

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département de Génie Mécanique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

Thème :

**FATIGUE SOUS CORROSION EN FLEXION
ROTATIVE EN PRESENCE DE DOUBLE
ENTAILLE**

Réalise par :

BOUNAB Sid Ali

Promoteurs :

Mr. Y.BELKACEMI
Mr. B.GUERGUEB

Juin 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 qui a contribué, de proche ou de loin, à réaliser ce travail.

ملخص

في هذا العمل، قمنا بدراسة 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. الآلة المستعملة هي آلة الدوران الانحنائي. الوسط التآكلي المستعمل هو ماء البحر.

الكلمات المفتاحية :

تعب، تآكل، عينة، انخفاض، دوران انحنائي.

Résumé

Dans ce travail, on a étudié le phénomène de fatigue sous corrosion, sur des éprouvettes en acier **XC48**, portant deux entailles parallèles. La distance entre entailles varie. Les résultats ont été comparés avec des essais de fatigue à l'air ambiant. La machine utilisée est une machine de flexion rotative. Le milieu corrosif utilisé est l'eau de mer.

Mots clés :

Fatigue, corrosion, éprouvette, entaille, flexion rotative.

Abstract

In this works, we have studied the phenomenon of fatigue under corrosion, on steel **XC48** test-tubes, carrying two parallel notches. The distance between notches varies. The results were compared with fatigue tests with the ambient air. The machine used is a machine of rotational bending. The corrosive medium used is the sea water.

Keywords :

Fatigue, corrosion, test-tube, notch, rotational bending.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur la fatigue	2
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique	3
I.3. Définition de la fatigue	4
I.4. Types de charges	5
I.5. Courbe de fatigue.....	10
I.6. Mécanisme de la fatigue des métaux.....	15
I.6.1. Initiation de la fissure	15
I.6.2. Propagation des fissures (étape II).....	21
I.6.3. Rupture finale.....	23
I.7. Fatigue sous chargements d'amplitude variable.....	24
Chapitre II : Effet d'entaille	26
II.1. Introduction.....	27
II.2. Effet d'entaille	27
II.2.1. Facteur de concentration de contrainte	27
II.2.2. Le principe de similitude et la sensibilité à l'entaille.....	28
Chapitre III : Fatigue sous corrosion.....	32
III.1. Introduction.....	33
III.2. Définition de la corrosion	33
III.3. Corrosion par l'eau	34
III.3.1. Définition des eaux.....	34
III.3.2. Potentiel d'hydrogène (pH).....	34
III.3.3. Corrosivité des eaux	34
III.4. Définition de la fatigue sous corrosion.....	35
III.5. Aspects de la fatigue sous corrosion	36
III.6. Fatigue sous corrosion dans les environnements liquides.....	37
Chapitre IV : Etude expérimentale	43
IV.1. Introduction.....	44
IV.2. Les éprouvettes d'essais :.....	44
IV.2.1. Forme et dimensions des éprouvettes.....	44

IV.2.2.	Matériau des éprouvettes :	46
IV.2.3.	Usinage des éprouvettes :	46
IV.3.	La machine d'essai de flexion rotative :	47
IV.4.	Mode de sollicitation des éprouvettes.....	48
IV.5.	La cellule de corrosion.....	49
IV.6.	Les résultats des essais.....	52
IV.6.1.	Fatigue à l'air ambiant	52
IV.6.1.1.	Présentation des ruptures des éprouvettes au niveau des entailles	52
IV.6.1.2.	Nombre de cycles jusqu'à la rupture.....	53
IV.6.1.3.	Evolution de la flèche	55
IV.6.2.	Fatigue sous corrosion.....	58
IV.6.2.1.	Présentation des ruptures des éprouvettes au niveau des entailles	58
IV.6.2.2.	Nombre de cycles jusqu'à la rupture.....	59
IV.6.3.	Comparaison entre les essais de fatigue à l'air ambiant et dans l'eau de mer	60
	Conclusion générale	62
	Bibliographie.....	63

Liste des figures

Figure I.1. Effondrement de la roue avant d'une moto par la fatigue des rais	4
Figure I.2. Défaillance de fatigue d'un axe de turbine à vapeur fait en 28 NiCrMoV85	6
Figure I.3. Accélération mesurée du bras de contrôle inférieur dans le châssis d'un entraînement de voiture le long d'une route rugueuse.....	7
Figure I.4. Courbes de charge typiques.....	7
Figure I.5. Dépendance du rapport R sur la contrainte moyenne σ_m	9
Figure I.6. Exemples de rupture de fatigue.....	9
Figure I.7. Diagramme logarithmique de courbe complète de la fatigue mécanique	10
Figure I.8. Courbe de fatigue dans la région multi-cycle	13
Figure I.9. La dépendance de l'amplitude ultime σ_a sur la valeur moyenne σ_m des contraintes dans le cycle	14
Figure I.10. Formation des bandes de glissade dans AlMg₃ dans une expérience contrainte-contrôlée de fatigue	17
Figure I.11. Tracé schématique d'une hystérésis dans la réponse contrainte-déformation sous un chargement cyclique	18
Figure I.12. Formation des intrusions et des extrusions dues au chargement cyclique	18
Figure I.13. Micrographe de microscope à balayage électronique des extrusions dans un acier de ferrite	19
Figure I.14. Étapes I et II de la propagation des fissures	20
Figure I.15. Modèle de propagation des fissures sous le chargement cyclique	22
Figure I.16. Micrographe de microscope à balayage électronique des striations sur deux surfaces de rupture de fatigue	23
Figure I.17. Paramètres influençant la durée de vie d'une structure	24
Figure II.1. Bande avec un trou central comme prototype d'une partie entaillée	28
Figure II.2. Principe de similitude : le même S_{peak} à la limite de fatigue	29
Figure II.3. La sensibilité à l'entaille de la limite de fatigue ($S_m = 0$) des spécimens tournants de poutre.....	30
Figure III.1. Diagramme de corrosion Système fer/eau	35
Figure III.2. L'effet de l'environnement et de la fréquence du chargement sur la courbe S-N des spécimens sans entaille d'acier doux	37
Figure III.3. Effet de l'eau salée sur des courbes S-N	38
Figure III.4. Puits de corrosion dans une surface d'un alliage d' Al	39
Figure III.5. L'effet d'un puits de corrosion sur la courbe S-N des spécimens sans entailles d'un alliage d' Al	40

Figure III.6. Courbes de S-N d'acier à faible teneur en carbone dans l'eau	41
Figure IV.1. Forme et dimensions des éprouvettes.	44
Figure IV.2. Forme et dimensions des entailles.	45
Figure IV.3. Charges appliquées à l'éprouvette.	49
Figure IV.4. Moment fléchissant résultant.	49
Figure IV.5. Cellule de corrosion (dessin effectué par le logiciel SolidWorks 2012).	50
Figure IV.6. Système de fixation (dessin effectué par le logiciel SolidWorks 2012).	51
Figure IV.7. Variation du nombre de cycles jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les deux entailles X (essais à l'air ambiant).	54
Figure IV.8. Evolution de la flèche en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette de distance entre entailles X = 5 mm	55
Figure IV.9. Evolution de la flèche en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette de distance entre entailles X = 10 mm	56
Figure IV.10. Evolution de la flèche en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette de distance entre entailles X = 15 mm	57
Figure IV.11. Evolution de la flèche en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette de distance entre entailles X = 20 mm	57
Figure IV.12. Variation du nombre de cycles jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les deux entailles (sous corrosion) X	60
Figure IV.13. Comparaison entre les essais de fatigue à l'air ambiant et les essais de fatigue sous l'eau de mer (corrosion).....	61

Liste des photos

Photo IV.1. L'outil utilisé pour l'usinage des entailles.	45	
Photo IV.2. Tour utilisé dans l'usinage des éprouvettes.	46	
Photo IV.3. Variation de la distance X dans les éprouvettes usinées.	47	
Photo IV.4. Machine d'essai de flexion rotative.	48	
Photo IV.5. Fraiseuse utilisé pour l'usinage de la cellule.	50	
Photo IV.6. Cellule de corrosion et système de fixation.	51	
Photo IV.7. Eprouvette avec $X=2.5\text{ mm}$.	Photo IV.8. Section : éprouvette ($X=2.5\text{ mm}$).	52
Photo IV.9. Eprouvette avec $X=5\text{ mm}$.	Photo IV.10. Section : éprouvette ($X=5\text{ mm}$).	52
Photo IV.11. Eprouvette avec $X=10\text{ mm}$.	Photo IV.12. Section : éprouvette ($X=10\text{ mm}$).	53
Photo IV.13. Eprouvette avec $X=20\text{ mm}$.	Photo IV.14. Section : éprouvette ($X=20\text{ mm}$).	53
Photo IV.15. Eprouvette avec $X = 2.5\text{ mm}$	58	
Photo IV.16. Eprouvette avec $X = 5\text{ mm}$	58	
Photo IV.17. Eprouvette avec $X = 10\text{ mm}$	59	
Photo IV.18. Eprouvette avec $X = 10\text{ mm}$	59	

Liste des tableaux

Tableau I.1. Rapports importants de R	8
Tableau I.2. Différents types d'essais d'amplitude variable	25
Tableau IV.1. Composition chimique moyenne de l'acier XC48	46
Tableau IV.2. Propriétés mécaniques de l'acier XC48 (d'après SolidWorks 2012).	46
Tableau IV.3. Nombre de cycles jusqu'à la rupture des éprouvettes (air ambiant).	54
Tableau IV.4. Evolution de la flèche de l'éprouvette de distance entre entailles X = 5 mm	55
Tableau IV.5. Evolution de la flèche de l'éprouvette de distance entre entailles X = 10 mm	56
Tableau IV.6. Evolution de la flèche de l'éprouvette de distance entre entailles X = 15 mm	56
Tableau IV.7. Evolution de la flèche de l'éprouvette de distance entre entailles X = 20 mm	57
Tableau IV.8. Nombre de cycles jusqu'à la rupture des éprouvettes (avec corrosion).	59
Tableau IV.9. Comparaison entre les deux types d'essai de fatigue.	60

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 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, on l'appelle *la fatigue*.

Les paramètres d'influence sur la fatigue sont nombreux. Le but de ce travail est d'étudier l'effet de la corrosion sur la durée de vie d'un type de « pièce » qui s'appelle *l'éprouvette*. Cette éprouvette sera présentée dans ce travail.

Vue l'utilisation importante de l'acier dans l'industrie, nos essais ont été faits sur un type d'acier qui est l'acier **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, Peterson, Neuber, Heywood**.

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités et des notions générales sur la fatigue.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons quelques paramètres d'influence sur la fatigue. Ces paramètres ont des degrés d'influence différents. Notre étude expérimentale se porte sur l'effet de la corrosion.

Dans le troisième chapitre, on parle de l'importance de la fatigue sous corrosion.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons l'étude expérimentale et les résultats obtenus, ainsi que ses interprétations. Une conclusion générale est donnée à la fin.

Chapitre I :

Généralités sur la fatigue

I.1. Introduction

Le terme *fatigue en métal* se rapporte à la dégradation progressive et à la défaillance certaine qui se produisent sous les charges qui varient avec le temps, et qui sont inférieures à la force statique du spécimen, du composant ou de la structure métallique concernés. La force statique est la charge qui cause la défaillance dans une application. Les charges responsables s'appellent les charges de fatigue. Ces charges sont cycliques en nature, mais les cycles ne sont pas nécessairement toutes de mêmes tailles ou clairement perceptibles. Une charge de fatigue dans laquelle les différents cycles peuvent être distingués s'appelle parfois *une charge cyclique* [2].

La fatigue en métal est en grande partie un sujet descriptif, et car telle il a accumulé une énorme littérature (**Pook 1983a**). Néanmoins, les concepts de base sont nécessaires pour une compréhension de la littérature de la fatigue des métaux. Les descriptions peuvent être divisées en deux groupes, métallurgique et mécanique. Des descriptions métallurgiques sont concernées par l'état du métal avant, pendant et ensuite à l'application des charges de fatigue, et sont habituellement prises en compte pour inclure l'étude des mécanismes de fatigue en métal. Des descriptions mécaniques sont concernées par la réaction mécanique d'un ensemble donné de conditions de charge, par exemple le nombre de cycle nécessaire pour causer la défaillance. Les descriptions mécaniques sont plus utiles d'un point de vue de technologique, où le comportement de service doit être prévu [2].

I.2. Historique

Les défaillances de fatigue en structures métalliques sont un problème technique bien connu. Déjà au **19^{ème}** siècle plusieurs défaillances de fatigue sérieuses ont été rapportées et les premières investigations de laboratoire ont été effectuées. La recherche remarquable sur la fatigue a été faite par **August Wöhler**. Il a montré que l'application d'une charge, inférieure à la force statique d'une structure, n'a fait aucun dommage à cette structure. Mais si la même charge est appliquée d'une manière répétitive plusieurs fois elle pourrait induire une défaillance [1].

La fatigue en métal a été d'intérêt pendant environ **170 années**. Cet intérêt remonte au développement de la machine à vapeur, du transport mécanique, et de l'utilisation plus étendue des dispositifs mécaniques. Cette mécanisation a soumis beaucoup de composants aux charges de fatigue, et la défaillance de fatigue commençait à devenir une occupation commune [2].

La première utilisation du terme fatigue dans la copie semble être par **Braithwaite (1854)**, bien que dans son papier **Braithwaite** déclare qu'il a été inventé par **M. Champ**. L'opinion générale avait développé (**Forest et al. 1974**) que le matériel avait fatigué de

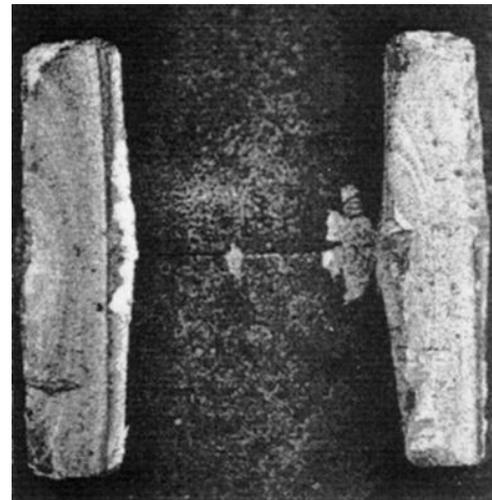
supporter la charge, ou de celui la ré-application continue d'une charge d'une manière quelconque avait épuisé la capacité du matériel de supporter la charge [2].

La première défaillance de fatigue catastrophique connue, concernant des pertes humaines, était l'accident ferroviaire de **Versailles (France)** en **1842 (Smith 1990)**. Le train était exceptionnellement long, avec **17 chariots** transportés par deux machines à vapeur. L'axe avant de la conduite, moteur à quatre roues a échoué en raison de la fatigue du métal et le corps du moteur principal est tombé à la terre. Le deuxième moteur l'a heurté aux pièces. Des chariots suivants réussis au-dessus de l'épave et de certains ont été placés sur le feu. Ceci, et nombreux d'autres défaillances ferroviaires d'axe, menées aux recherches étendues sur la nature de la fatigue en métal (**Parsons 1947, Smith 1990, Schütz 1996**) [2].

L'histoire de la fatigue couvrant une période de **1837 à 1994** était passée en revue dans un papier étendu par **Walter Schütz**. Des papiers historiques d'étape importante ont été rassemblés par **Hanewinkel** et **Zenner**, et **Sanfor**. **John Mann** a compilé **21075 sources documentaires** sur des problèmes de fatigue couvrant la période de **1838 à 1969** dans quatre livres. Depuis lors le nombre de publications sur la fatigue toujours a considérablement augmenté et il peut estimer être environ **100.000** en l'an **2000**. Heureusement, la consultation de la littérature sur des matières particulières peut maintenant être faite avec les systèmes de récupération automatisés de littérature [1].



(a) Roue avant, transitoires cassées, pièce d'axe avec des freins à tambour.



(b) Ruptures de fatigues

Figure I.1. Effondrement de la roue avant d'une moto par la fatigue des rais [1].

I.3. Définition de la fatigue

La définition rigoureuse d'exactly ce qui est signifiée par fatigue du métal est difficile et n'est pas particulièrement utile pour sa compréhension. Une définition tôt de dictionnaire

est : l'état de la faiblesse en métal provoqué par les coups répétés ou la longue contrainte continue (**Murray 1901**). Une définition plus récente est : défaillance d'un métal sous une charge répétée ou autrement variable qui n'atteint jamais un niveau suffisamment pour causer la défaillance dans une application simple (**Pook 1983a**) [2].

Les catégories de fatigue sont les suivantes :

- **Fatigue des structures fissurées** : Les fissures préexistent ; propagation contrôlée de la rupture. Exemples : les grandes structures, particulièrement ceux qui contiennent des soudures : ponts, bateaux, récipients à pression,
- **Fatigue des composants non-fissurées** : Fissure ne préexiste pas ; rupture déclenchement-contrôlée. Exemples : presque n'importe quel petit composant comme des goupilles de goujon, voies de roulement, dents d'engrenage, axes, axes détraqués, arbres d'entraînement :
 - ✓ **Fatigue par cycle élevé** : Fatigue aux efforts inférieur au rapport général ; $\geq 10^4$ cycles à la rupture. Exemples : tous les systèmes tournants ou vibrants comme des roues, axes, éléments de moteur,
 - ✓ **Basse fatigue de cycle** : Fatigue aux efforts au-dessus du rapport général ; $\leq 10^4$ cycles à la rupture. Exemples : composants creusés des réacteurs nucléaires, fuselages, composants d'une turbine, tout composant sujet à surcharges occasionnelles [5].

1.4. Types de charges

Les charges cycliques peuvent se produire de plusieurs manières : La charge peut être déterminée par les forces, par exemple : forces centrifuges, ou par des déplacements ou des contraintes thermiques, par exemple : contraintes prescrites. En outre, la fréquence ou l'amplitude de la charge peut différer. En conclusion, le nombre de cycles à la défaillance ou le nombre de cycles auquel le composant est exposé à son importance [8].

Comme exemple, considérer le moteur d'une voiture. Toutes ses pièces en rotation, par exemple le vilebrequin ou les tiges de piston, sont cycliquement chargées et feront face à un grand nombre de cycles pendant le service. Si la voiture parcourt une distance de **150 000 km** sur la route à une vitesse de **100 km/h** et à une vitesse de rotation de **3000 tr/min⁻¹**, tout le nombre de cycles est **2.7×10⁸**. Pour assurer la survie du moteur, il sera conçu pour un nombre infini de cycles, la soi-disant limite de fatigue [8].

Quelques charges supplémentaires de fatigue se produiront dans le moteur quand il est commencé depuis les murs composants dans la chambre de combustion (par exemple, bloc-cylindres, pistons) sera au commencement chauffée sur leur surface seulement, entraînant les contraintes thermiques différentielles entre leur centre froid et la surface chaude qui doivent être compensées par des contraintes (élastiques ou plastiques) mécaniques. Ceci

cause des contraintes thermiques. Pendant l'arrêt, le processus est renversé. L'effet de ceci peut être significatif : Si nous supposons une distance parcourue moyenne de **50 kilomètres**, le nombre de cycles dans l'exemple est seulement de **3000 cycles**, avec chaque cycle correspondant à un processus commençant. Il causerait un surdimensionnement inutile pour concevoir le moteur pour un nombre infini de cycles de commencement, parce que le nombre pendant son temps de la vie est plutôt limité. Pour ce cas de charge, le moteur est seulement conçu pour survivre à un nombre fini de cycles et peut être chargé ainsi au-delà de la limite de fatigue [8].



Figure I.2. Défaillance de fatigue d'un axe de turbine à vapeur fait en **28 NiCrMoV85**. Le fragment montré a une masse d'environ **24 t**. La fissure a commencée à un défaut matériel dans l'axe [8].

Comme déjà indiqué, les charges de service ont souvent une dépendance de temps complexe. Un exemple est la charge dépendant du temps sur des pièces de châssis de voiture pendant l'entraînement sur les routes rugueuses (figure I.2). Il serait plutôt cher de simuler tous les cas possibles de charge dans des expériences de laboratoire. Habituellement, des investigations sont limitées aux formes représentatives, par exemple les courbes de charge sinusoïdales et triangulaires représentées sur la figure I.3. Ces courbes peuvent être caractérisées par la *contrainte minimale* σ_{min} , la *contrainte maximale* σ_{max} et la *contrainte moyenne* σ_m : [8]

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (I.1)$$

L'amplitude de contrainte σ_a : [8]

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1.2)$$

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 ou alternance de charge. Pour atteindre un certain nombre de cycles de contrainte N , un moment de $t = NT$ est nécessaire.

