.2. La diminution de la limite de fatigue est la plus évidente. Dans beaucoup de cas, la présence de l'eau ne peut être évitée. Le mécanisme de corrosion dans un liquide est électrochimique. Sur une surface du matériau, la corrosion, en environnement sévère, peut aboutir à la nucléation pour créer la toute première microfissure [1].

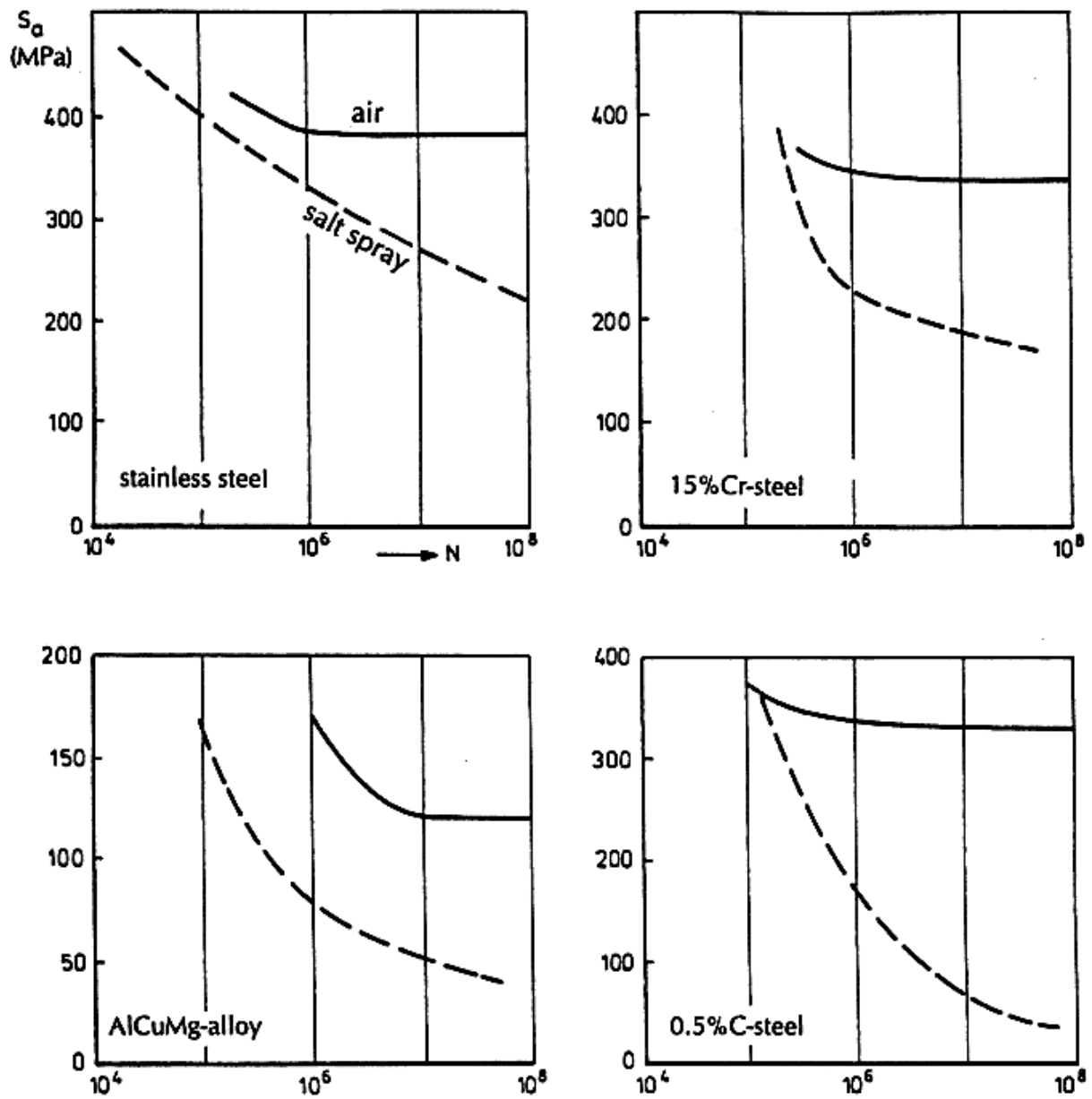


Figure II.2. Effet de l'eau salée sur des courbes *S-N*. Gough et Soit [1].

Chapitre III :

Exploitation et comparaison des résultats

III.1. Introduction

Dans cette partie, nous complétons et exploitons certains résultats que nous avons obtenus dans le Projet de Fin d'Etudes avec une étude comparative sur le rayon et l'angle en fond d'entaille.