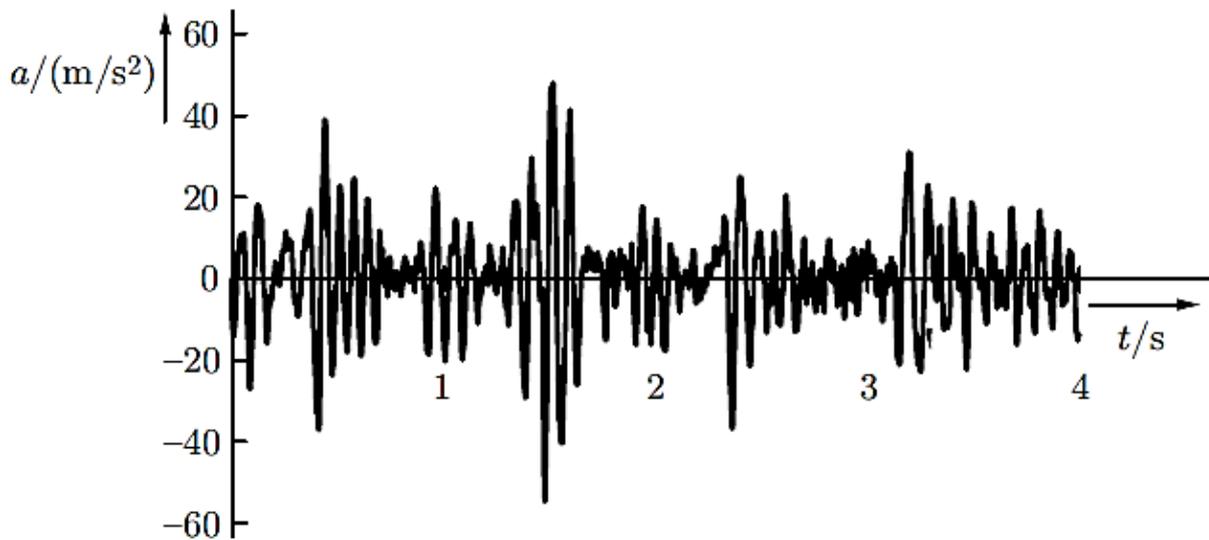
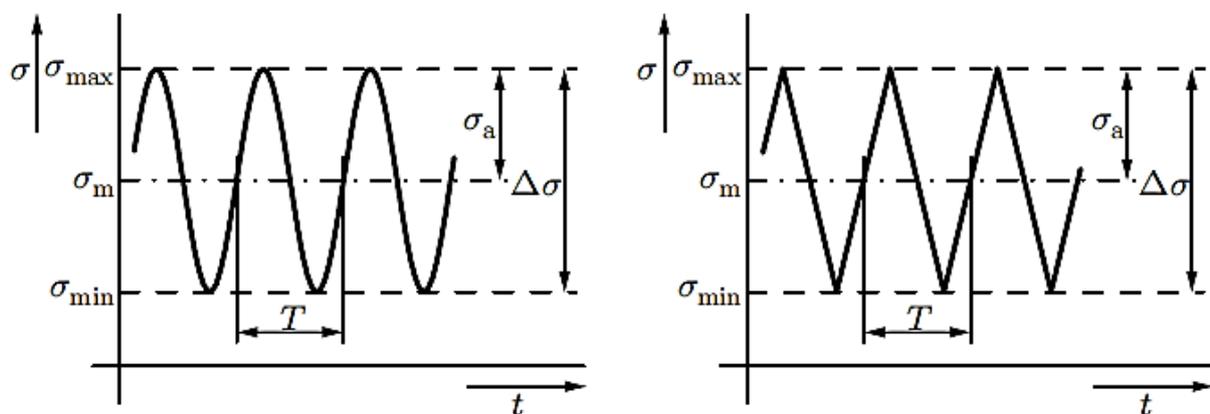


Figure I.3. Accélération mesurée du bras de contrôle inférieur dans le châssis d'un entraînement de voiture le long d'une route rugueuse. La charge du composant est provoquée par cette accélération [8]



(a) Sinusoïdale.

(b) Triangulaire.

Figure I.4. Courbes de charge typiques [8].

Si la contrainte change son signe pendant un cycle, décrivant le régime de tension et de compression, on le dénote en tant que *contrainte renversée* (parfois également *alternative*). Si la charge est complètement de tension ou complètement compressive dans tout le cycle, elle est caractérisée comme un effort fluctuant ou pulsionnel. Pour caractériser le type de chargement, un paramètre supplémentaire est fréquemment employé, le *rapport de contrainte R*, souvent simplement appelé *le rapport R*. Il est défini comme : [8]

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (1.4)$$

Tableau I.1. Rapports importants de **R** [8].

Pulsation en compression		$\sigma_{max} < 0$	$R > 1$
Zéro-au-compression		$\sigma_{max} = 0$	$R = -\infty$
Renversé		$\sigma_m < 0$	$-\infty < R < -1$
Complètement renversé		$\sigma_m = 0$	$R = -1$
Renversé		$\sigma_m > 0$	$-1 < R < 0$
Zéro-au-tension		$\sigma_{min} = 0$	$R = 0$
Pulsation en tension		$\sigma_{min} > 0$	$0 < R < 1$
Statique		$\sigma_{min} = \sigma_{max}$	$R = 1$

Parfois on l'appelle *le rapport A* : [8]

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (1.5)$$

est utilisé qui prend la valeur $A = \infty$ pour $R = -1$, par exemple [8].

Si la charge n'est pas prescrite par des efforts appliqués, mais par d'autres paramètres, par exemple des contraintes, tous les paramètres sont changées en conséquence et le type de chargement est caractérisé en ajoutant un indice inférieur au rapport **R**, par exemple, le *rapport de contrainte R_ϵ* : [8]

$$R_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max}} \quad (1.6)$$

Selon l'équation (1.4), les charges renversées correspondent aux rapports négatifs de R , palpitant aux valeurs positives. Le tableau I.1 récapitule les rapports de R les plus communs. Les plus importants sont les cas du recyclage entièrement renversé (avec $\sigma_m = 0$ ou $R = -1$), de zéro-au-tension faisant un cycle (avec $\sigma_{min} = 0$ ou $R = 0$), et de zéro-au-cycle compressif (avec $\sigma_{max} = 0$ ou $R = -\infty$). Par conséquent, ces cas sont fréquemment employés dans les tables [8].

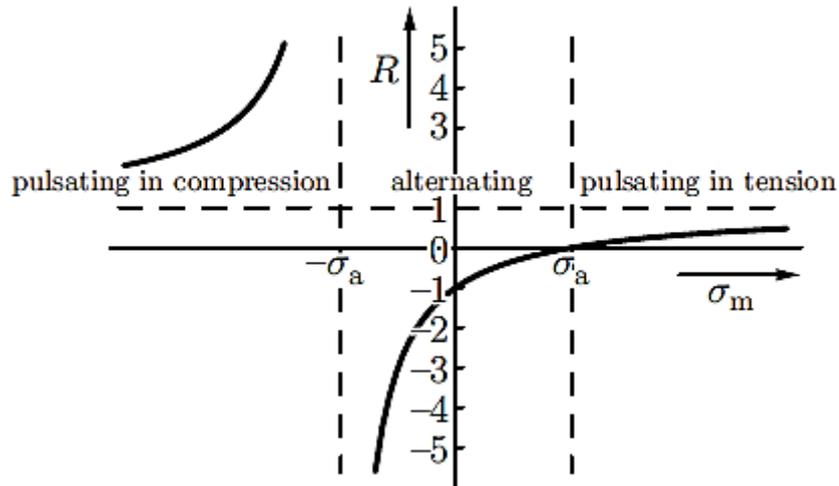
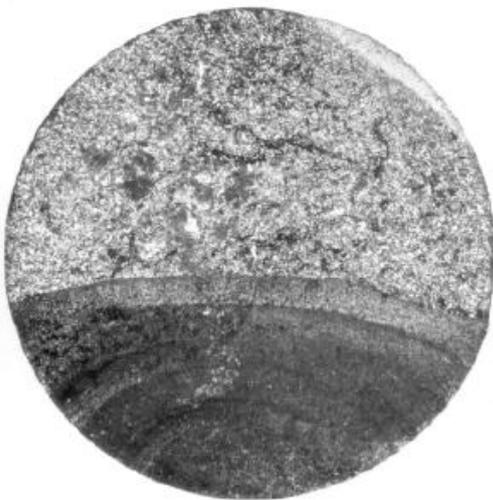
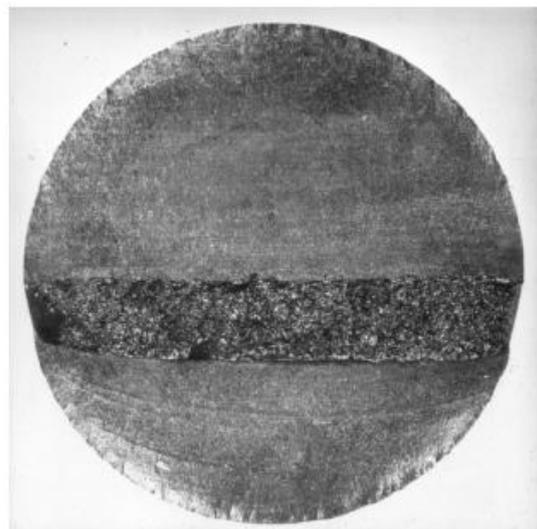


Figure I.5. Dépendance du rapport R sur la contrainte moyenne σ_m [8].



(a) Rupture de fatigue d'un axe d'un chariot par contrainte de plier-palpitation unilatéral.



(b) Rupture de fatigue bilatérale de courbure (diamètre **70 mm** d'axe).

Figure I.6. Exemples de rupture de fatigue. Les régions douces des surfaces, contenant la plage marque, sont provoquées par fatigue ; les régions approximatives sont les surfaces de la rupture finale [8].

La figure I.5 montre la dépendance du rapport R sur la contrainte moyenne σ_m , amplitude de contrainte constante σ_a [8].

En générale, le rapport R croit avec l'accroissement de la contrainte moyenne, avec l'exception de la transition entre les charges compressives et pulsionnelles. Ceci doit être maintenu dans l'esprit dans toutes les considérations concernant le rapport de R [8].

I.5. Courbe de fatigue

Le processus de l'accumulation progressive de dommages sous l'effet de la contrainte alternée menant aux changements de la structure et les propriétés du matériel, la nucléation et la croissance des fissures, et la rupture de volume se nomme fatigue (mécanique). Les contraintes peuvent changer à temps régulièrement ou irrégulièrement [3].

En cas de chargement cyclique, la courbe de fatigue rapporte les informations les plus complètes sur la résistance à la fatigue des composants d'une structure. Cette information est habituellement obtenue expérimentalement en raison des essais longs d'un grand nombre (ou des séries) de spécimens nominalemt identiques [3].

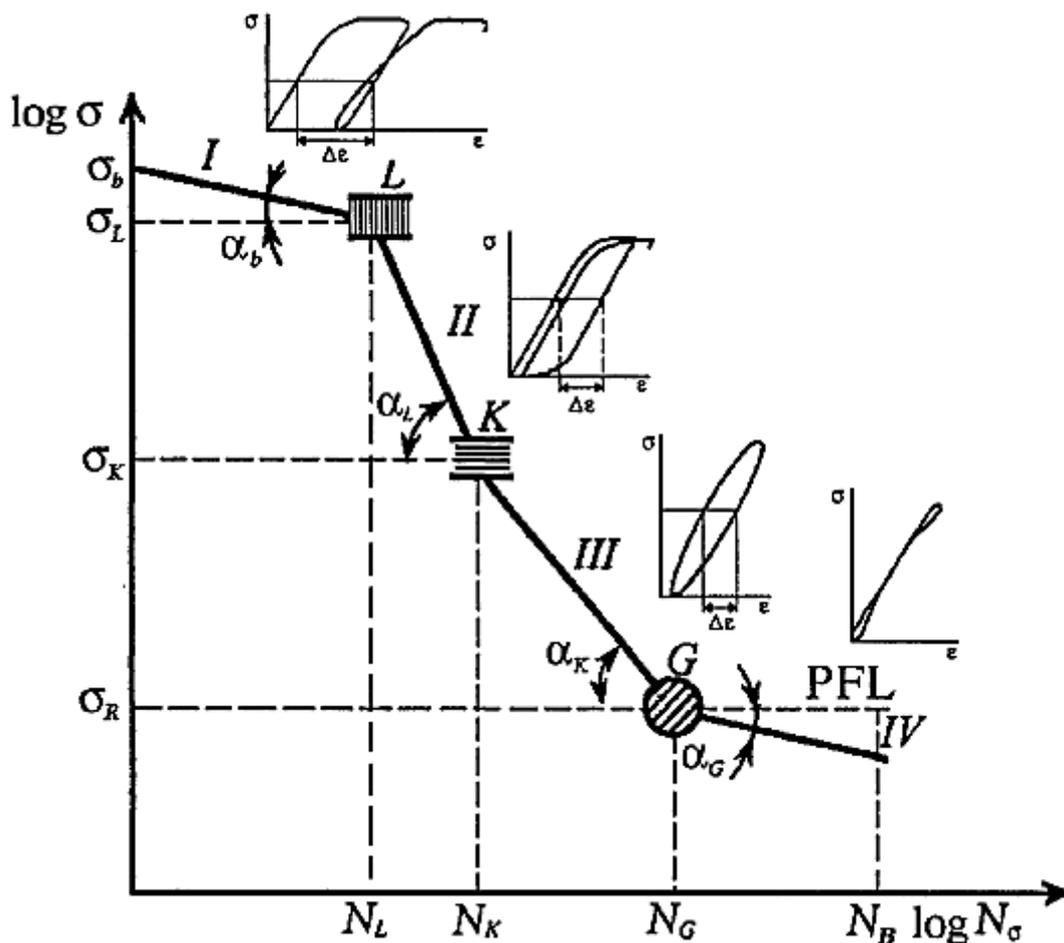


Figure I.7. Diagramme logarithmique de courbe complète de la fatigue mécanique [3].

La courbe complète de fatigue (figure I.7) est une relation entre l'amplitude des (ou la valeur maximum) contraintes σ et la longévité cyclique (le nombre de cycles jusqu'à la rupture) N_σ dans toute la gamme de leurs changements possibles : $\sigma \leq \sigma_b$ et $1 \leq N_\sigma \leq 10^9$ **cycles**. Si $\sigma = \sigma_b$, alors $N_\sigma = 1$, c-à-d la rupture statique peuvent servir comme un cas frontière de rupture de fatigue [3].

La rupture de volume du spécimen examiné (sa séparation en deux pièces) ou du moment quand la crique de fatigue atteint une certaine longueur (de préérilage), par exemple, **0.5** ou **1.0 millimètre** (dommages extérieurs), peut servir de critère final d'état en évaluant la longévité [3].

Si la courbe de fatigue est tracée dans la double notation logarithmique de coordonnées **$\log \sigma - \log N_\sigma$** , les quatre régions typiques apparents (**I, II, III, IV**) habituellement représentés par des segments d'une ligne droite et ayant différentes angles d'inclinaison α de l'axe des abscisses (figure I.7) [3].

Les changements relativement grands de la longévité avec de petits changements des contraintes sont typiques pour la région **I** de la fatigue quasi-statique. La rupture pendant les essais de l'acier mol est due à l'évolution de la déformation forte en plastique : la relation $\sigma - \varepsilon$ dans un cycle de chargement représente une boucle ouverte d'hystérésis en plastique. Les spécimens résistent habituellement de plusieurs **dizaines** au plusieurs centaines (parfois jusqu'à **mille**) de cycles [3].

Dans l'opposition, un changement relativement petit de la longévité avec une baisse significative de la contrainte est typique pour la région **II** de la fatigue de bas-cycle. La rupture est dans ce cas-ci due au processus de la déformation élasto-plastique : la relation $\sigma - \varepsilon$ dans un cycle de chargement est une hystérésis de boucles élasto-plastiques non fermés. On observe la fatigue de bas-cycle dans la marge de la longévité approximativement de **10^3 ... 10^4 cycles** [3].

Pour la courbe **III** de la fatigue de multi-cycle, l'angle d'inclinaison α_k est inférieur à l'angle d'inclinaison α_l de la courbe de la fatigue de bas-cycle, mais elle est habituellement plus grande que l'angle d'inclinaison α_b de la courbe quasi-statique de fatigue. La rupture est due à l'accumulation de la déformation non-élastique : la relation $\sigma - \varepsilon$ représente une boucle bloquée d'hystérésis mécanique. Puisque la micro-plasticité se développant dans les composants structuraux séparés du matériel devient responsable de la rupture de fatigue dans cette région, il a un modèle quasi-fragile ; il implique que le spécimen examiné ne manifeste aucune déformation résiduelle mesurable. Cependant, les études à microscope électronique des ruptures de fatigue multi-cycle indiquent les mécanismes de la rupture visqueuse et fragile. La longévité pendant la fatigue de multi-cycle est approximativement dans l'intervalle de **$5 \cdot 10^4$ - $5 \cdot 10^6$ cycles** [3].

La région **IV** du giga-fatigue (essais dans l'air à la température ambiante) se produit seulement avec les matériaux possédant une structure instable. Si la structure du matériel

examiné n'est pas soumise au vieillissement de déformation, une partie horizontale apparaît sur la courbe de fatigue correspondant à la limite (physique) de fatigue (voire la ligne pointillée dans figure I.7). La boucle d'hystérésis mécanique dans la région **IV** se dégénère : la relation $\sigma - \epsilon$ devient pratiquement proportionnel, bien que quelques particularités soient possibles (les boucles secondaires) dans le commencement et à la fin d'un cycle de chargement. La rupture est due au nano-plasticité et a, en règle générale, la nature fragile ; la longévité dépasse 10^7 cycles [3].

Habituellement deux discontinuités de la courbe de fatigue sont présentes dans les zones de la transition d'une région à l'autre (les zones **K**, **L**), elles montrent que le mécanisme de domination de rupture a changé [3].

Si la courbe complète de fatigue apparaît comme indiquée dans la figure I.7, il est clair que sa description analytique ne puisse pas être représentée comme équation simple. D'une part, puisque les parties **I-IV** de la courbe complète de fatigue tracée dans de doubles coordonnées logarithmiques sont les lignes droites, elles peuvent être décrites par l'équation exponentielle la plus simple : [3]

$$\sigma^{m_\sigma} N_\sigma = C_\sigma = \text{Constante} \quad (I.7)$$

Avec ses propres (pour chaque partie) paramètres m_σ et C_σ . Ils sont faciles à trouver en fournissant les coordonnées des points **L**, **K** et **G** sont connus. Aucune coupure de la courbe de fatigue au point **K** n'est trouvée dans quelques expériences, puis les portions **II** et **III** sont rapprochés par une ligne lisse simple [3].

Procédant à partir du l'au-dessus-dit, on peut considérer que le σ_L est la limite de fatigue quasi-statique, σ_K est la limite de fatigue de bas-cycle, σ_G est la limite de fatigue de multi-cycle (pour le cas où le giga-fatigue apparaît). Au cas où ce dernier n'apparaîtrait pas, la limite de fatigue de multi-cycle se nomme la limite d'endurance σ_R ; ici l'index **R** indique le coefficient de l'asymétrie du cycle de contrainte. Si le cycle palpite, alors $R_\sigma = 0$; quand le cycle est symétrique alors $R_\sigma = -1$ [3].

En règle générale, la courbe complète de fatigue est tracée en utilisant les contraintes nominales, c.-à-d. quand le calcul agit sur n'importe quelle déformation plastique possible (dans les parties **I** et **II**) est négligé (ignoré) [3].

Dans la pratique seulement la courbe de fatigue de multi-cycle est obtenue plus souvent; elle est simplement nommée la courbe de fatigue (figure I.8) ou la courbe **S-N**, ou la courbe de **Wöhler**. Les numéros de base d'essai $N_B = 10^7$ (pour les métaux ferreux) et $N_B = 2.10^7$ (pour les métaux non ferreux) cycles. Des essais sont habituellement réalisés par le recourbement autour des spécimens avec leur rotation, c.-à-d. avec un cycle symétrique des changements des contraintes du temps. La limite de résistance σ_{-1} correspond au trait horizontal dans la figure I.8 et divise la région des changements possibles de l'importance contraintes cycliques en deux sous-région : $\sigma > \sigma_{-1}$ (la rupture de fatigue a lieu) et $\sigma < \sigma_{-1}$ (la

rupture de fatigue n'a pas lieu jusqu'à ce que la base d'essai N_B soit atteinte). Par conséquent, σ_{-1} est la frontière (basée sur des contraintes) entre la résistance et la fatigue des matériaux (des spécimens). La branche gauche de la courbe de fatigue représentée schématiquement par deux lignes d'intersection dans la figure I.8 peut également inclure une partie de la courbe **LK** de la fatigue de bas-cycle (figure I.7) ; l'équation $\sigma^{m_\sigma} N_\sigma = C_\sigma = \text{Constante}$ le décrit dont lequel le paramètre d'inclinaison : [3]

$$m_\sigma = \cot \alpha = \frac{\log N_2 - \log N_1}{\log \sigma_1 - \log \sigma_2} \quad (1.8)$$

Et la constante de résistance à la fatigue : [8]

$$C_\sigma = \sigma_{-1}^{m_\sigma} N_{G\sigma} \quad (1.9)$$

où $N_{G\sigma}$ – l'abscisse du point de rupture de la courbe de fatigue, et $(\sigma_1, N_1), (\sigma_2, N_2)$ – coordonnées de deux points sur sa branche gauche (figure I.8). Si $\log \sigma_1 - \log \sigma_2 = 1$, alors la formule qui exprime m_σ , le paramètre m_σ est l'incrément logarithmique de la longévité des spécimens quand le logarithme des contraintes est réduit par une unité [3].

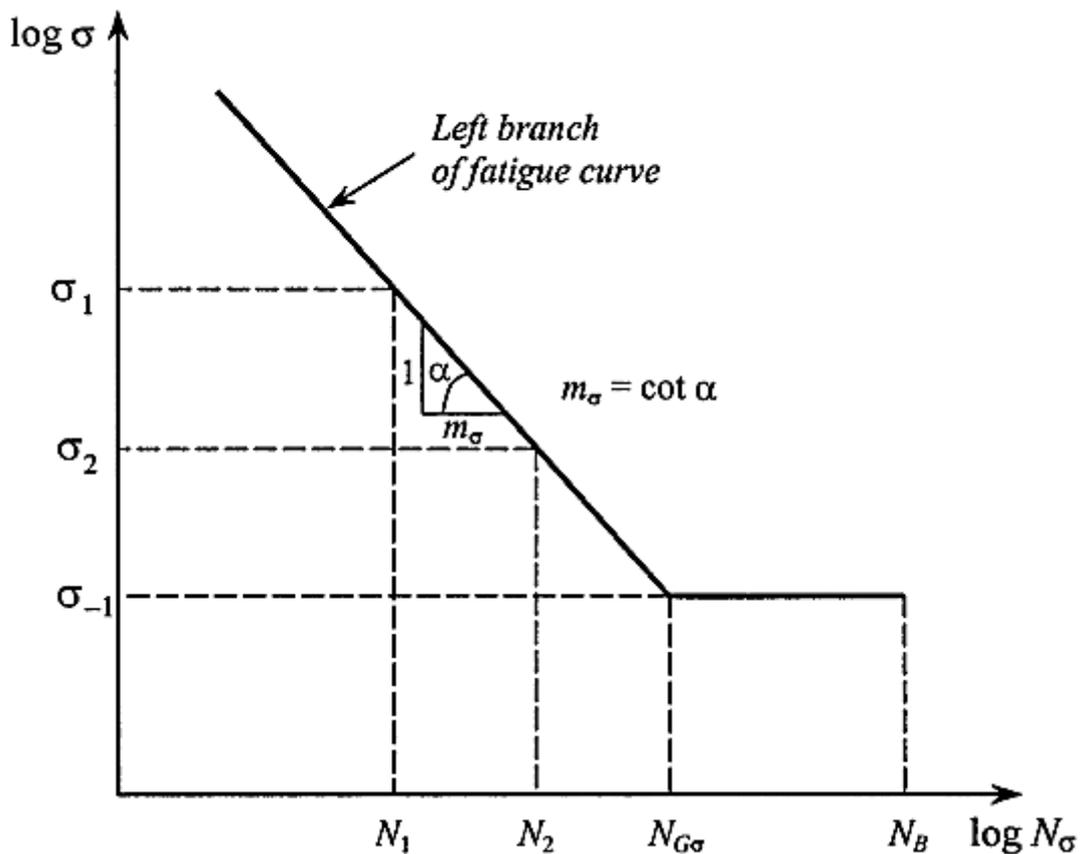


Figure I.8. Courbe de fatigue dans la région multi-cycle. [3]

Les essais de fatigue avec un cycle de contrainte symétrique sont dus préférable à plusieurs considérations. D'abord, le cycle symétrique est plus dangereux (figure I.9) et l'évaluation des dommages devient plus sensible. En second lieu, si la valeur σ_{-1} est connue, elle peut être recalculée dans la limite de fatigue à n'importe quel cycle asymétrique (figure I.9), si la dépendance de l'amplitude ultime de contrainte $\lim \sigma_a$ à la contrainte moyenne dans le cycle σ_m est approximée par une ligne droite (ligne pointillée) qui est mentionnée à la marge de sécurité : [3]

$$\sigma_{-1} = \frac{\lim \sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_y}} = \frac{\sigma_R}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_y}} \quad (I.10)$$

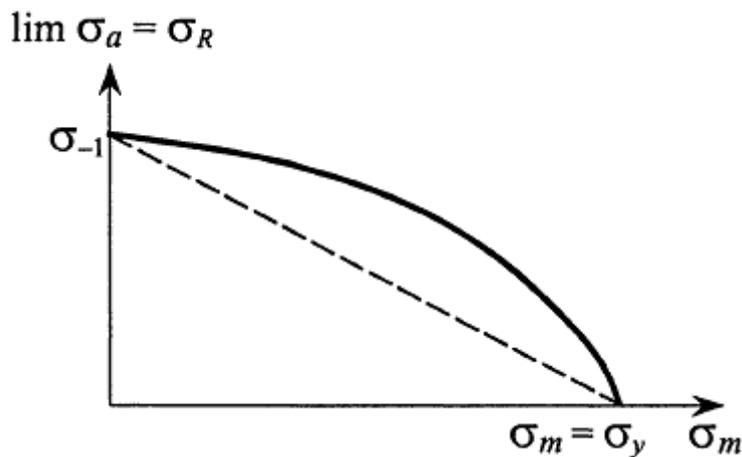


Figure I.9. La dépendance de l'amplitude ultime σ_a sur la valeur moyenne σ_m des contraintes dans le cycle [3].

Troisièmement, la limite de fatigue pendant le recourbement avec la torsion a une relation proportionnelle régulière à la résistance finale de l'acier : [3]

$$\sigma_{-1} = (0.4...0.6) \sigma_b \quad (I.11)$$

Par conséquent, connaissant juste la résistance finale, il est toujours possible de faire une évaluation approximative de la limite de fatigue assumant que $\sigma_{-1} \approx 0.5 \sigma_b$. Quatrième et dernier, il y a une relation stable pour l'acier entre les limites de la contrainte de torsion τ_{-1} et pendant le recourbement avec la rotation σ_{-1} : [3]

$$\tau_{-1} = (0.5...0.6) \sigma_{-1} \quad (I.12)$$

Donc, sur la moyenne : [3]

$$\tau_{-1} \approx 0.27 \sigma_b \quad (I.13)$$

La valeur σ_{-1} peut être déterminée plus précisément si des caractéristiques de base des propriétés mécaniques de l'acier sont connues de la formule : [3]

$$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_b - \sigma_y}{0.75 \left[\frac{\delta}{\psi} \left(7.5 - 4.167 \frac{\delta}{\psi} \right) - 1 \right]} \quad (1.14)$$

cela peut également être enregistré par la dureté de **Brinell HB** considérant que : [3]

$$\sigma_b - \sigma_y = 0.35HB \left(1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_b} \right) \quad (1.15)$$

Ici δ et ψ – élongation relative et contraction durant la rupture. Les équations (1.11) et (1.15) ont été validées expérimentalement [3].

Ainsi, la courbe de fatigue (figure 1.8) sert à déterminer expérimentalement toutes les caractéristiques de base de la résistance du matériel aux charges alternatives, y compris la limite de fatigue comme caractéristique la plus essentielle. En même temps l'équation (1.7) permet de calculer la longévité cyclique N_σ en fonction de la contrainte normale σ : [3]

$$N_\sigma = \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma} \right)^{m_\sigma} N_{G\sigma} = \frac{C_\sigma}{\sigma^{m_\sigma}} \quad (1.16)$$

Selon cette formule, la longévité est inversement proportionnelle à la contrainte cyclique, (à la puissance de m_σ), en attendant, si $\sigma = \sigma_{-1}$, alors $N_\sigma = N_{G\sigma}$, et si $\sigma < \sigma_{-1}$ alors $N \rightarrow \infty$ (c-à-d on suppose que la rupture de fatigue ne se produira pas) [3].

1.6. Mécanisme de la fatigue des métaux

Dans cette section, nous discutons les mécanismes des dommages et de la défaillance de fatigue en métaux [8].

La surface de rupture d'un métal qui a échoué dans le chargement cyclique a un aspect caractéristique. La figure 1.6 fournit deux exemples de telles ruptures de fatigue. Dans presque tous les cas, un lisse, macroscopiquement faiblement déformées, la région et une région approximative peuvent être discernés. C'est dû aux différentes étapes de l'évolution de dommages sous les charges cycliques :

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

1.6.1. Initiation de la fissure

Dans la plupart des cas, une rupture de fatigue commence à une position fortement chargée du composant. La charge élevée peut être provoquée par une surcharge, produisant

quelques dommages initiaux dans le composant qu'il est difficile à détecter, mais peut causer la défaillance finale [8].

Des concentrations de contrainte locales sont souvent provoquées par des entailles. Les entailles font partie de la conception (par exemple, aux roulements ou aux dégagements), peuvent être causées pendant la fabrication (par exemple, marques d'outil provoquées par le découpage en métal), ou peuvent être dues aux imperfections dans le matériel (par exemple, pores de bâti, précipités fragiles) [8].

Les défauts microscopiques ou les fissures soient habituellement non pertinentes sous les charges statiques parce qu'ils sont plus petits que la longueur critique de la fissure. Si les charges sont cycliques, des défauts beaucoup plus petits, comme le bâti étudié à fond ou les inclusions, peuvent initier des fissures de fatigue. La résistance de fatigue d'un matériel est ainsi beaucoup plus sensible au processus de fabrication et aux défauts matériels que la résistance statique [8].

Le métal qui travaille (par exemple, roulement ou forgeage) est une manière pour enlever des défauts pendant la fabrication, fermer les cavités et changer la microstructure non homogène de bâti en structure à grain fin constituée par la recristallisation. Pour cette raison, les composants qui ont été fabriqués par cette manière ont habituellement une limite de fatigue plus élevée que les pièces coulées [8].

Les processus du métal fonctionnants, cependant, ne peut pas toujours être utilisé. Une forme complexe des coûts composants ou supplémentaires peut être exigée pour produire la forme du filet par le bâti. En outre, les matériaux de haute résistance ne sont souvent pas appropriés au fonctionnement en métal. Par exemple, des lames de turbine des turbines à gaz stationnaires sont souvent produites par le moulage de précision pour permettre l'utilisation des matériaux avec de haute résistance à la température de service qui, cependant, ne peut pas être forgée. Ces lames sont cycliquement chargées en raison des fluctuations dans l'écoulement de gaz. Les lames de la dernière étape ont une forme mince de sorte que des contraintes élevées soient produits par ces charges cycliques. Pour enlever des pores de bâti, ils sont souvent rendus compacts après le moulage par le pressage isostatique chaud aux températures d'environ **1200° C** et aux pressions entre **100 MPa** et **200 MPa** [8].

Même si le composant est au commencement sans défaut, on ne le garantit pas qu'aucune fissure ne formera pas. Des fissures sont initiées par une rugosité de la surface du composant sous les charges cycliques (voir la figure I.10) provoquées par déformation en plastique. Cette déformation est due au mouvement de dislocation aux contraintes en-dessous de la limite conventionnelle d'élasticité $R_{p0.2}$ (La limite conventionnelle d'élasticité $R_{p0.2}$ est définie comme la contrainte correspondante à une contrainte en plastique de **0.2 %**. Pour ceci, une certaine quantité de mouvement de dislocation est nécessaire), qui est insignifiante sous les charges statiques. Cependant, pendant le chargement cyclique, ces

petites déformations en plastique accumule et initie une fente comme discuté ci-dessous. Le mouvement de dislocation cause une hystérésis dans le diagramme de contrainte-tension (voir la figure I.11). Le secteur inclus égale l'énergie dispersée par cycle et volume unitaire. Si un composant est déformé cycliquement, la densité et la position des dislocations et ainsi sa résistance change. Ceci s'appelle *la répétition dure* ou *douce* [8].

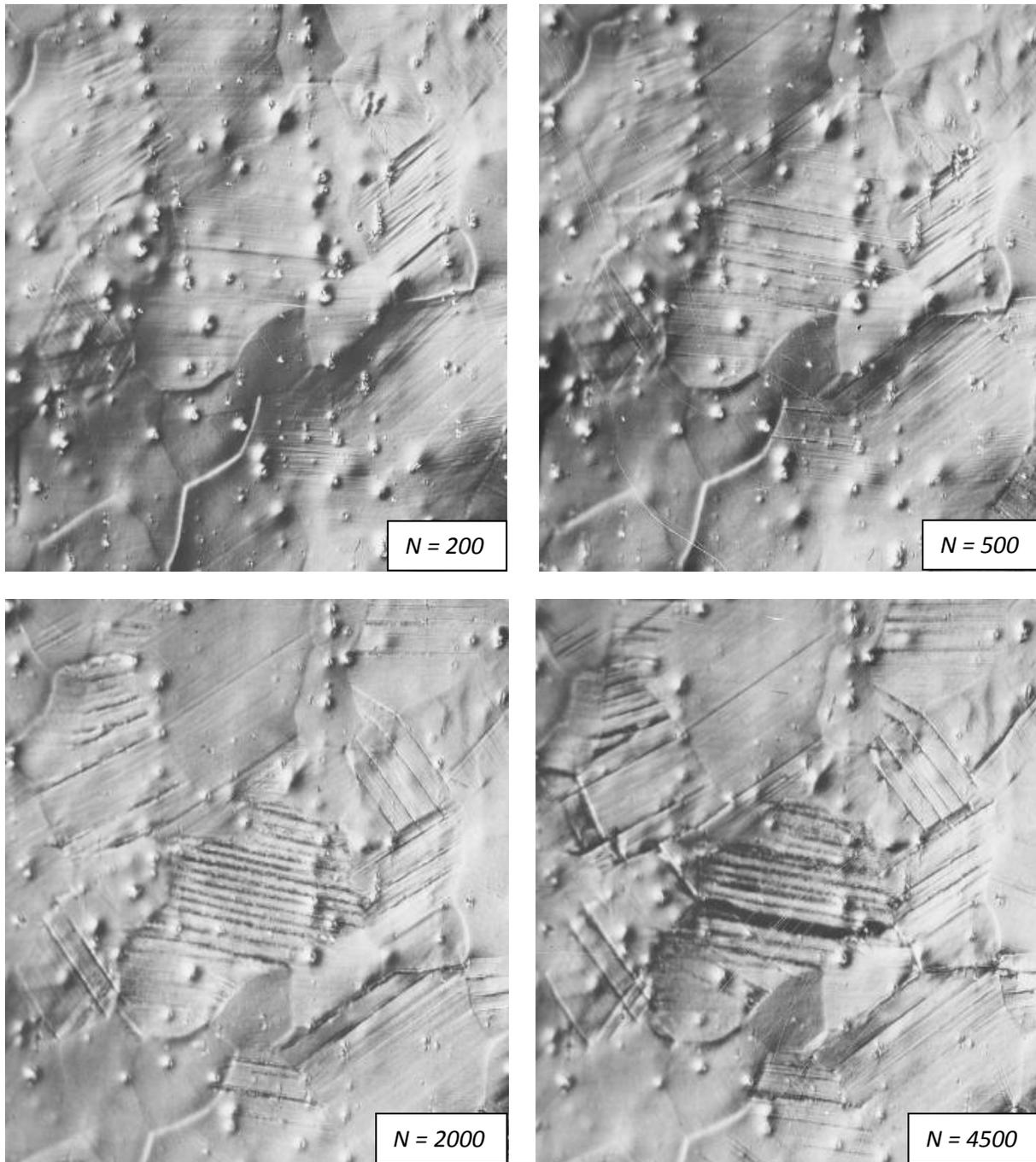


Figure I.10. Formation des bandes de glissement dans **AlMg₃** dans une expérience contrainte-contrôlée de fatigue ($R_\epsilon = -1$, $\epsilon_a = 0.5\%$, grosseur du grain $50\ \mu\text{m}$). Micrographie optique (après (148)) [8].

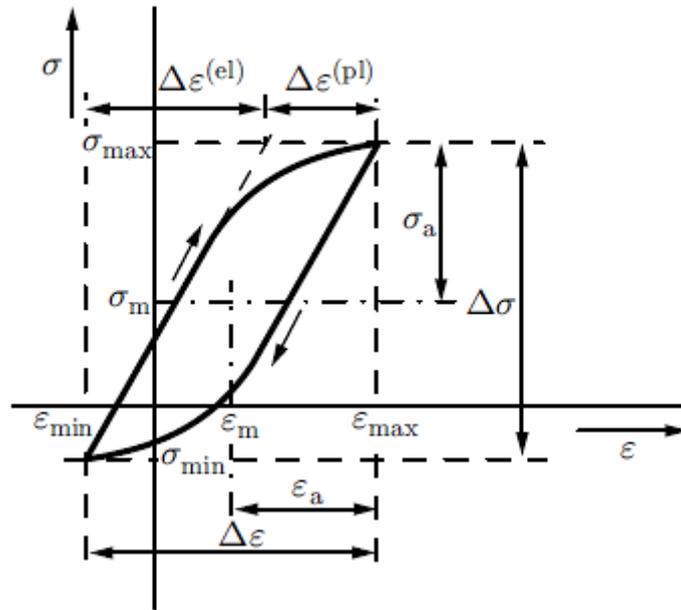


Figure I.11. Tracé schématique d'une hystérésis dans la réponse contrainte-déformation sous un chargement cyclique [8].

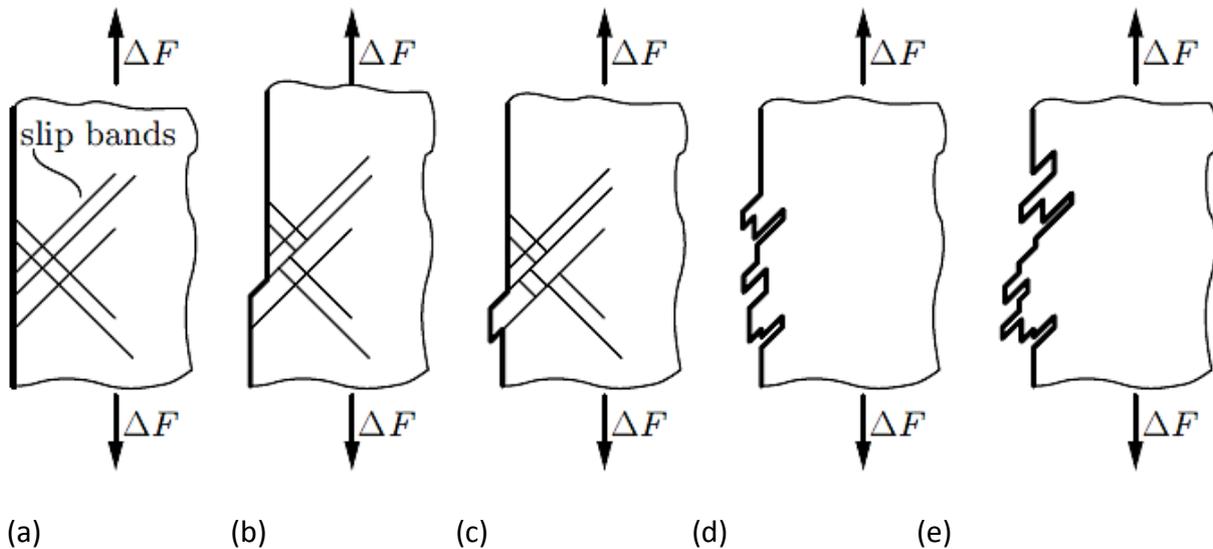


Figure I.12. Formation des intrusions et des extrusions dues au chargement cyclique [8].

Pendant les cycles, les petites déformations en plastique irréversibles se produisent sur les bandes de glissement parallèles qui causent l'accumulation des extrusions et les intrusions sur la surface. Le nombre de cycles augmente du gauche au droite [8].

La figure I.12 montre comment le mouvement de dislocation sur des rabots de glissement peut rendre une surface rude en formant des extrusions et des intrusions. Étapes sur la surface constituée par la glissement du matériel (la figure I.12 (b)) ne sont pas complètement enlevés sur l'inversion de charge puisqu'une dislocation qui s'est déplacée dans une direction

ne retournera pas nécessairement dans sa position originale. Au lieu de cela, une autre dislocation peut se déplacer et causer la déformation en plastique, menant à une rugosité de la surface initialement lisse. En outre, une couche mince d'oxyde de quelques épaisseur de nanometre forme sur une surface fraîchement créée en air. Ainsi, le matériel ne peut pas ressouder même si la déformation est complètement réversible, et une fente pointue est initiée [8].

Tout à fait, un grand nombre de formes d'entailles extérieures qui servent comme points de départ aux fissures. Ces fissures propagent dans le matériel, s'élevant le long des rabots de glissade cristallographiques. Elles se développent préférentiellement dans les grains avec les rabots de glissade qui sont orientés approximativement à 45° à la contrainte principale maximale. La formation des bandes de glissade de fatigue est montrée sur la figure I.10 dans un alliage d'aluminium ($AlMg_3$) sous le chargement cyclique contrainte-contrôlé. La figure I.13 montre des extrusions et des intrusions, l'initiation se dirige pour des fissures, à la surface d'un acier de ferrite [8].

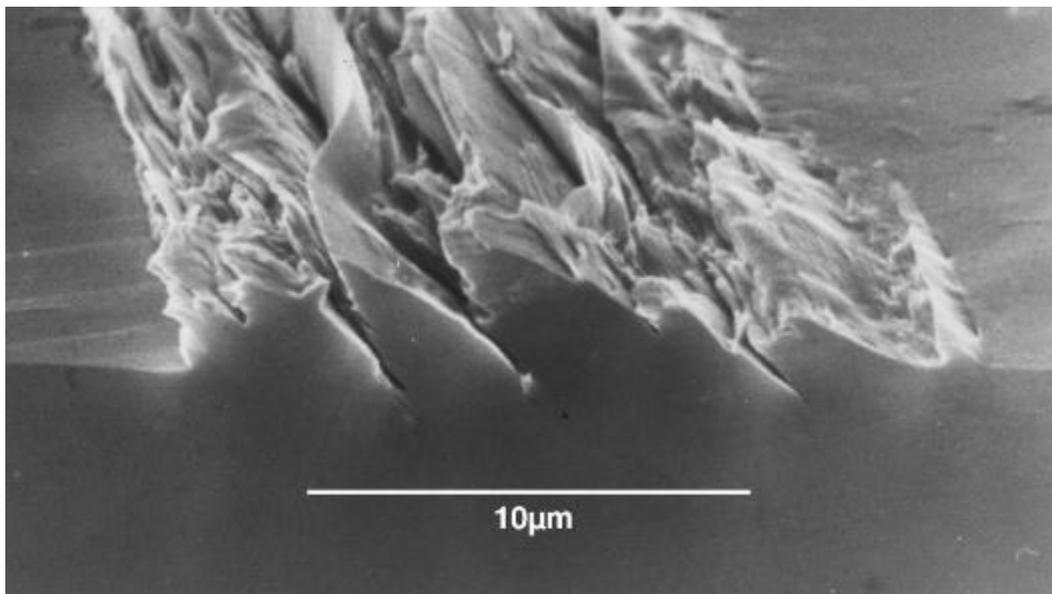


Figure I.13. Micrographe de microscope à balayage électronique des extrusions dans un acier de ferrite [8].