III.2. Les éprouvettes d'essais

Les figures III.1 et III.2 donnent la forme et les dimensions des éprouvettes que nous avons réalisés.

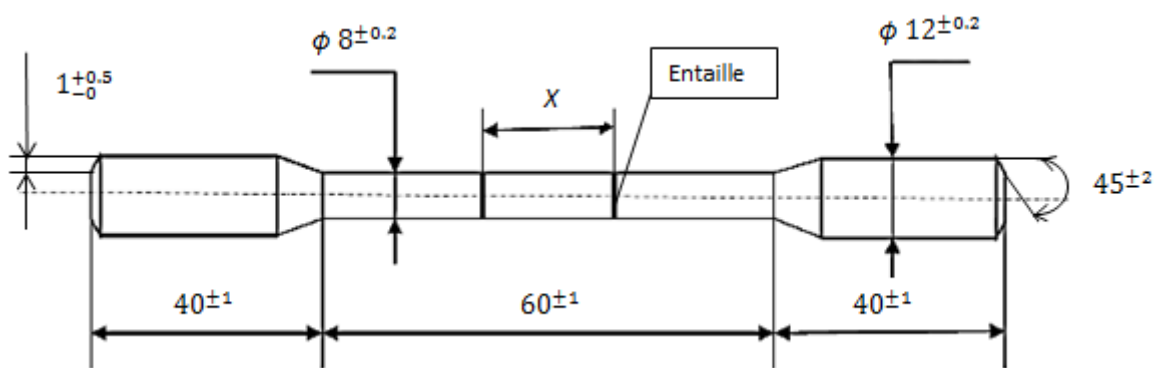


Figure III.1. Forme et dimensions des éprouvettes.

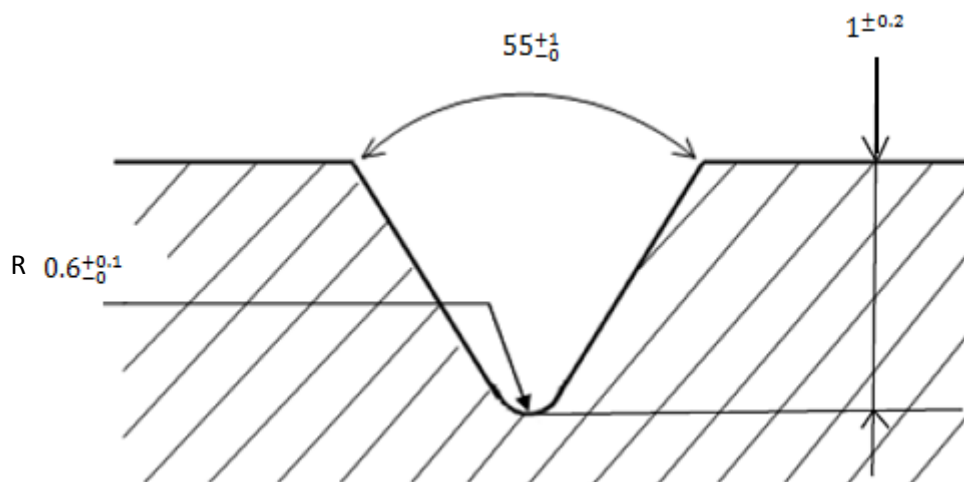


Figure III.2. Forme et dimensions des entailles.

III.3. La machine d'essai de flexion rotative

La photo III.1 montre la machine de flexion rotative que nous avons utilisée pour réaliser nos essais.



Photo III.1. Machine d'essai de flexion rotative.

III.4. Les résultats des essais

Deux séries d'essais ont été réalisés. La première série concerne les essais de fatigue à l'air libre. La deuxième série concerne les essais de fatigue sous corrosion. Le chargement choisi est fixé à **200 MPa**. Deux éprouvettes sont utilisées pour chaque distance **X**. Le nombre de cycles correspond au nombre de tours du moteur électrique d'entraînement.

Tableau III.1. Nombre de cycles jusqu'à la rupture des éprouvettes (air ambiant).

La distance entre les entailles X (mm)	Nombre de cycles N	
	Essais n°1	Essais n°2
2.5	723000	606400
5	495600	/
7.5	406900	/
10	381100	/
12.5	367300	159600
15	121900	386900
17.5	199600	353800
20	136600	188200

/ : La rupture n'a pas eu lieu après plus de **10⁶ cycles**.