Les microfissures récemment formées ne sont pas au commencement chargées dans le mode *I*, mais dans le mode *II* ou *III*. Cette étape de la propagation de fissure de fatigue s'appelle l'étape *I* de propagation. Pendant cette étape, la progression de la fissure est lente. Si la fente atteint un joint de grain, elle doit propager dans un grain voisin, habituellement avec les systèmes de glissade moins favorablement orientés. Ceci peut ralentir ou même complètement arrêter la fente. Ainsi, beaucoup de fissures au commencement créées sont arrêtées, et seulement ceux qui commencent accidentellement tout au plus des conditions favorables pour se développer plus loin [8].

Avec l'augmentation de la progression de la fissure, la contrainte au bout de la fissure augmente jusqu'à ce que des moins systèmes de glissade bien-orientés puisse être activé. Ceci permet à la fente de changer son orientation en mode *I*, perpendiculaire à la contrainte principale maximale. La fente devient une macro-fissure. Cette étape du processus s'appelle l'étape *II* de propagation et sera discutée dans la prochaine section. La transition entre l'étape *I* et l'étape *II* se produit habituellement à une longueur de fissure approximativement de **0.05 mm** à **2 mm**. Habituellement, la longueur de transition est plus petite en matériaux de haute résistance que dans ceux avec la basse résistance. Puisque la concentration de contrainte est la plus grande à la plus grande fissure, cette fissure se développe plus rapidement, ayant pour résultat une fissure partant des autres derrière et dominant le processus de fatigue. Cette fissure cause finalement la défaillance du composant. La figure I.14 montre la transition entre l'étape *I* et l'étape *II* [8].

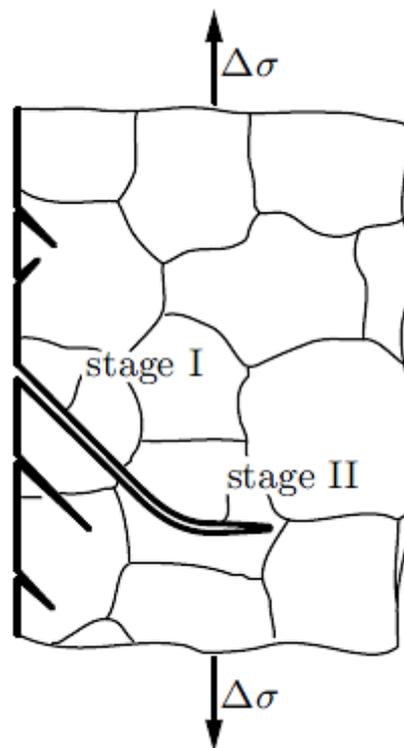


Figure I.14. Étapes *I* et *II* de la propagation des fissures [8].

Le déclenchement des fissures a besoin d'un long temps dans les spécimens doux chargés avec des contraintes bien en dessous de la limite conventionnelle d'élasticité, parce que la quantité de mouvement de dislocation est très petite dans ce cas-ci, de sorte que la plus grande partie du temps de la vie de composants soit passée pendant cette première étape. Si la surface est durcie, par exemple par de grenailage à écrouissage (durcissement de travail) ou la nitruration de l'acier, le mouvement de dislocation près de la surface est empêché plus loin. Ceci augmente la résistance à la fatigue. Cet argument est seulement valide si la propagation de la fissure commence sur la surface, pas aux défauts intérieurs. Si

le déclenchement de la fissure se produit aux défauts, comme des notes d'outil ou des pores, la résistance à la fatigue se réduit en conséquence [8].

Les défauts microscopiques n'ont pas une influence très forte sur la vie totale si l'amplitude de contrainte est grande et le nombre de cycles à la défaillance est petit (habituellement plus petit que 10^4 cycles). Dans ce cas-ci, les fissures initiales se forment comparativement rapidement par le mouvement de dislocation. L'augmentation du taux de propagation des fissures est plus petite, ayant pour résultat une plus grande partie de la période de vie du composant dépensé dans l'étape II de propagation. Cette étape est discutée dans la prochaine section [8].

I.6.2. Propagation des fissures (étape II)

Comme nous avons vu dans la section précédente, une fissure de fatigue se réoriente pendant la propagation des fissures pour être perpendiculaire à la contrainte principale maximale dès qu'une certaine longueur de fissure sera dépassée. La fissure est maintenant chargée dans le mode I (voir la figure I.15 (a)). En raison de la concentration de contrainte, des formes d'une zone de plastique à proximité directe du bout de la fissure (la figure I.15 (b) et (c)), causant une petite ouverture de fissure et une fente pareillement petite propagation de fissure. Lors du déchargement, la contrainte élastique dans le matériel en bloc est enlevée, et la fissure se ferme. Cependant, la fissure est élargie au bout de la fissure dû à la déformation en plastique localisée, ayant pour résultat des contraintes résiduelles compressives. Ces contraintes causent une déformation en plastique opposée et ferment la fissure même au bout de la fissure (la figure I.15 (d)). Lors du déchargement, le contact de surfaces de fissure avant la charge externe est réduit à zéro (la figure I.15 (e)). C'est dû à la déformation en plastique qui cause une rugosité des surfaces des fissures. En outre, la fissure suit souvent les plans cristallographiques dans les grains, ayant pour résultat la rugosité sur l'échelle du grosseur du grain. Les contraintes de compression sont non critiques puisqu'ils sont transférés sur les surfaces fissurées (la figure I.15 (f)). Pendant un cycle simple, il y a ainsi une certaine propagation des fissures parce que la fissure ne revient pas à sa position initiale [8].

La charge de tension dans le prochain cycle rouvre la fissure. En raison de la contrainte résiduelle compressive dans le matériel déchargé, une certaine contrainte de seuil minimale est exigée. Les charges externes qui sont plus petites que la contrainte résiduelle n'ouvrent pas la fissure et ne peuvent pas causer ainsi la propagation des fissures. Si la contrainte est dépassé, la fissure propage encore par un certain incrément, ayant pour résultat une longueur de fissure qui se développe avec chaque cycle et ainsi dans une progression considérable de la fissure. Puisque la fissure ne se propage pas plus loin sous les charges statiques, la propagation des fissures est stable [8].

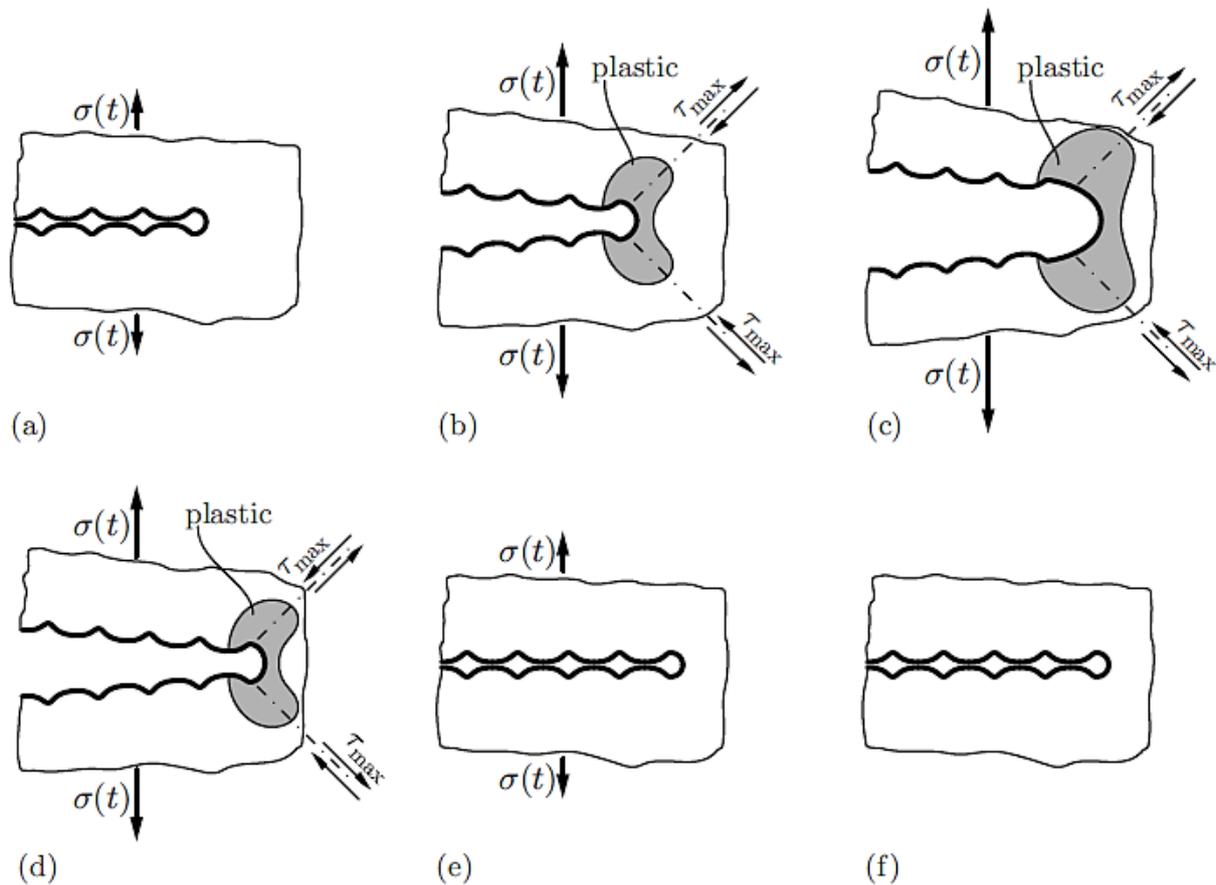
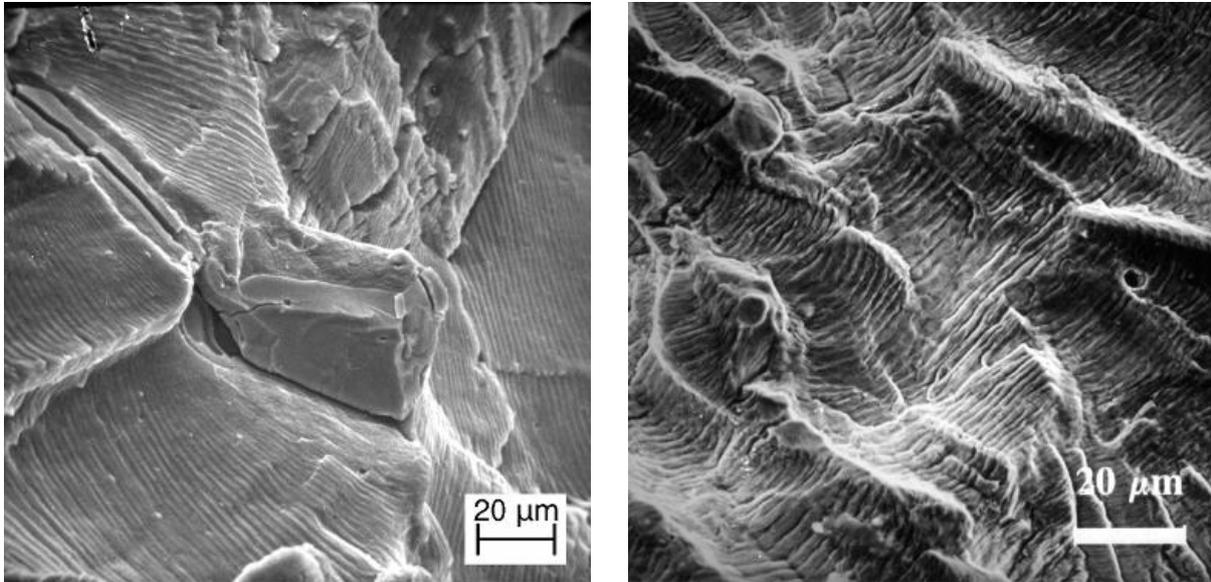


Figure I.15. Modèle de propagation des fissures sous le chargement cyclique. Lors du chargement ((b) et (c)), la région près du bout des pointes produites des fissures. La fissure propage stablement, émoussant le bout de la fissure. Lors de déchargement (d), la fissure ovale est comprimée. En raison de la déformation, le surfaces de contact fissurées avant la charge externe est zéro (e). Après le déchargement complet, les contraintes résiduelles demeurent, comprimant la fissure (f) [8].

Fréquemment, la propagation des fissures peut être vue sur la surface de fissure de fatigue en tant que soi-disant striations de fatigue (la figure I.16), avec une distance qui dépend de la charge et est habituellement entre $0.1 \mu\text{m}$ et $1 \mu\text{m}$. Cette distance est une mesure approximative de la propagation des fissures par cycle (Chaque striation est produite en exactement un cycle, mais pas chaque cycle produit d'une striation). Macroscopiquement, les striations sont invisibles et la surface de fissure de fatigue semble plutôt lisse. La formation des striations est due à la déformation en plastique près du bout de la fissure représenté sur la figure I.15 [8].

Même avec l'oeil nu, de soi-disant *notes de plage* (parfois également appelées *les lignes d'arrêt*) peuvent fréquemment être discernées sur la surface de rupture (voir la figure I.9). Elles sont dues aux changements de la charge pendant le service composant par exemple, un changement de la vitesse de révolution, d'une surcharge à court terme, ou d'un

temps de panne de machine pendant un week-end. Ces changements causent les différences locales dans l'aspérité ou l'oxydation extérieure qui sont évidentes comme notes de plage. L'arrangement des notes de plage le rend souvent facile de déterminer la position de la fissure initiale et de la direction de propagation des fissures [8].



(a) Striations dans $AlCu_5$. Les striations sont guidées à la particule de Al_2Cu .

(b) Striations en cuivre.

Figure I.16. Micrographe de microscope à balayage électronique des striations sur deux surfaces de rupture de fatigue [8].

La propagation des fissures dans un spécimen est également déterminée par le grosseur du grain. Plus les grains sont grands, plus les surfaces fissurées seront rugueuses. Par conséquent, les surfaces toucheront plus tôt pendant le déchargement, causant de plus grandes contraintes de compression. Pour ouvrir la fissure encore, un plus grand effort est nécessaire ainsi. Le taux de propagation des fissures est ainsi plus petit en matériaux à grain grossier que dans les à grain fin. C'est différent dans les spécimens sans fissures initiales. Dans ce cas-ci, la résistance à la fatigue du spécimen à grain fin est plus grande parce que sa résistance est plus haut due au joint de grain renforçant, rendant le déclenchement de la fissure sur la surface plus difficile [8].

I.6.3. Rupture finale

La rupture finale se produit quand la fissure a augmenté à une taille où le facteur d'intensité de contrainte (d'après l'équation : $K_1 = \sigma\sqrt{\pi a} Y$; a : demi-longueur de la fissure ; Y : facteur géométrique) égale la dureté K_{Ic} de rupture du matériel. La fissure se

propage instablement dans tout le spécimen, causant la rupture catastrophique. L'aspect de la présente partie de la surface de rupture diffère de celle créée par croissance de fissure de fatigue. Macroscopiquement, la surface est déchetée ; au microscope, une surface de rupture alvéolée, une rupture de fendage fragile, ou un mélange des deux types résultats, selon la ductilité du matériel [8].

Même s'il y a une rupture ductile, aucune déformation en plastique significative ne peut être vue macroscopiquement puisque les déformations plastique près du bout de la fissure où les contraintes sont les plus hautes [8].

I.7. Fatigue sous chargements d'amplitude variable

La fatigue des matériaux et des structures est un domaine complexe dans lequel de multiples facteurs interviennent simultanément avec des couplages plus ou moins forts. La durée de vie d'une pièce résulte à la fois de sa conception (notamment sa géométrie), sa fabrication (procédé), des caractéristiques et du comportement du matériau et du chargement au sens large : incluant la température et l'environnement (figure I.17). Les effets de tous ces facteurs sur la durée de vie des structures sont connus - au moins qualitativement - mais il est toujours impossible de prévoir de façon fiable la durabilité des structures sans essais [6].

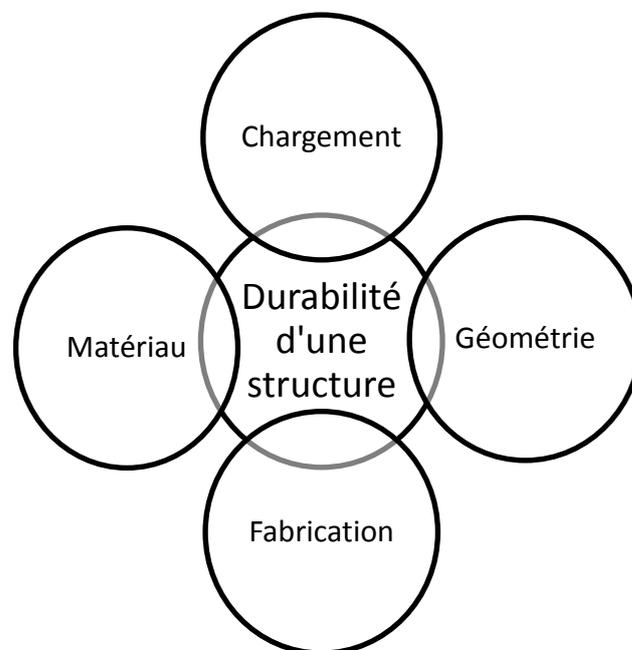


Figure I.17. Paramètres influençant la durée de vie d'une structure [6].

Les essais de fatigue sous chargements d'amplitude variable peuvent être classés en deux grandes familles : cumulatif ou séquence de chargement, et chargements aléatoires ; chacune de ces familles comprenant plusieurs sous groupes illustrés dans le tableau I.2. L'évolution croissante des techniques d'asservissement des moyens d'essais servo-hydrauliques, notamment grâce aux progrès des ordinateurs de pilotage, a permis de développer depuis les années **1970** les essais sous chargements aléatoires. Auparavant on se limitait souvent à des essais d'amplitude variable par blocs ou variable par cycles [6].

Il existe aussi des essais de fatigue d'amplitude variable pour lesquels les chargements ne sont pas décrits dans le domaine temporel mais dans le domaine fréquentiel par leur DSP. Ces essais sont notamment utilisés en aéronautique et dans le domaine spatial. On parle alors souvent de fatigue vibratoire mais ce n'est qu'une terminologie différente puisqu'il s'agit bien de chargements mécaniques évoluant au cours du temps et entraînant l'amorçage de fissures de fatigue et leur propagation éventuelle [6].

Tableau I.2. Différents types d'essais d'amplitude variable [6].

Séquence de chargement		Chargements aléatoires	
Essais programmés		Spectres	
Par blocs	Par cycles	Représentatifs	Réels
- Séquence conventionnelle (8 niveaux) - Séquence aléatoire	- Séquence standardisée	- Aléatoires - Stationnaires	- Directs - Modifiés

Chapitre II :

Effet d'entaille

II.1. Introduction

La fatigue des matériaux est un domaine très vaste qui peut être étudié sous différents aspects. Pour cela, beaucoup de gens du domaine ont fait des études et des essais pour essayer de voir l'influence des différents paramètres sur la fatigue. Dans ce chapitre, on va présenter l'effet d'entaille.

II.2. Effet d'entaille

Les entailles sont des changements brusques de la géométrie d'un composant. Elles peuvent être nécessaires pour des raisons de conception, par exemple dans une portée d'un roulement roulant, d'une rainure de clavette de plume, d'un perçage, ou d'un filet de vis pour un raccordement. Des entailles peuvent également être causées pendant la fabrication ou le service. Les exemples sont des cavités dans le bâti, des marques d'outils dans l'usinage, ou des marques d'usure en service. Les entailles causent des concentrations de contrainte locales et peuvent induire ainsi la défaillance prématurée si non correctement expliquée pendant la conception composante. Dans cette section, nous discuterons les théories qui permettent d'estimer comment les entailles affectent les contraintes et fournissent ainsi des outils pour la conception sûre des composants entaillés [8].

II.2.1. Facteur de concentration de contrainte

Dans une structure, des entailles géométriques telles que des trous ne peuvent pas être évitées. Les entailles causent une distribution non homogène de contrainte, voire la figure II.1, avec une concentration de contrainte à la « racine de l'entaille ». *Le facteur de concentration de contrainte* (théorique), K_t (K_t est désigné souvent sous le nom du facteur de concentration de contrainte théorique. Cependant, le facteur n'est pas théorique. Il est fondé sur l'hypothèse du comportement linéaire de matériel élastique), 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]

$$K_t = \frac{\sigma_{peak}}{\sigma_{nominal}} \quad (II.10)$$

On devrait souligner que toutes les déformations sont censées être élastiques. Le K_t est essentiellement un concept élastique. Il donne une indication directe de la sévérité de la concentration de contrainte, parce que c'est un facteur d'amplification au niveau de la contrainte qui est nominalement présente dans la section nette de l'entaille [1].