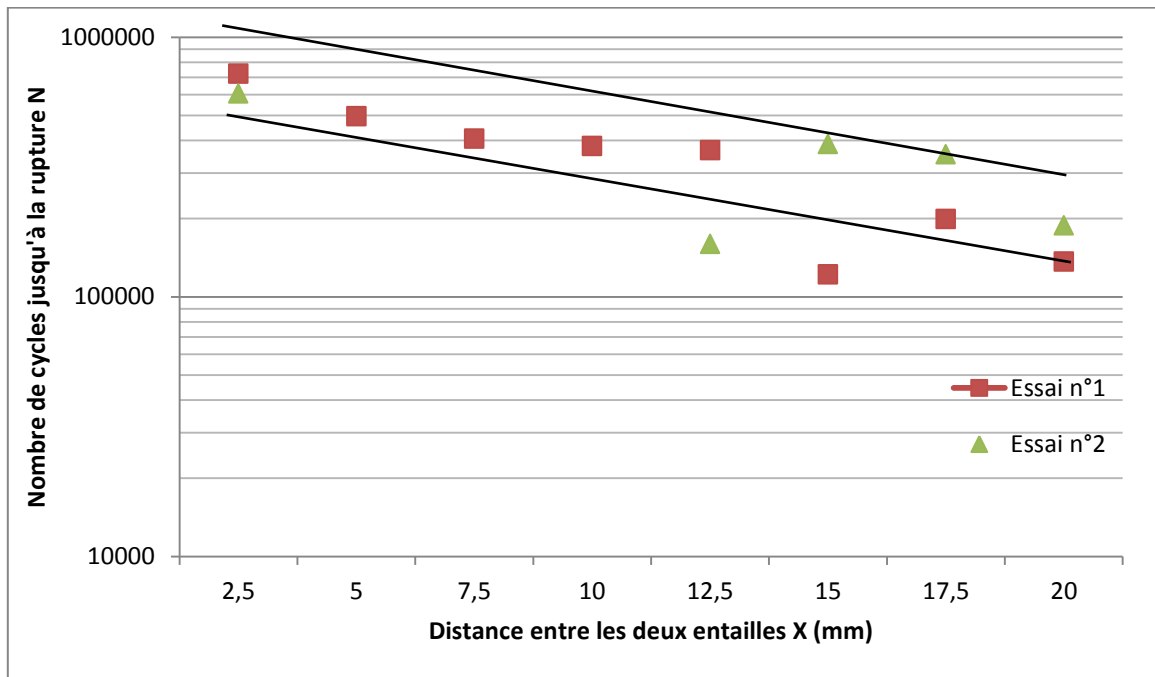


Figure III.3. Variation du nombre de cycles jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les deux entailles X (essais à l'air ambiant).

D'après la figure, nous remarquons que l'endurance est inversement proportionnelle à la distance entre les deux entailles X .

Tableau III.2. Nombre de cycles jusqu'à la rupture des éprouvettes (avec corrosion).

La distance entre les entailles X (mm)	Nombre de cycles N	
	Essais n°1	Essais n°2
2.5	543600	/
5	498600	400300
7.5	/	427100
10	339300	380600
12.5	340900	/
15	437000	302700
17.5	257800	276500
20	152300	176400