Parfois il est instructif pour voir le rapport entre la contrainte maximale de la contrainte brute S , appliqués à l'élément (Généralement, K_t est le facteur préféré pour indiquer la

concentration de contrainte). Ce rapport avec le symbole K_{tg} est (Les deux facteurs sont évidemment mis en corrélation) : [1]

$$K_{tg} = \frac{\sigma_{peak}}{S} \quad (II.11)$$

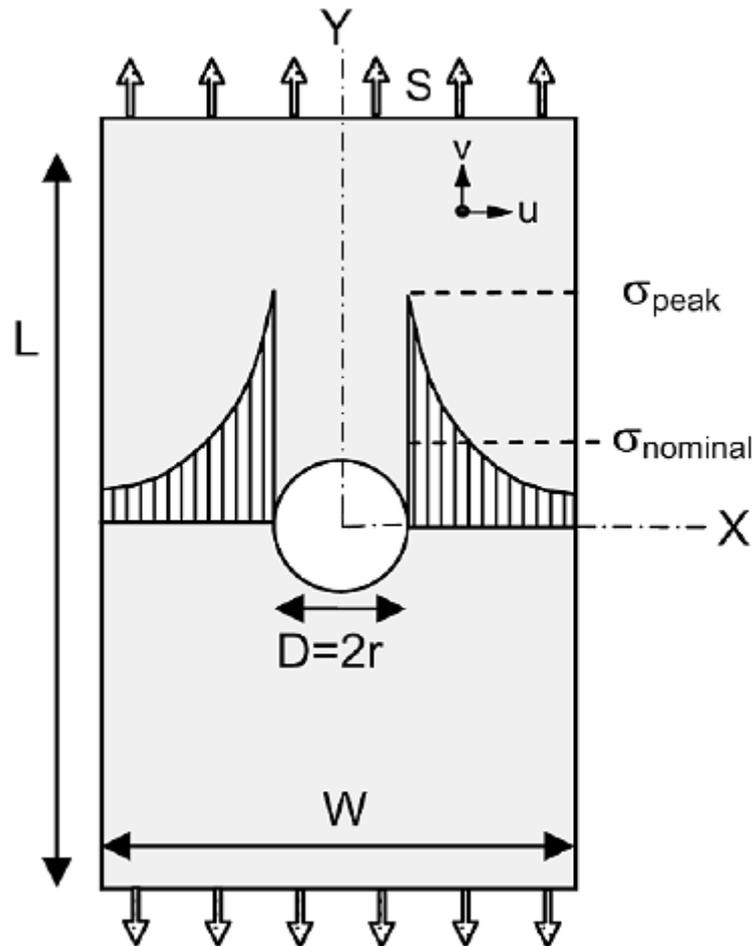


Figure II.1. Bande avec un trou central comme prototype d'une partie entaillée [1].

Les valeurs de K_t peuvent être obtenues avec différentes méthodes :

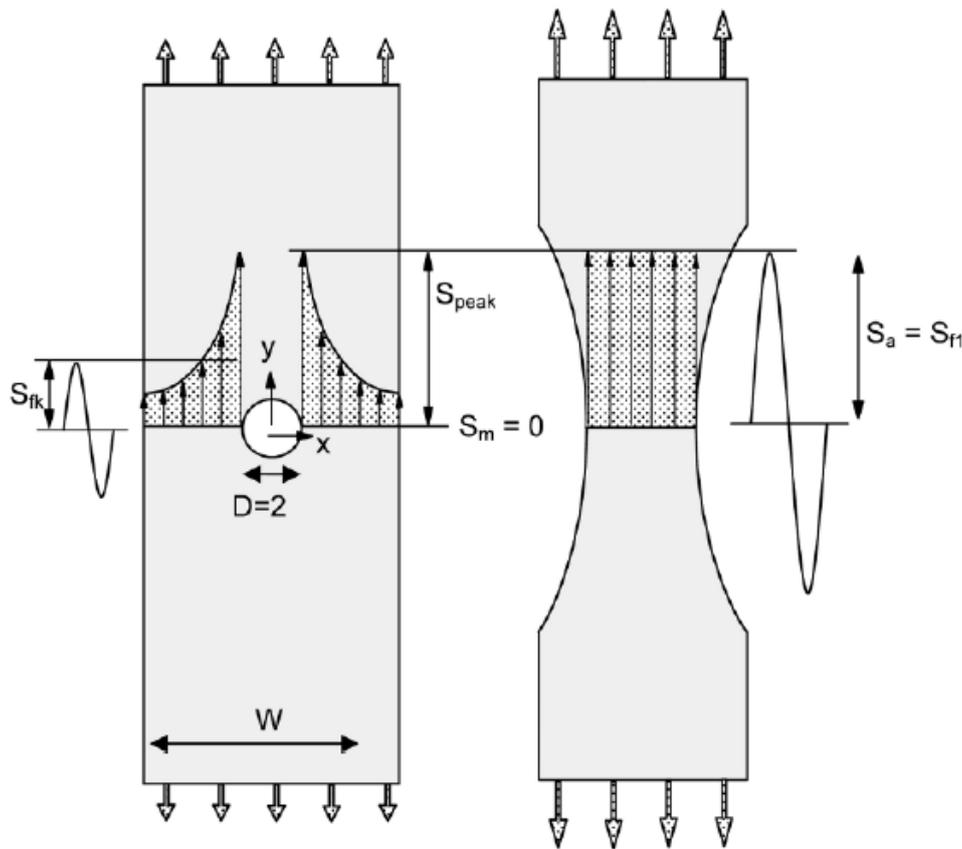
- Par des calculs : méthodes analytiques, méthodes des éléments finis,
- Par des mesures : mesures de jauge de contrainte, mesures photoélastiques [1].

II.2.2. Le principe de similitude et la sensibilité à l'entaille

Afin de comprendre et prévoir l'effet d'entaille et l'effet de taille sur la limite de fatigue, la définition de la limite de fatigue doit être rappelée. C'est la plus basse amplitude de contrainte qui est encore capable à nucléé une microfissure qui peut augmenter jusqu'à la défaillance, ou, pareillement l'amplitude de contrainte la plus élevée juste non capable de

créer une telle microfissure. Maintenant cette définition est dans l'esprit, le principe de similitude peut être appliqué pour comparer la fatigue dans un spécimen entaillé à la fatigue dans un spécimen sans entaille, voire la figure II.2. Si un cycle avec amplitude de contrainte S_a peut créer une microfissure dans le spécimen sans entaille, le même cycle de contrainte maximale dans le spécimen entaillé, S_{peak} , devrait également être capable pour créer une microfissure à la racine de l'entaille. Si S_a dans le spécimen sans entaille est la limite de fatigue (S_{f1}) de ce spécimen, alors parler dans le spécimen entaillé devrait correspondre à la limite de fatigue du spécimen entaillé (S_{fk}). Le principe de similitude mène ainsi à : [1]

$$S_{peak} = K_t S_{fk} = S_{f1} \quad (II.12)$$



(a) Echantillon entaillé.

(b) Echantillon non entaillé.

Figure II.2. Principe de similitude : le même S_{peak} à la limite de fatigue [1].

Cela implique que la limite de fatigue d'un spécimen sans entaille devrait être divisée par K_t pour obtenir la limite de fatigue du spécimen entaillé. Cependant, on lui a montré dans de nombreux essais de fatigue que *le facteur de réduction* est plus petit que K_t . Le facteur de réduction obtenu par des expériences est dénoté par le symbole K_f . Il implique que : [1]

$$S_{fk} = \frac{S_{f1}}{K_f} \quad (II.13)$$

K_f est également nommé comme le *facteur d'entaille de fatigue*. La donnée expérimentale a ainsi indiqué que : [1]

$$K_f \leq K_t \quad (II.14)$$

Il y a bien longtemps on a souvent observé que $K_f < K_t$, particulièrement pour de petits spécimens avec des valeurs de K_t élevées, et à plus forte raison pour les matériaux à faible résistance, tels que l'acier à faible teneur en carbone. Bien que $K_f < K_t$ limite apparemment l'applicabilité du principe de similitude, il convient de noter que l'inégalité est favorable. Si K_f est plus petit que K_t , il implique qu'un matériel est moins sensible à l'entaille que prévu par $K_f = K_t$. La sensibilité à l'entaille d'un matériel comme considérée par *Peterson* a été définie par un facteur q (*facteur de sensibilité à l'entaille*) comme : [1]

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (II.15)$$

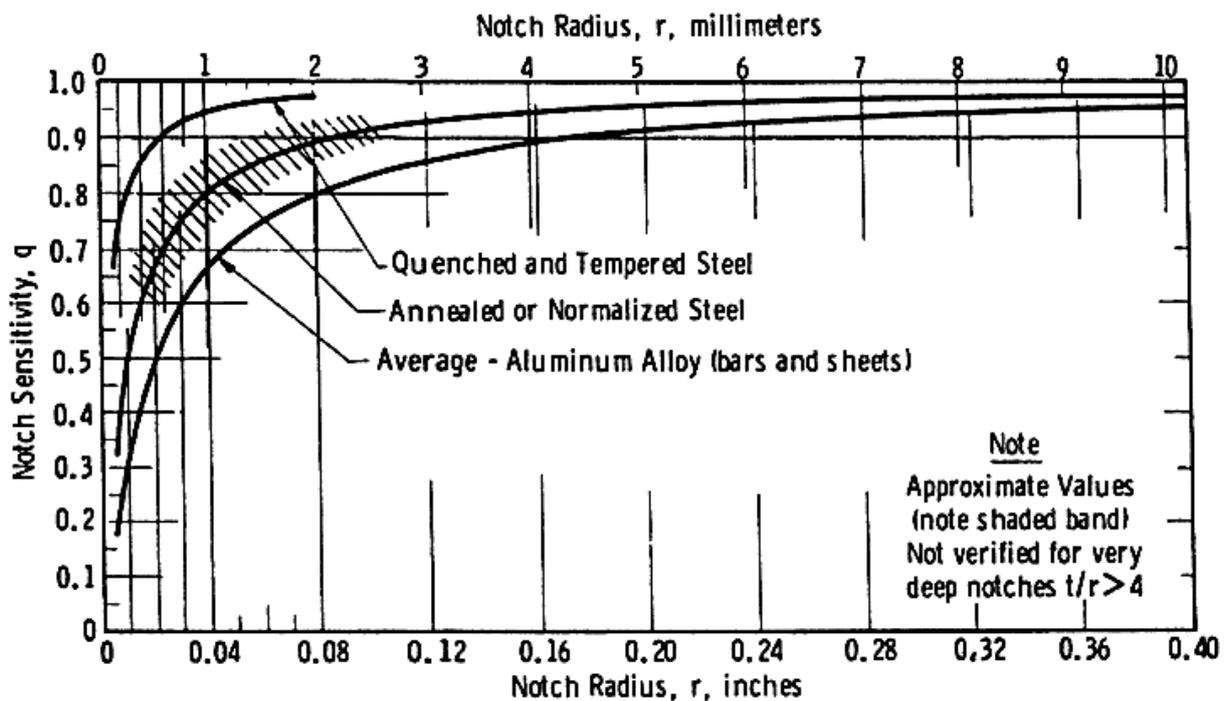


Figure II.3. La sensibilité à l'entaille de la limite de fatigue ($S_m = 0$) des spécimens tournants de poutre. Résultats moyens pour différentes tailles (racine d'entaille) et résistance de matériaux [1].

Une sensibilité à l'entaille élevée est obtenue si $K_f = K_t$ et ainsi $q = 1$. S'il n'y a aucune sensibilité à l'entaille, alors $K_f = 1$ et ainsi $q = 0$. Une variation de q de 0 à 1 correspond à une sensibilité à l'entaille croissante. Le facteur q a été employé par *Peterson* pour illustrer les deux effets de la force matérielle et la taille des spécimens. Un graphe de *Peterson* est montré sur la figure II.3 avec des valeurs de q entre 0 et 1. Il montre que q est plus grand

pour des matériaux plus forts et pour de plus grands spécimens. Afin d'expliquer ces tendances le principe de similitude comme appliqué sur la figure II.2 doit être reconsidéré.
[1]

Chapitre III :

Fatigue sous corrosion

III.1. Introduction

Bien que l'expression « *fatigue corrosion* » ait été utilisée auparavant par **Mc Adam** 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. Une vingtaine d'années plus tard, la conférence de **Kohler, Wisconsin, USA**, fait de nouveau le point sur les avancées en fatigue corrosion et propose de nouvelles directions de recherches. Certaines des publications passent en revue les théories actuelles, et en soulignent les faiblesses ou qualités en fonction du matériau considéré. Les comptes-rendus expérimentaux s'articulent autour des deux grands mécanismes de la fatigue corrosion, c'est-à-dire la fragilisation par l'hydrogène et la théorie de dissolution/repassivation [6].

III.2. Définition de la corrosion

Le terme « corrosion » évoque pour la plupart des personnes, l'image de la rouille propre aux métaux ferreux, comme si seul le fer était susceptible de présenter ce phénomène. En réalité, la corrosion est la cause générale de l'altération et de la destruction de la plupart des matériaux naturels ou élaborés. Tout se corrode et tout milieu peut être corrosif suivant le matériau considéré. Le verre s'opacifie par l'action bactérienne, le béton se désagrège, les plastiques se décolorent sous l'action des impuretés de l'air et les métaux s'oxydent dans l'eau. Les sols, l'air ambiant, les eaux et les acides sont autant de milieux plus ou moins corrosifs [7].

La corrosion, au sens large, peut s'exprimer comme la détérioration d'un matériau, par le milieu dans lequel il se trouve. Observé depuis toujours, ce phénomène n'est étudié scientifiquement que depuis les temps modernes. Les progrès de la civilisation et de la technique, qui ont amené l'utilisation sans cesse croissante des matériaux, ont entraîné une augmentation grandissante des pertes par corrosion et ont conduit à en chercher les causes et les remèdes [7].

La corrosion selon la norme **ISO 8044**, est définie comme « interaction physico-chimique (habituellement d'une nature électrochimique) entre un métal et son environnement qui a comme conséquence les changements des propriétés du métal et qui peuvent souvent mener à l'affaiblissement de la fonction du métal, de l'environnement, ou du système technique dont ceux-ci font partie ». Dans une certaine mesure, la corrosion peut être regardée comme « retour chimique d'un métal de raffinage à son état d'énergie la plus stable » [4].

Les composants principaux de la corrosion électrochimique sont l'anode (où les réactions anodiques se produisent), la cathode (où les réactions cathodiques de réception des électrons des réactions anodiques se produisent), et le soluté, ou l'électrolyte, qui contient des ions chargés positivement et négativement et c'est un conducteur [4].

III.3. Corrosion par l'eau

III.3.1. Définition des eaux

L'eau est un liquide incolore, inodore, transparent et insipide lorsqu'il est pur. L'eau occupe une étendue considérable de la surface terrestre, mais ne se rencontre pas sous forme pure. De formule chimique H_2O , l'analyse d'un échantillon d'eau du robinet a permis d'identifier plus de **94** éléments différents, dont certains sous forme de trace. Seules les caractéristiques ayant une influence reconnue sur la corrosion seront définies au présent chapitre : le **pH**, les gaz dissous, la résistivité et les solides en suspension [7].

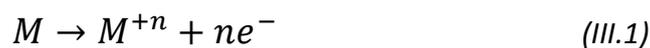
III.3.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le **pH** est le cologarithme de la concentration en ions hydrogène. Cette concentration, en eau pure, est de 10^{-7} mol/L . Elle est égale à la concentration en ions hydroxyle, soit $(H^+) = (OH^-) = 10^{-7} \text{ mol/L}$. Cet exposant est utilisé par convention pour définir la basicité et l'acidité d'une solution. Un **pH** inférieur à **7** représente un milieu acide, tandis qu'un **pH** supérieur à **7** exprime un milieu basique [7].

III.3.3. Corrosivité des eaux

Le mécanisme de la corrosion par l'eau comme déjà décrit, se résume à une action d'oxydo-réduction représentée par les équations suivantes : [7]

- Pour une solution neutre ou basique :



- Pour une eau à **pH** acide :



Il a été défini que le **pH**, les gaz dissous, la résistivité et les solides en suspension ont une influence sur le taux de corrosion de l'eau. Les diagrammes de **Pourbaix** représentent l'influence du **pH** sur la corrosion des métaux. L'exemple du fer est donné à la figure III.1 [7].

Il n'existe pas de courbes, pour tous les milieux, à l'influence combinée des gaz dissous, de la résistivité et des solides en suspension reliant les taux de corrosion [7].

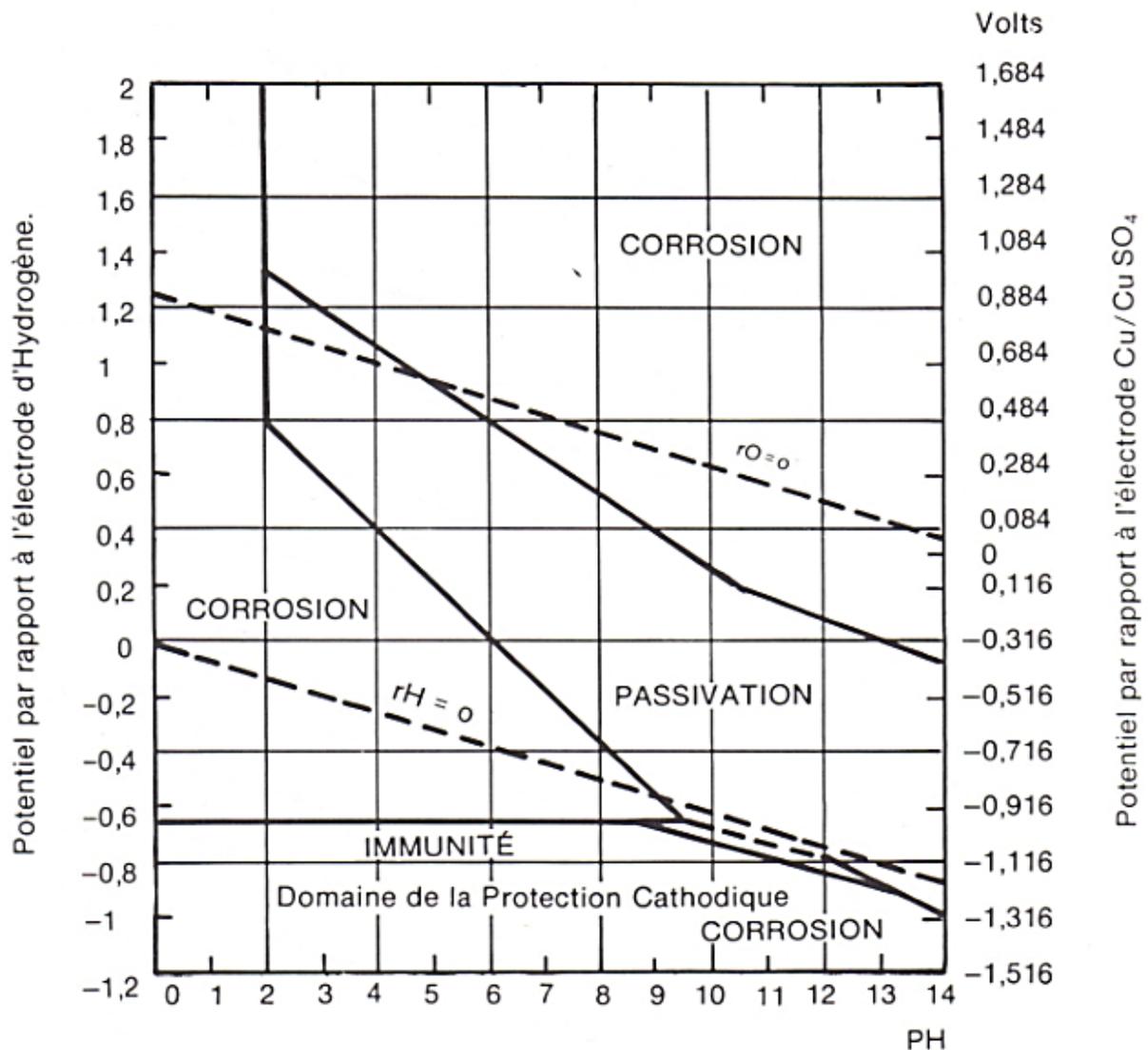


Figure III.1. Diagramme de corrosion Système fer/eau (source: diagramme de *Pourbaix (Cebelcor)*). Les zones de réactions thermodynamiques possibles sans faire intervenir la vitesse des réactions [7].

III.4. Définition de la fatigue sous corrosion

La fatigue sous corrosion est par définition la fatigue dans un environnement corrosif. Un environnement agressif peut être nocif pour la durée de vie en fatigue d'une structure, et la protection contre la corrosion est nécessaire. Les concepteurs doivent considérer la corrosion en service, non seulement en raison de la fatigue. La corrosion est indésirable pour des raisons liées à une utilisation sûre et économique d'une structure pendant sa durée de vie. La corrosion peut également être inacceptable en raison de l'aspect d'une structure, c-à-d pour des raisons cosmétiques. Habituellement, la prévention de corrosion est considéré pour être une affaire pour sélectionner un matériau résistant à la corrosion ou d'appliquer

une protection surfacique appropriée, telle que le cadmiage de peinture ou, etc. Malheureusement, ces options ne garantissent pas de bonnes propriétés de fatigue. En outre, plusieurs matériaux de haute résistance ont une résistance à la corrosion relativement pauvre. Les accidents désastreux ont en raison produit des fissures de fatigue à partir des dommages de corrosion, dans plusieurs cas, la corrosion s'oppose. Toutes les fois que les dommages de corrosion peuvent se produire sur la surface du matériau d'une structure dynamiquement chargée, la fatigue par corrosion peut être un problème grave [1].

Comme montré par la littérature, la fatigue sous corrosion a été étudiée dans divers programmes expérimentaux, principalement comme problème matériel. Les essais de fatigue d'une amplitude constante ont été effectués avec les environnements étroitement contrôlés sur les spécimens simples de laboratoire. Les études ont montré que l'accumulation de dommages pendant la fatigue par corrosion est provoquée par les actions combinées de la fatigue et de la corrosion avec des interactions mutuelles. Le type du matériau et de l'environnement des expériences désigné habituellement sous le nom du système de matériau/environnement. Puisque la corrosion est un mécanisme dépendant du temps, il est évident que la fréquence de charge et la forme de l'onde des cycles de charge puissent être significatives pour la fatigue par corrosion [1].