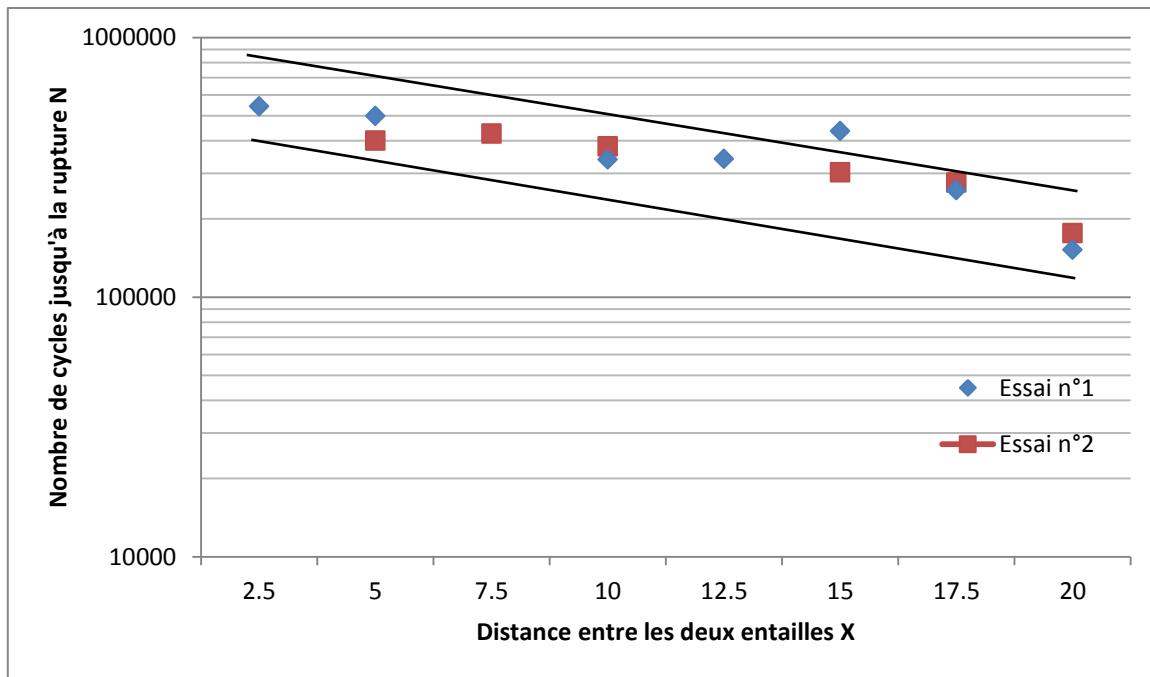


Figure III.4. Variation du nombre de cycles jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les deux entailles X (sous corrosion).

III.5. Exploitation et comparaison des résultats

Dans cette partie de l'étude, une étude comparative est faite en terme de rayon et d'angle en fons d'entaille. Nous comparons nos résultats avec ceux obtenus par **DERARDJA** dans son Projet de Fin d'Etudes.

Le matériau utilisé est le même (**XC48**). Les diamètres en section nette sont les mêmes. Les éprouvettes réalisées par **DERARDJA** ont un rayon en fond d'entaille de **0.4 mm** et un angle de **35°**. La profondeur des entailles est la même. La machine d'essai utilisé est la même. La charge choisit est différente. Elle est de **180 MPa**. Les résultats obtenus sont représentées dans le tableau suivant:

Tableau III.3. Nombre de cycles jusqu'à la rupture (air ambiant, résultats de **DERARDJA**) [9].

La distance entre les entailles X (mm)	Nombre de cycles N		
	Essais n°1	Essais n°2	Essais n°3
2.5	108300	668200	850200
5	103800	814000	/
7.5	602500	474400	75400
10	298100	333500	/
12.5	321100	185200	241500
15	141400	235300	181500
17.5	105400	143800	260200
20	81200	169600	93800

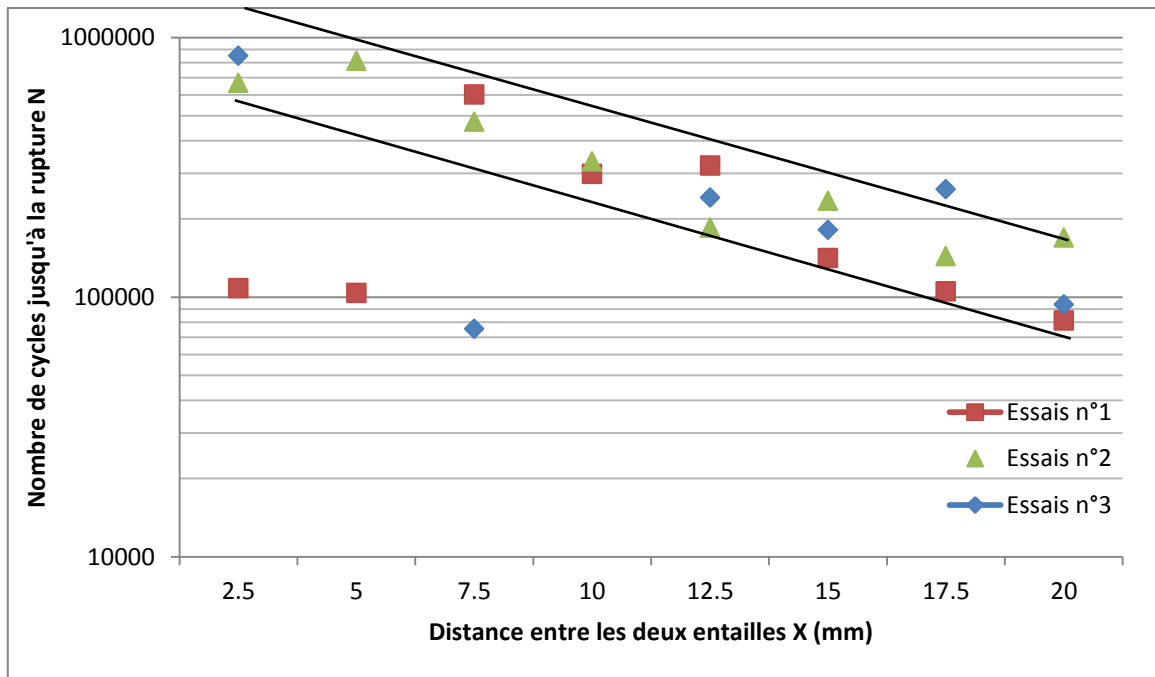


Figure III.5. Variation du nombre de cycles jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les deux entailles X (essais à l'air ambiant) [9].