III.5. Aspects de la fatigue sous corrosion

Dans la figure III.2, on observe une diminution significative des durées de vie de fatigue et de la résistance de fatigue. La grande réduction de la limite de fatigue est la plus remarquable. Elle implique que le déclenchement de la fissure est possible aux contraintes de basses amplitudes, qui ne se seraient pas produites sans environnement corrosif. Après le déclenchement de la fissure, l'environnement peut entrer dans la fissure, atteindre le bout de la fissure, et augmenter le taux de progression de la fissure. Les procédés de corrosion concernés sont chimique, électrochimique dans les environnements liquides, ou physique [1].

La corrosion est un processus dépendant du temps. Par conséquent, la fatigue sous corrosion devrait dépendre de l'échelle de temps de l'histoire de charge. Pendant la fatigue à une basse fréquence, beaucoup plus de temps est disponible pour un mécanisme de corrosion que pendant la fatigue à une haute fréquence. L'effet de fréquence a été également illustré par les résultats de la figure III.2 [1].

Deux types d'environnements devraient être considérés :

- Environnements gazeux,
- Environnements liquides [1].

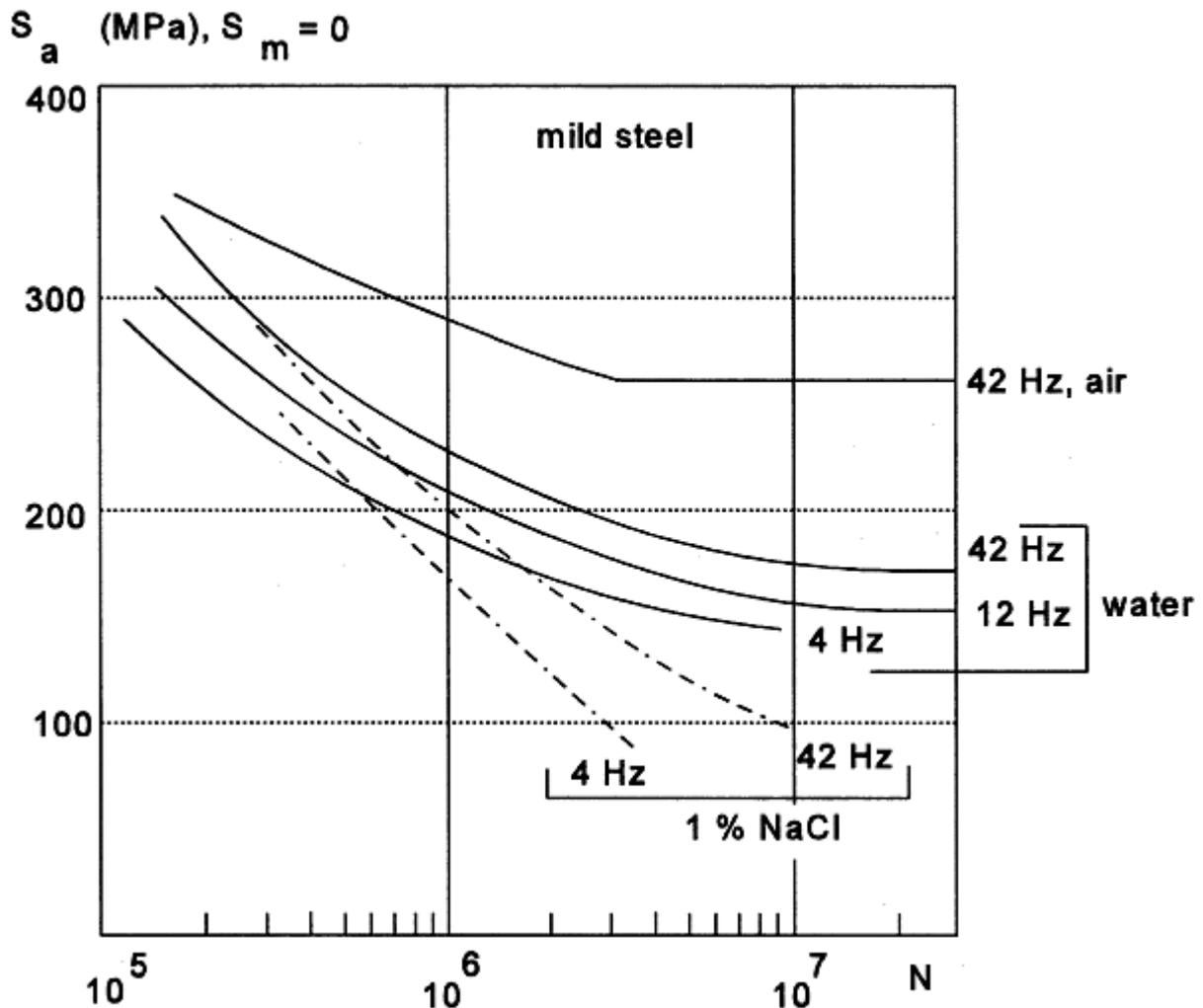


Figure III.2. L'effet de l'environnement et de la fréquence du chargement sur la courbe $S-N$ des spécimens sans entaille d'acier doux [1].

III.6. Fatigue sous corrosion dans les environnements liquides

L'environnement liquide le plus utilisé dans des 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 collègues. Des résultats de ce travail sont affichés sur la figure III.3. La grande réduction de la limite de fatigue est la plus évidente. La pertinence technique des environnements liquides est facilement compréhensible. Beaucoup de structures deviennent humides, par exemple des structures dans la mer, structures dehors par la pluie, autrement par condensation de vapeur d'eau, etc. près des lignes de côte, l'eau contiendra le sel. Dans beaucoup de cas, la présence de l'eau ne peut pas être évitée, alors que l'eau peut contenir plusieurs impuretés qui peuvent affecter la fatigue sous corrosion. Le mécanisme de corrosion dans un liquide est électrochimique. Sur une surface du matériau, la corrosion peut contribuer à la nucléation de la fissure pour créer la toute première microfissure. Dès

qu'une fissure sera présente, l'environnement liquide entre dans la fissure. Sous le chargement cyclique, la fissure agit en tant que pompe due à l'ouverture cyclique et à la fermeture cyclique de la fissure. L'environnement est tiré dans la fissure [1].

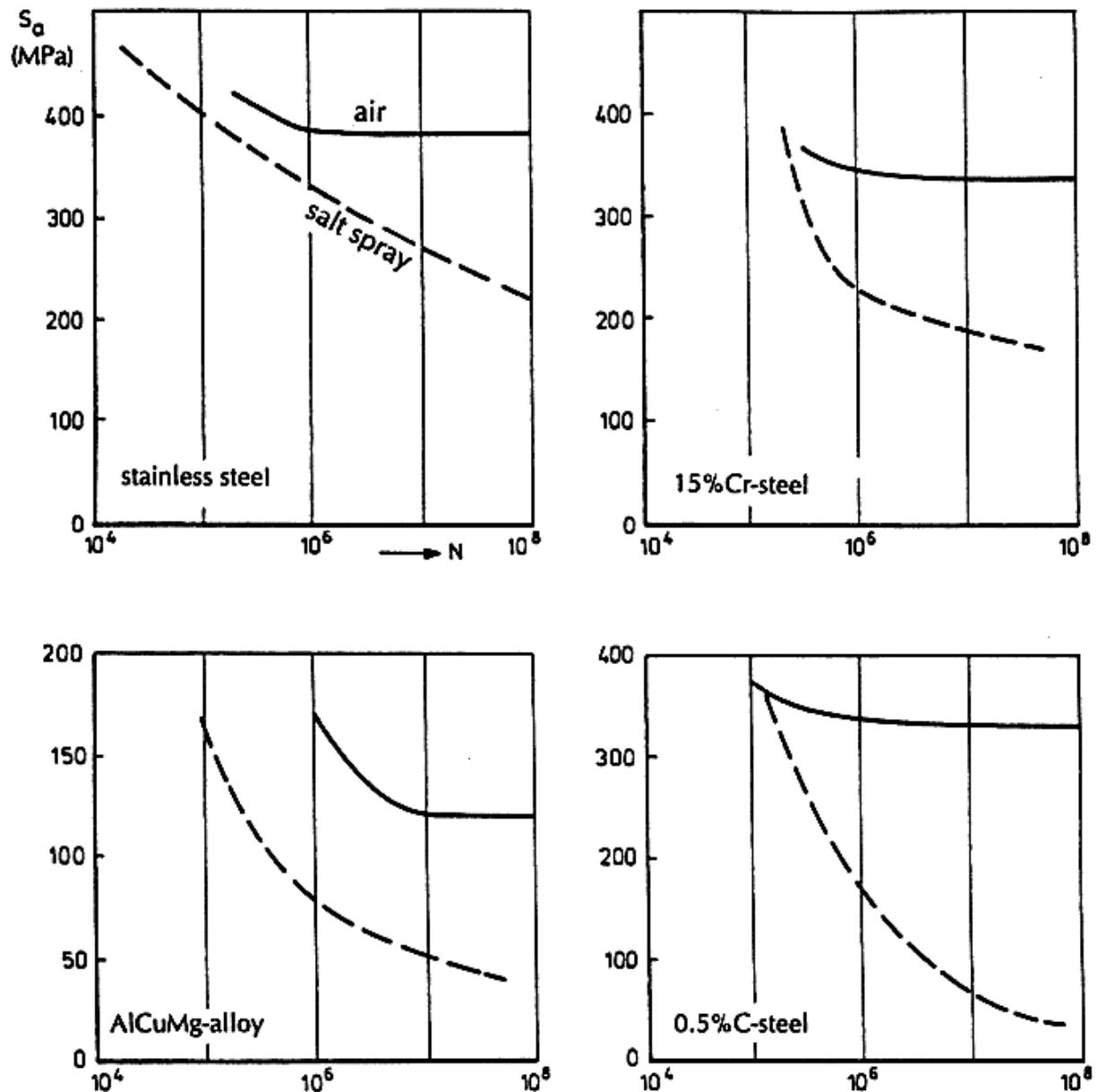


Figure III.3. Effet de l'eau salée sur des courbes *S-N*. Noter la grande réduction de limites de fatigue. Résultats de *Gough* et de *Soit* [1].

La fatigue sous corrosion a été intensivement étudiée dans divers programmes de recherche rapportés dans la littérature. Ceci a sensiblement contribué à la compréhension actuelle de la fatigue sous corrosion. On a également prouvé que la fatigue sous corrosion est un phénomène plutôt complexe. Les études sur le mécanisme de fatigue dans des conditions corrosives sont difficiles. Le nombre de variables concernées est grand, en ce qui

concerne des matériaux et des environnements. La zone de processus est extrêmement petite, par exemple un déclenchement d'une fissure dans une bande de glissade, ou prolongation d'une fissure au bout d'une fissure. Les dimensions de la prolongation d'une fissure en un cycle sont dans la gamme du μm , ou même dans la gamme submicronique. Il est difficile de faire des observations dans des sites autres que par la fractographie dans le microscope électronique. Cependant, les conséquences de la fatigue par corrosion en termes de résistances à la fatigue, limite de fatigue, et taux de croissance de la fissure peuvent être mesurées. [1]

L'effet le plus remarquable d'un environnement liquide est la grande réduction de la limite de fatigue comme montré par la figure III.3. Dans des conditions corrosives, les fissures de fatigue peuvent être nucléées aux amplitudes très basses, tandis que ceci ne se produit pas si les dommages de corrosion ne sont pas présents. La contribution initiale de la corrosion est en créant les dommages surfaciques. Le puits de corrosion représenté sur la figure III.4 est un dommage surfacique grave. La dissolution du matériau s'est produite. L'image indique également une attaque corrosive inter-granulaire. En fait, c'est une entaille horrible, qui devrait avoir un grand effet sur la limite de fatigue. L'effet des puits de corrosion sur la courbe *S-N* est illustré dans la figure III.5 [1].

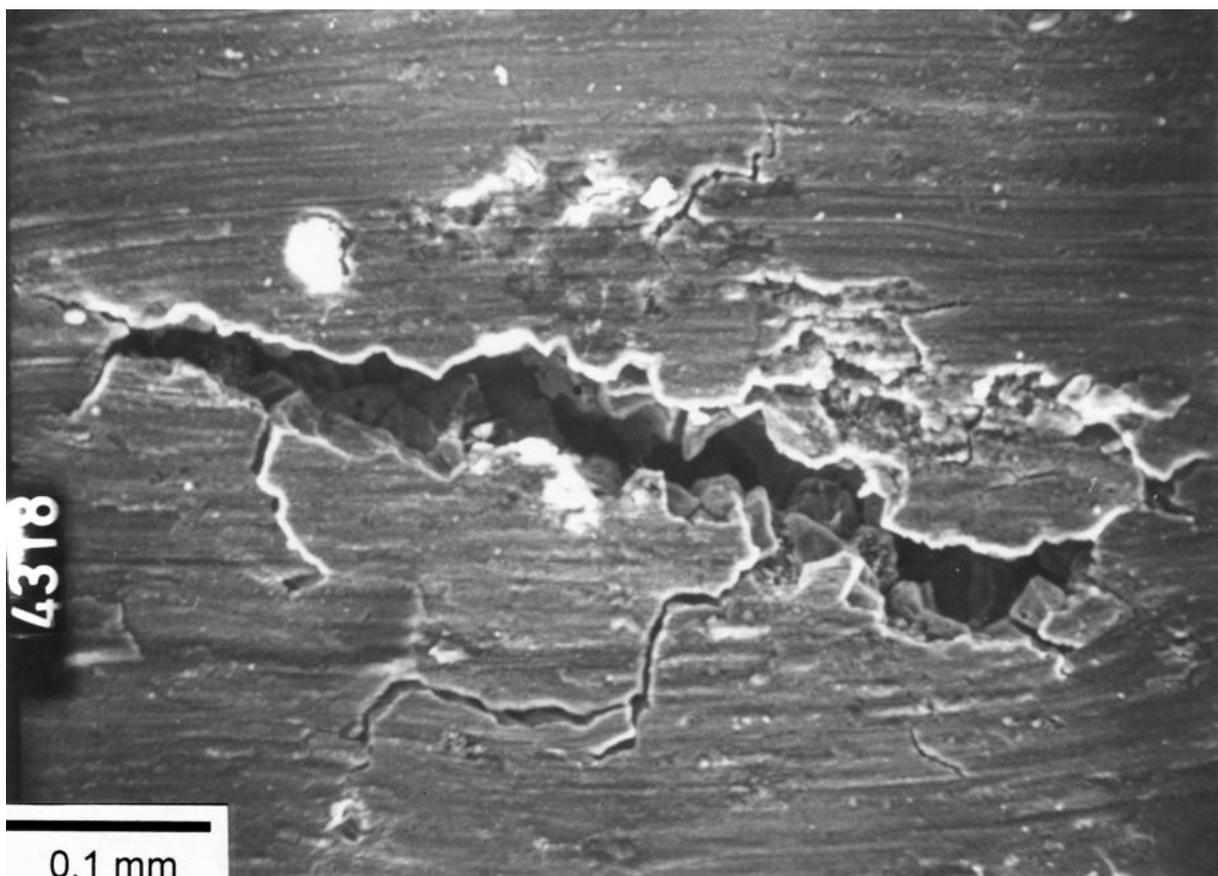


Figure III.4. Puits de corrosion dans une surface d'un alliage d'*Al*. Du bout au bout environ **0.5 mm** [1].

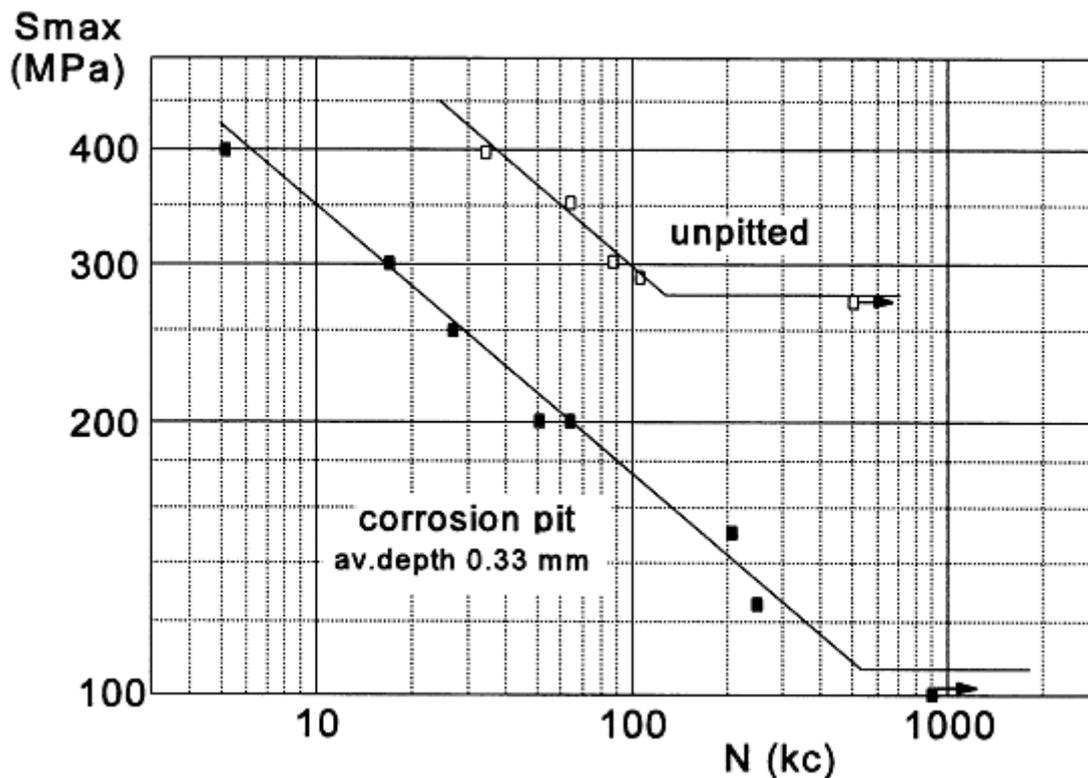


Figure III.5. L'effet d'un puits de corrosion sur la courbe $S-N$ des spécimens sans entailles d'un alliage d' Al [1].

Des dommages de corrosion sont produits dans la première partie de la résistance à la fatigue. Les dommages de corrosion superficielle impliquent que les micro-entailles sont présentes. La croissance suivante de fissure de fatigue est de nouveau assistée par la corrosion. Puisque ceci peut se produire aux amplitudes de contrainte loin de la limite de fatigue originale, cela peut encore prendre un grand nombre de cycles jusqu'à la défaillance complète [1].

Les études sur la croissance de macro-fissure ont indiqué que la corrosion dans un environnement aqueux contribue de manière significative à la croissance de fissure de fatigue. La participation des variables de corrosion a été confirmée par des effets sur le taux de croissance de fissure de fatigue quand des conditions électrochimiques ont été modifiées. Une approche évidente est d'effectuer les essais comparatifs dans différents électrolytes. Ceci a été fait par *Duquette* et *Uhlig* en utilisant l'eau chassée de l'air par rapport à l'eau non-chassée de l'air dans les essais sur des spécimens d'acier à faible teneur en carbone. Les résultats dans la figure III.6 prouvent que l'eau chassée de l'air a donné une meilleure courbe $S-N$ que l'eau aérée. Le graphique indique que la même tendance a été également trouvée pour des essais dans une solution de $NaCl$ de 3 %. La courbe $S-N$ pour la fatigue en air dans la figure III.6 suggère que l'évacuation de l'air empêche de premiers dommages de corrosion de la surface du matériau. Ceci suit de la réduction de la limite de fatigue, qui est plus petite

en eau salée chassée de l'air que dans l'eau aérée. Dans l'eau chassée de l'air sans sel, la réduction est même absente. Mais les résultats d'essai soulèvent également une question ; pourquoi l'eau chassée de l'air donne-t-elle une meilleure résistance à la fatigue que l'air ? [1].

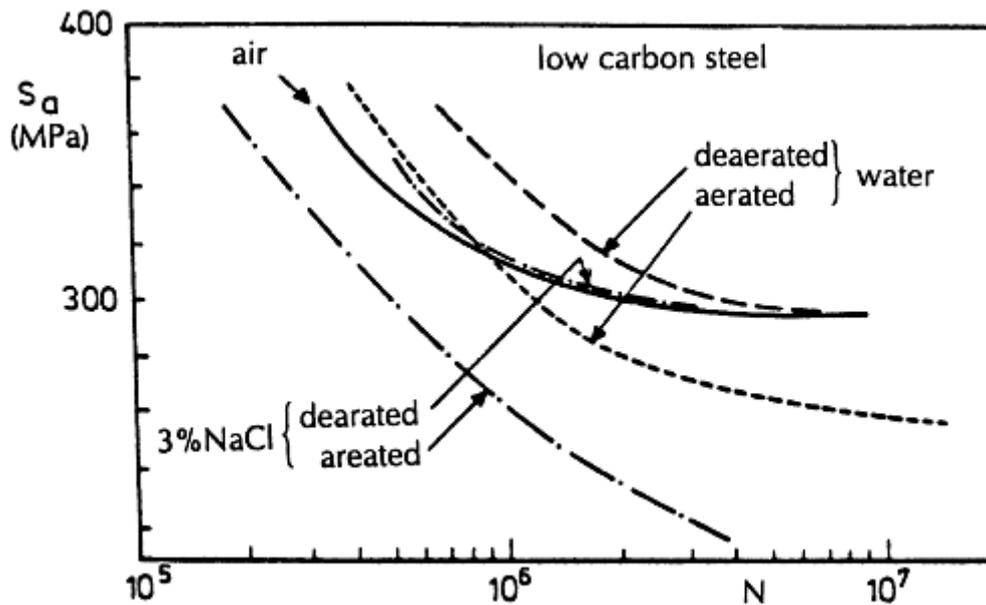


Figure III.6. Courbes de $S-N$ d'acier à faible teneur en carbone dans l'eau. Effet de chasser l'air de l'eau. Résultats de *Duquette* et d'*Uhlig* [1].