D'après la figure III.5 et le tableau III.3, on peut tirer les informations suivantes :

- Malgré que le niveau de charge ne soit pas le même, nous pouvons conclure qu'avec une charge de **180 MPa** pour une entaille de rayon **0,4 mm**, le nombre de cycles jusqu'à la rupture est relativement inférieur au nombre de cycles jusqu'à la rupture avec une charge de **200 MPa** pour une entaille de **0.6 mm**. Ceci est justifié particulièrement par le rayon en fond d'entaille,
- Les points sont situés dans une zone similaire (parallèle) à celle obtenus par nos résultats.

Conclusion générale

Après avoir fait des essais dans un domaine quelconque et avant d'exposer les résultats, il faut toujours remarquer, analyser les résultats, faire beaucoup d'essais, et le plus important de les comparer avec d'autres résultats fiables.

L'étude de la fatigue a été effectuée sur des éprouvettes à double entaille parallèles, à l'air ambiant et à l'eau de mer. Le matériau des éprouvettes usinées est l'acier **XC48**.

La charge appliquée est de **200 MPa**. Elle a été fixée à cette valeur de telle sorte que le domaine de variation de la durée de vie des éprouvettes ne soit pas très petit et permettant de remarquer l'effet de la corrosion.

La distance entre entaille la plus courte donne une meilleure endurance.

L'effet de la corrosion est plus prononcé pour les grands nombre de cycles jusqu'à la rupture des éprouvettes. Ce qui est bien établi par la littérature. Mais le processus d'endommagement est plus prononcé en présence de doubles entailles.

Parfois, les résultats obtenus sont plus ou moins différents pour la même distance entre entailles. Ceci peut être dû essentiellement aux défauts d'usinage, et à d'autres facteurs. Cette disparité est un phénomène inhérent au phénomène de fatigue. Donc, on propose d'effectuer plusieurs essais pour confirmer les résultats obtenus.

Malgré que le niveau de charge ne soit pas le même, nous pouvons conclure qu'avec une charge de **180 MPa** pour une entaille de rayon **0,4 mm**, le nombre de cycles jusqu'à la rupture est relativement inférieur au nombre de cycles jusqu'à la rupture avec une charge de **200 MPa** pour une entaille de **0.6 mm**. Ceci est justifié particulièrement par le rayon en fond d'entaille.

Bibliographie

- [1] :JaapSchijve ; “Fatigue of Structures and Materials” ; Springer Science+Business Media, B.V. ; 2009.
- [2] :Michael F. Ashby, David R. H. Jones ; “Engineering Materials 1” ; Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP ; 1996.
- [3] : L. A. Sosnovskiy ; “Tribo-Fatigue. Wear-Fatigue Damage and its prediction” ;Springer-Verlag Berlin Heidelberg ; 2005.
- [4] :Reza Javaherdashti ; “MicrobiologicallyInfluenced Corrosion. An Engineering Insight” ; Springer-Verlag London Limited ; 2008.
- [5] : R.Cazaud ;“La fatigue des métaux” ; DUNOB Paris ; 1969.
- [6] : A. Brand, J.F. Flavenot, R. Grégoire, C.Tournier ; “Données technologiques sur la fatigue” ; CETIM, Paris ; 1992.
- [7] : J. J. Lamoureux ; “Précis de corrosion” ; Tecsalt Limitée, 85 Ste-Catherine ouest, Montréal, Québec ; 1980.
- [8] :J. Rösler, H. Harders, M. Bäker ; “Mechanical Behaviour of Engineering Materials. Metals, Ceramics, Polymers, and Composites” ; The TeubnerVerlag Wiesbaden ; 2006.
- [9] : HarouneDerardja ; Projet de Fin d’Etudes ; “Influence des traitements thermiques sur l’endurance des éprouvettes avec double entaille en flexion rotative” ; 2011.
- [10] : S.Bugat ; Thèse de Doctorat ;“Comportement et endommagement des aciers austénoferritiquesvieillis, une approche micromécanique” ; L’Ecole Nationale Supérieure des Minesde Paris ; décembre 2000.