L'aspect de corrosion de la croissance de fissure de fatigue des solutés est encore confirmé par des expériences avec les inhibiteurs de corrosion liquides supplémentaires à l'eau salée. Des taux de croissance de fissure en plusieurs aciers de haute résistance ont été sensiblement réduits par l'application des inhibiteurs comme montrés par des résultats de *Lynch* et *al.* L'activité de corrosion dépend en effet de la composition de l'électrolyte au bout de fissure. La pollution de l'eau peut également affecter le comportement de fatigue par corrosion [1].

En outre, la corrosion électrolytique est affectée par application d'un potentiel électrique sur un spécimen. En fait, cette technique est employée en tant que moyens pratiques pour la protection en corrosion des structures fonctionnant en eau ou souterrain. L'application d'une tension potentielle modifie la réaction anodique ou cathodique. Dans des expériences de fatigue de laboratoire, on lui a montré qu'un potentiel électrique imposé à un spécimen peut réduire des dommages de corrosion superficielle, le déclenchement de la fissure et la croissance de la fissure de fatigue [1].

En ce qui concerne d'expliquer une croissance plus rapide d'une fissure de fatigue d'une solution liquide par rapport à la fatigue en air, on propose différentes suggestions dans la littérature. Des arguments adoptés sont associés aux phénomènes anodiques de dissolution

au bout de la fissure, ou encore à un certain mécanisme de fragilisation par l'hydrogène. La déformation en plastique au bout de la fissure peut faire le matériau du bout de la fissure répartis en zones plus anodique qu'à partir du bout. La zone du bout de fissure devient alors plus sensible à la corrosion. D'ailleurs, en eau salée les **Cl-ions** peuvent affaiblir la force cohésive du matériau. L'affaiblissement peut également être dû à l'hydrogène absorbé produit en raison de l'activité de corrosion locale [1].

Dans cette étude, nous allons étudier l'effet couplé de la corrosion sous contrainte en présence de double entaille. La distance entre entaille est prise en compte comme facteur influençant l'endurance.

Chapitre IV :

Etude expérimentale

IV.1. Introduction

Les concepts présentés dans la partie bibliographiques sont exploités dans ce chapitre. Les entailles sont des géométries obtenues mécaniquement dans certaines pièces et peuvent être accidentelles dans d'autres. Ces pièces peuvent être confrontées à travailler dans des milieux plus ou moins corrosifs. Le but est donc de réaliser des essais de fatigue dans un milieu corrosif en présence des entailles. Ces essais ainsi que leurs résultats sont présentés dans ce chapitre.

IV.2. Les éprouvettes d'essais :

IV.2.1. Forme et dimensions des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées dans les essais ont une forme cylindrique, de longueur **140 mm** dont la partie utile est de **60 mm** de longueur. Deux entailles parallèles sont présentes dans la zone utile. La distance **X** entre les entailles est un paramètre variable. La forme et les dimensions des éprouvettes sont représentées dans la figure IV.1.

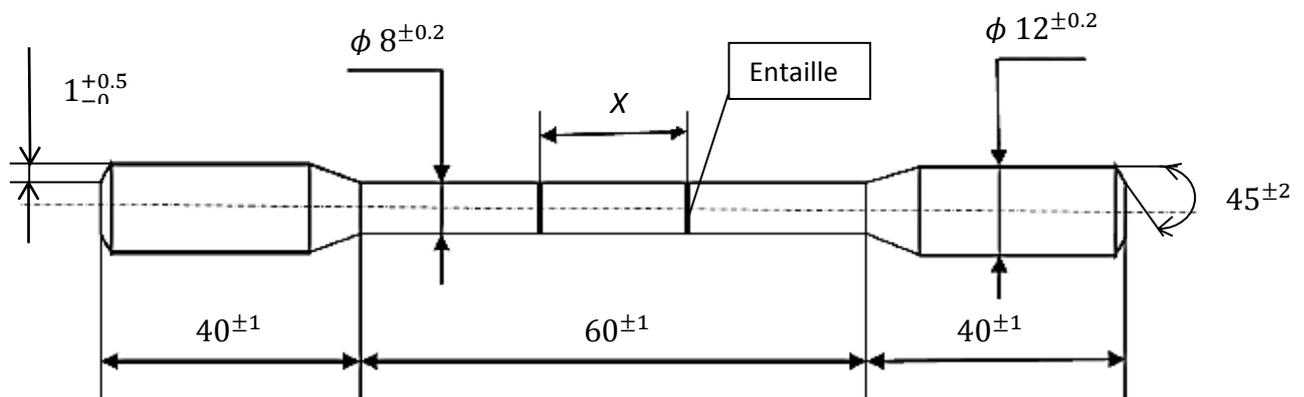


Figure IV.1. Forme et dimensions des éprouvettes.

Pour l'usinage des entailles, nous avons utilisé un outil à pastille de rayon de **0.6 mm** en tête, et de **55°** entre les arrêtes tranchantes de l'outil (voir la photo IV.1). Le rayon et les angles de la pastille ont été mesurés à l'aide d'un microscope optique (**Toolmakers Microscope MITUTOYO** du laboratoire de métrologie **Dépt. G. Mécanique, ENP**).



Photo IV.1. L'outil utilisé pour l'usinage des entailles.

La forme et les dimensions des entailles sont représentées sur la figure IV.2.

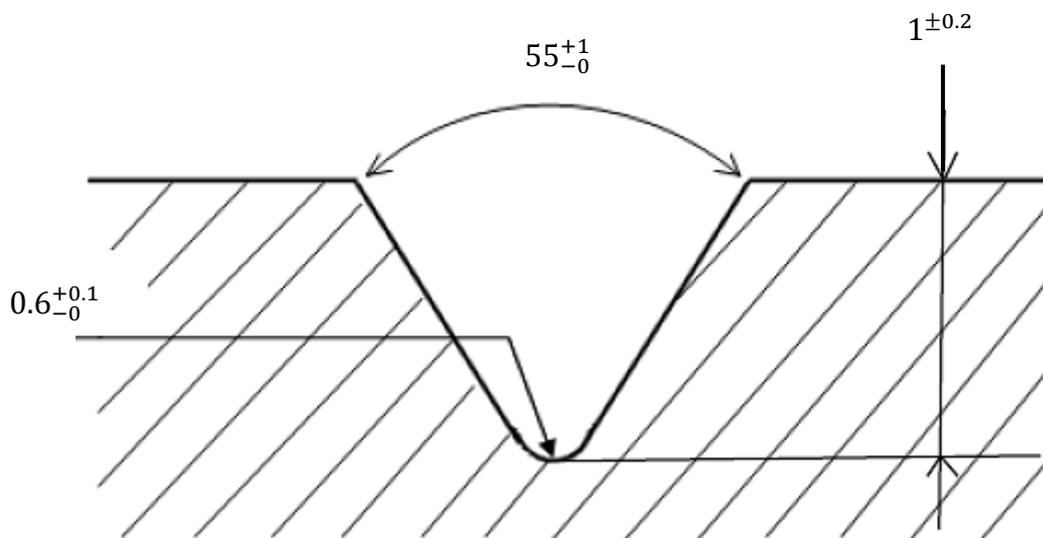


Figure IV.2. Forme et dimensions des entailles.

IV.2.2. Matériau des éprouvettes :

Le matériau utilisé dans l'usinage des éprouvettes est l'acier **XC48**. C'est un acier facilement usinable, destiné vers la production des pièces comme les outils à main à l'état trempé (marteaux, couteaux, scies, tournevis, pinces, ...).

La composition chimique de l'acier **XC48** est donnée dans le tableau suivant :

Tableau IV.1. Composition chimique moyenne de l'acier **XC48** (d'après la fiche technique).

Élément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Pourcentage	0.470	0.240	0.610	0.014	0.026	0.110	0.020	0.100

Les propriétés mécaniques de l'acier **XC48** sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.2. Propriétés mécaniques de l'acier **XC48** (d'après **SolidWorks 2012**).

Module d'élasticité E (Pa)	Coefficient de Poisson ν	Limite d'élasticité (pour $5 < \text{é} \leq 10$ mm) (MPa)	Limite de traction (pour $5 < \text{é} \leq 10$ mm) (MPa)
$2.100000031 \text{ e}^{11}$	0.28	580	750

IV.2.3. Usinage des éprouvettes :

Le matériau brut est une barre cylindrique de **16 mm** de diamètre. Les éprouvettes ont été usinées en utilisant le tour **RAMO** qui existe au niveau de l'atelier du département de Génie Mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique. La photo IV.2 représente ce type de tour.



Photo IV.2. Tour utilisé dans l'usinage des éprouvettes.

Les éprouvettes obtenues sont représentées dans la photo IV.3. On a usiné quatre éprouvettes pour chaque distance X ; deux pour les essais de fatigue à l'air ambiant, et deux pour les essais de fatigue sous corrosion (le milieu corrosif est l'eau de mer).



Photo IV.3. Variation de la distance X dans les éprouvettes usinées.

IV.3. La machine d'essai de flexion rotative :

Il existe plusieurs types de machines pour les essais de fatigue (traction, compression, torsion, flexion rotative, ...), Pour nos essais, nous avons utilisé une machine de flexion rotative de marque **CARL SCHENCK**, qui existe au niveau du laboratoire de traitement thermique de l'Ecole Nationale Polytechnique. Elle est représentée sur la photo IV.4. Les caractéristiques de cette machine sont les suivantes :

Moteur électrique : **SIEMENS – SCHUCKERT**.

Alimentation du moteur Courant alternatif : **220/380 V**.

Vitesse de rotation du moteur : **2760 tr/min**.

Fréquence : **50 Hz**.

Puissance électrique : **320 W**.



Photo IV.4. Machine d'essai de flexion rotative.

IV.4. Mode de sollicitation des éprouvettes

Le système est modélisé en flexion quatre points. (figure IV.3). Ainsi nous avons un moment fléchissant constant le long de la partie utile de l'éprouvette (figure IV.4).

La fatigue est engendrée en conservant la charge de flexion constante et en faisant tourner l'éprouvette avec une vitesse constante (**2760 tr/min**). L'éprouvette est donc soumise à un chargement d'amplitude constante. La contrainte maximale est située au niveau de la fibre extérieure.

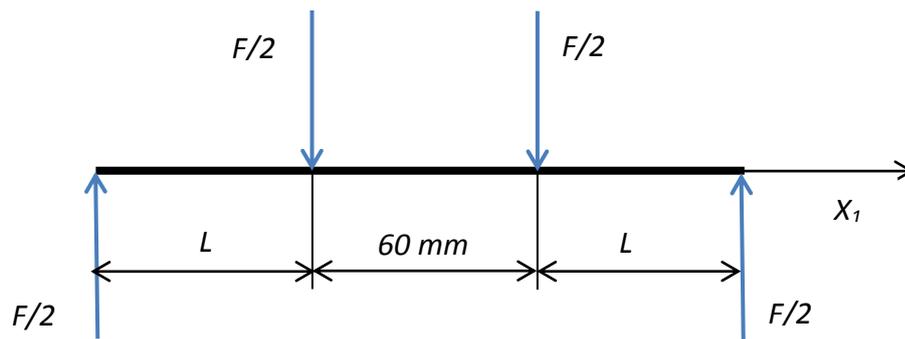


Figure IV.3. Charges appliquées à l'éprouvette.

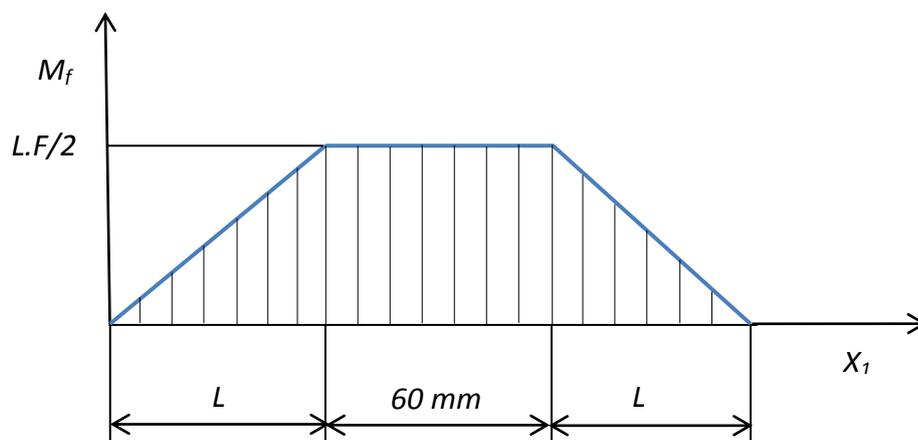


Figure IV.4. Moment fléchissant résultant.

IV.5. La cellule de corrosion

Pour la réalisation des essais de fatigue sous corrosion, une cellule de corrosion a été conçue et réalisée.

La rectification des surfaces de la cellule a été faite à l'aide d'une fraiseuse conventionnelle (photo IV.5) disponible au niveau de l'atelier de Génie Mécanique de l'école Nationale Polytechnique. Le matériau utilisé pour l'usinage de la cellule (figure IV.5) est le plexiglas.

Un système de fixation a été aussi conçu pour relier la cellule de corrosion au support de la machine (figure IV.6). Le montage est représenté sur la photo IV.6.

Le milieu corrosif utilisé est l'eau de mer. Il est introduit d'une manière continue durant les essais de fatigue sous corrosion.



Photo IV.5. Fraiseuse utilisé pour l'usinage de la cellule.

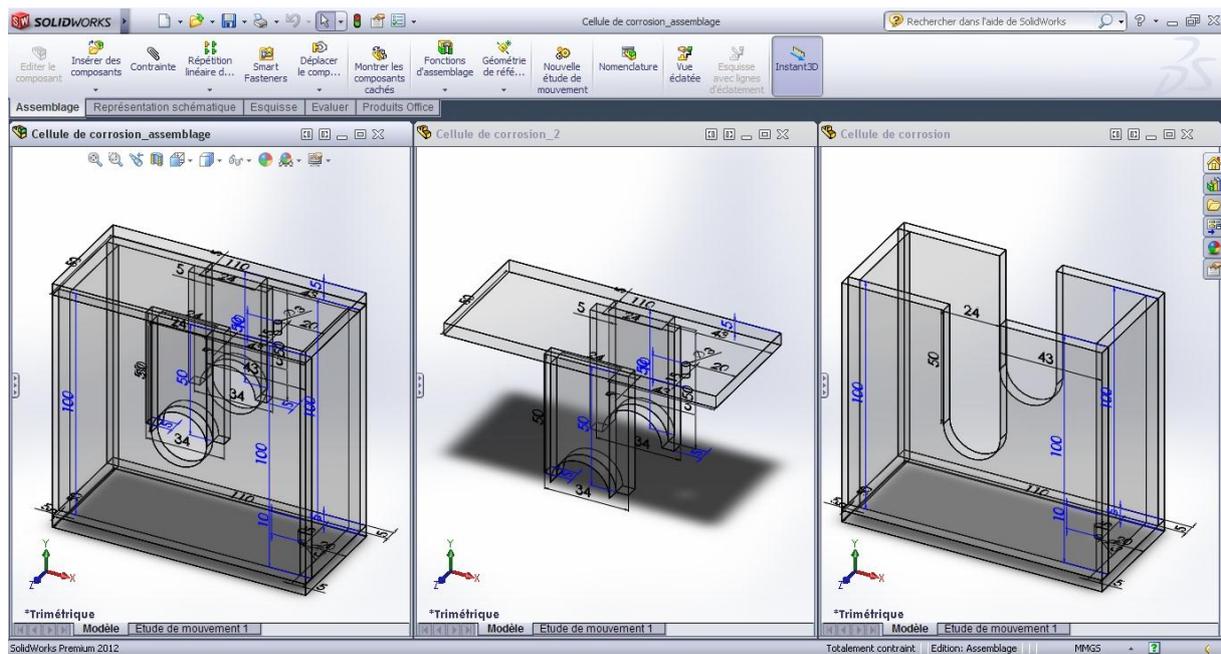


Figure IV.5. Cellule de corrosion (dessin effectué par le logiciel **SolidWorks 2012**).

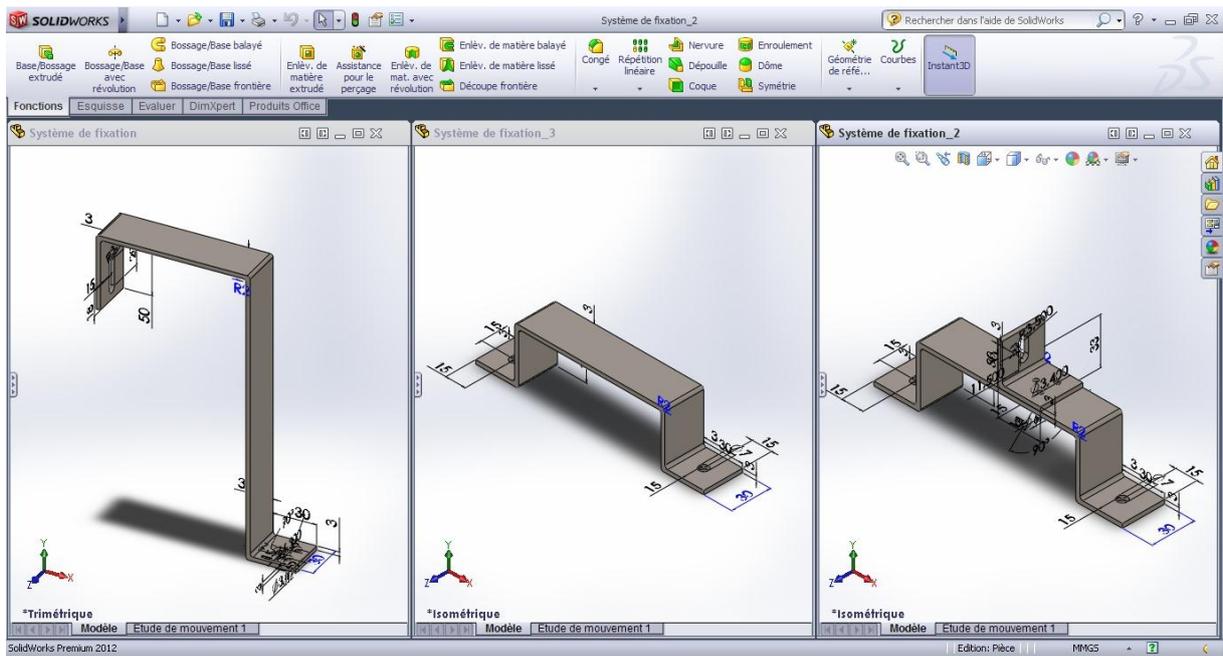


Figure IV.6. Système de fixation (dessin effectué par le logiciel *SolidWorks 2012*).



Photo IV.6. Cellule de corrosion et système de fixation.

IV.6. 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.

IV.6.1. Fatigue à l'air ambiant

IV.6.1.1. Présentation des ruptures des éprouvettes au niveau des entailles

Toutes les ruptures sont localisées au niveau des entailles. Les zones de ruptures finales sont bien localisées.



Photo IV.7. Epreuve avec $X=2.5\text{ mm}$.



Photo IV.8. Section : épreuve ($X=2.5\text{ mm}$).



Photo IV.9. Epreuve avec $X=5\text{ mm}$.



Photo IV.10. Section : épreuve ($X=5\text{ mm}$).



Photo IV.11. Epreuve avec $X=10\text{ mm}$.



Photo IV.12. Section : épreuve ($X=10\text{ mm}$).



Photo IV.13. Epreuve avec $X=20\text{ mm}$.



Photo IV.14. Section : épreuve ($X=20\text{ mm}$).

IV.6.1.2. Nombre de cycles jusqu'à la rupture

Au cours de tous nos essais, le chargement choisi est fixé à **200 MPa**. Ce taux de chargement a été obtenu après plusieurs essais préliminaires. Deux épreuves sont utilisées pour chaque distance X . Le nombre de cycles correspond au nombre de tours du moteur électrique d'entraînement. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3. 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 10^6 cycles.

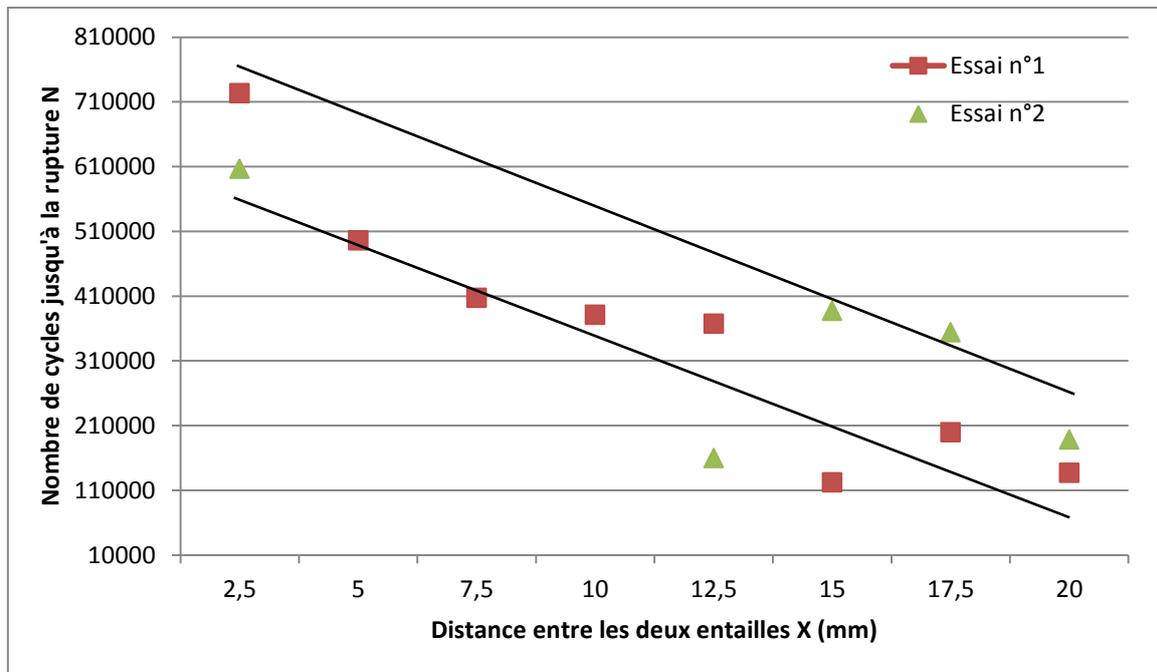


Figure IV.7. Variation du nombre de cycles jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les deux entailles X (essais à l'air ambiant).

D'après la figure, nous remarquons que l'endurance est inversement proportionnelle à la distance entre les deux entailles X . Afin de valider ces résultats, nous avons choisi de mesurer la flèche en fonction du temps.

IV.6.1.3. Evolution de la flèche

Pendant les essais, et à l'aide de deux comparateurs, nous avons mesuré la flèche de quelques éprouvettes pour quelques distances entre entailles.

Les tableaux suivant regroupent les mesures des flèches au cours de l'essai.

Tableau IV.4. Evolution de la flèche de l'éprouvette de distance entre entailles $X = 5 \text{ mm}$

$X \text{ (mm)}$	Essai		
	Comp. n°1	Comp. n°2	N
5	1.5	1	45200
	2	2	95200
	6	5	195200
	8	7	295200
	9.5	9	395200
	11	10	495200

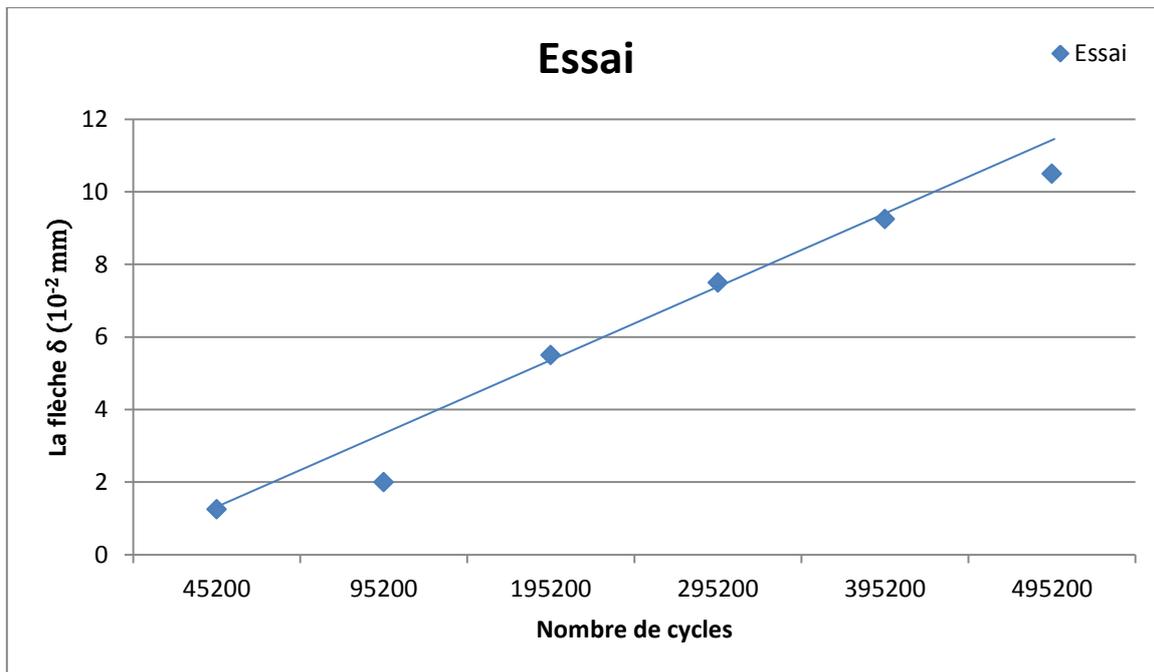


Figure IV.8. Evolution de la flèche en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette de distance entre entailles $X = 5 \text{ mm}$.

Tableau IV.5. Evolution de la flèche de l'éprouvette de distance entre entailles $X = 10 \text{ mm}$

$X \text{ (mm)}$	Essai		
	Comp. n°1	Comp. n°2	N
10	1.5	1	45200
	2	2	95200
	6	5	195200
	8	7	295200
	9.5	9	395200
	11	10	495200

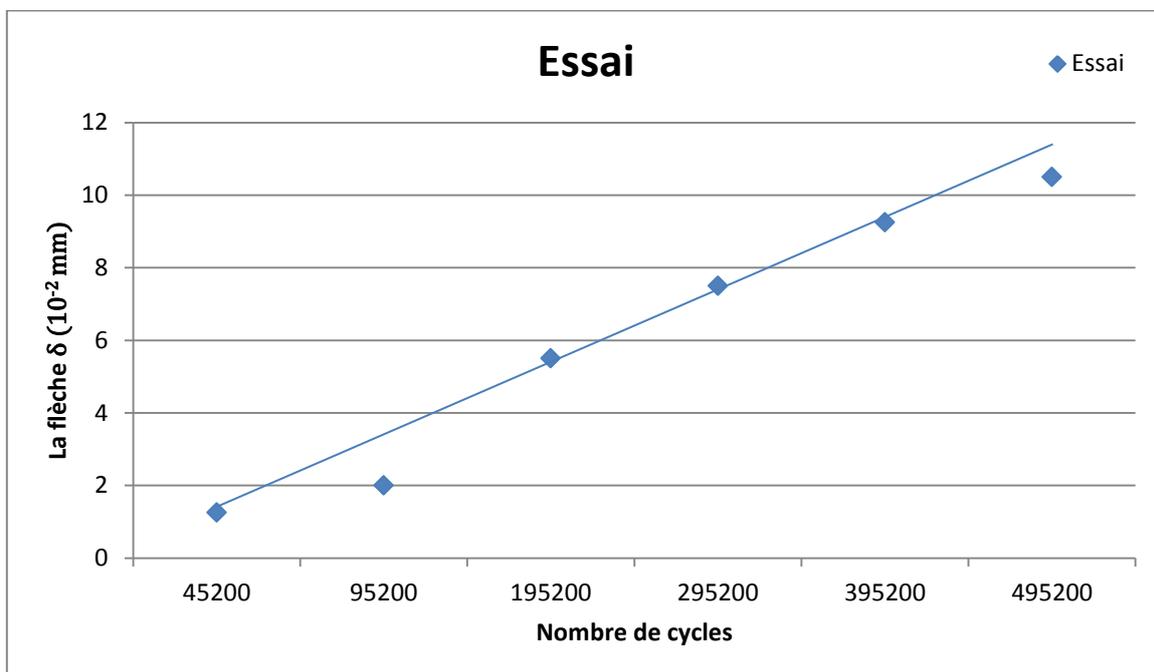


Figure IV.9. Evolution de la flèche en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette de distance entre entailles $X = 10 \text{ mm}$.

Tableau IV.6. Evolution de la flèche de l'éprouvette de distance entre entailles $X = 15 \text{ mm}$

$X \text{ (mm)}$	Essai		
	Comp. n°1	Comp. n°2	N
15	2	3	21400
	3	4	71400
	8	7	121400
	9.5	9	221400

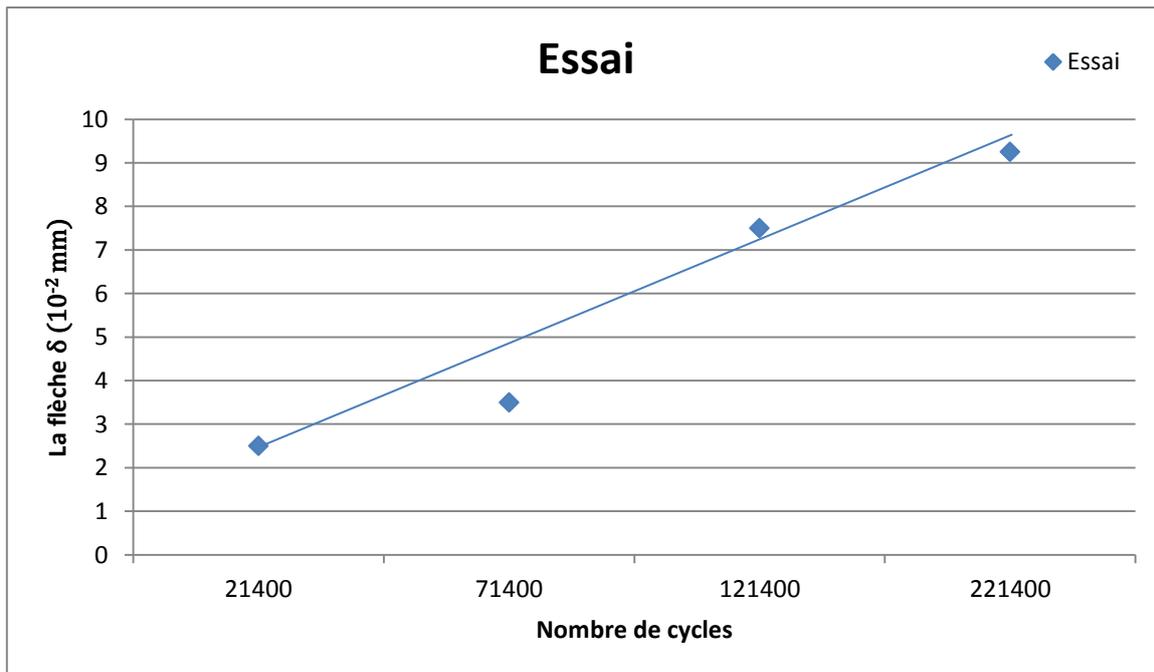


Figure IV.10. Evolution de la flèche en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette de distance entre entailles $X = 15 \text{ mm}$.

Tableau IV.7. Evolution de la flèche de l'éprouvette de distance entre entailles $X = 20 \text{ mm}$

X (mm)	Essai n°1		
	Comp. n°1	Comp. n°2	N
20	1	1.5	33100
	3	4	69900
	6	7	126900

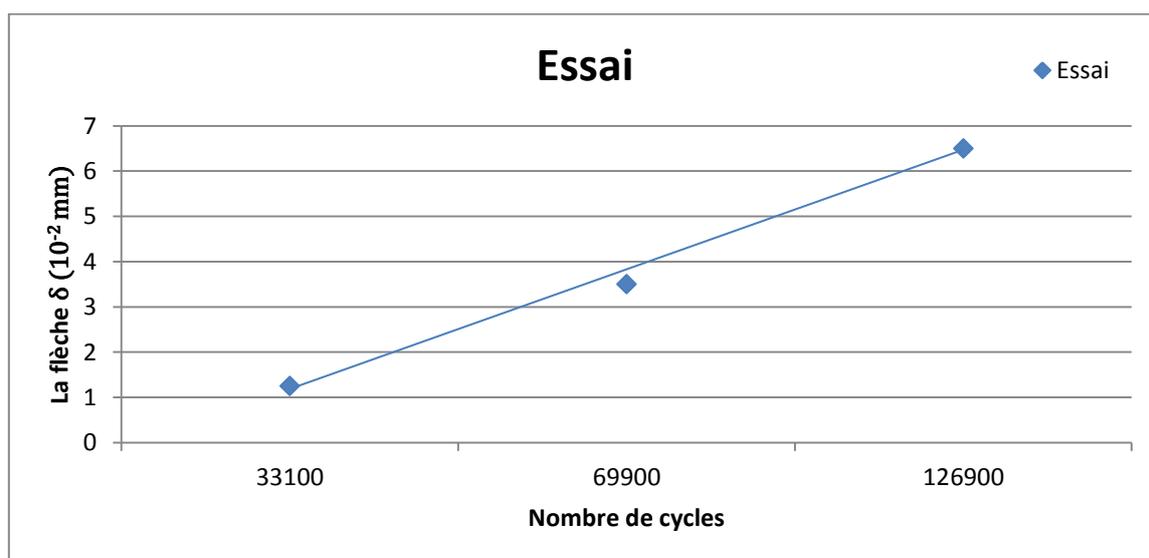


Figure IV.11. Evolution de la flèche en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette de distance entre entailles $X = 20 \text{ mm}$.

Dans tous ces graphes, nous remarquons que la variation de la flèche est proportionnelle à la variation de la distance entre les deux entailles. Ce résultat est un indicateur de la perte de rigidité flexionnelle de l'éprouvette au cours de l'essai qui est en corrélation pour des entailles éloignées.

IV.6.2. Fatigue sous corrosion

Dans cette section, nous représentons les résultats obtenus pour les essais de la fatigue sous corrosion. Le milieu corrosif utilisé est l'eau de mer.

IV.6.2.1. Présentation des ruptures des éprouvettes au niveau des entailles

L'eau de mer est un milieu très corrosif. Il contient essentiellement du **NaCl**. Donc nous pouvons attendre à ce que la rupture se fasse pour un nombre de cycles inférieur aux essais effectués à l'air ambiant.



Photo IV.15. Eprouvette avec $X = 2.5 \text{ mm}$.



Photo IV.16. Eprouvette avec $X = 5 \text{ mm}$.



Photo IV.17. Eprouvette avec $X = 10\text{ mm}$.



Photo IV.18. Eprouvette avec $X = 10\text{ mm}$.

IV.6.2.2. Nombre de cycles jusqu'à la rupture

Tableau IV.8. 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

/ : La rupture n'a pas eu lieu après plus de **1000000 cycles**.

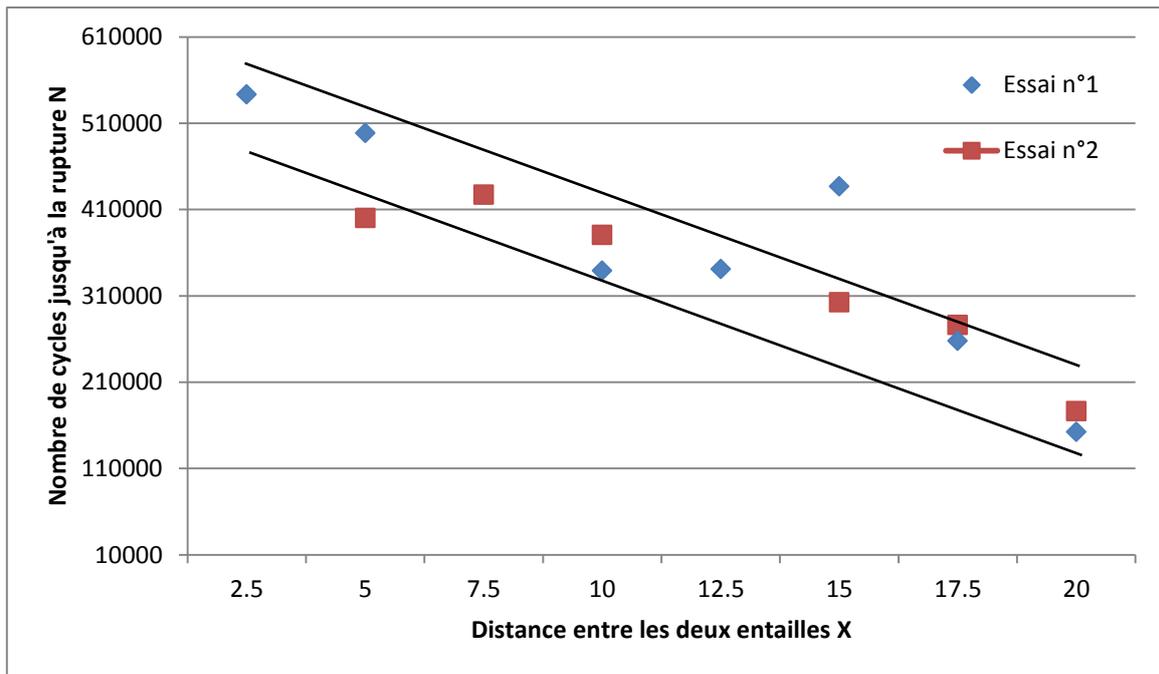


Figure IV.12. Variation du nombre de cycles jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les deux entailles (sous corrosion) X .

L'endurance garde la même allure qu'à l'air ambiant.

IV.6.3. Comparaison entre les essais de fatigue à l'air ambiant et dans l'eau de mer

Le tableau suivant représente une comparaison entre les deux types d'essais de fatigue effectués.

Tableau IV.9. Comparaison entre les deux types d'essai de fatigue.

La distance entre les entailles X (mm)	Nombre de cycles N			
	Fatigue à l'air ambiant		Fatigue à l'eau de mer	
	Essais n°1	Essais n°2	Essais n°1	Essais n°2
2.5	723000	606400	543600	/
5	495600	/	498600	400300
7.5	406900	/	/	427100
10	381100	/	339300	380600
12.5	367300	159600	340900	/
15	121900	386900	437000	302700
17.5	199600	353800	257800	276500
20	136600	188200	152300	176400

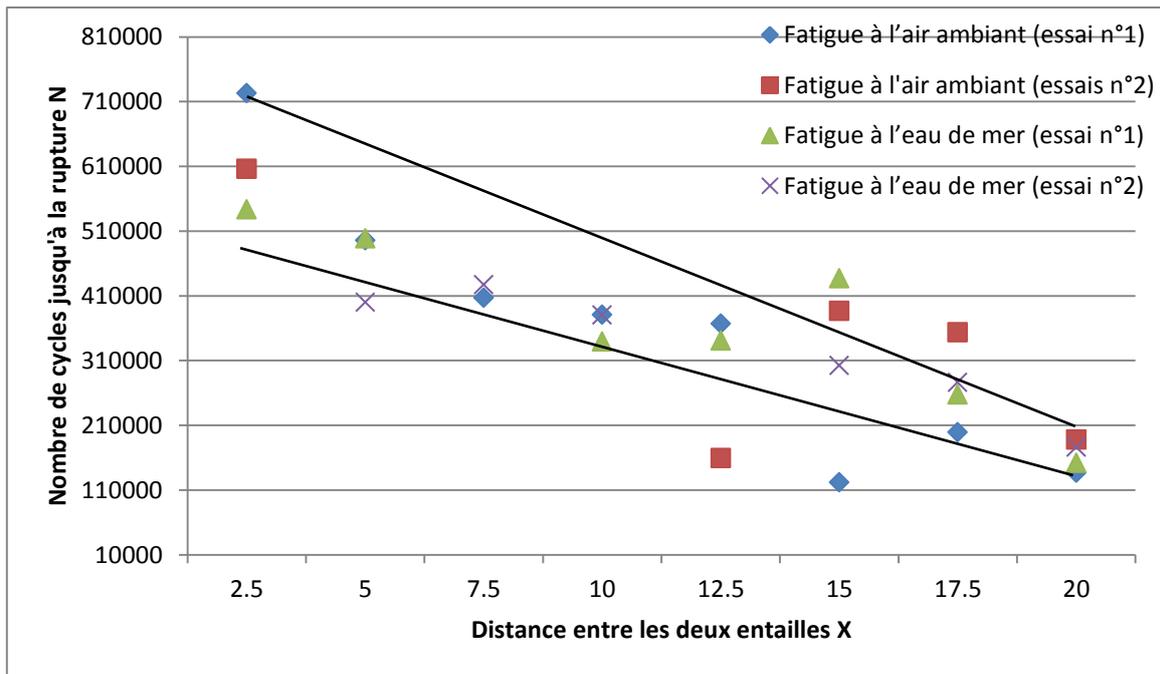


Figure IV.13. Comparaison entre les essais de fatigue à l'air ambiant et les essais de fatigue sous l'eau de mer (corrosion).

Le processus d'endommagement en fatigue sous corrosion avec double entailles est bien mis en évidence. Le phénomène est plus marqué pour les grands nombres de cycles correspondant à la distance minimale entre entailles.

Conclusion générale

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 pas très grand, et qui permet 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.

La mesure de la flèche est un indicateur de l'endommagement. Il donne de bons résultats dans les deux cas d'essais effectués.

Parfois, les résultats obtenus sont plus au moins différents dans la même distance entre les deux entailles. Ceci peut être dû essentiellement aux défauts d'usinage, et aux 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.

Bibliographie

[1] : Jaap Schijve ; “Fatigue of Structures and Materials” ; Springer Science+Business Media, B.V. ; 2009.

[2] : Les Pook ; “Metal Fatigue. What It Is, Why It Matters” ; Springer, P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands ; 2007.

[3] : L. A. Sosnovskiy ; “ Tribo-Fatigue. Wear-Fatigue Damage and its prediction” ; Springer-Verlag Berlin Heidelberg ; 2005.

[4] : Reza Javaherdashti ; “Microbiologically Influenced Corrosion. An Engineering Insight” ; Springer-Verlag London Limited ; 2008.

[5] : Michael F. Ashby, David R. H. Jones ; “Engineering Materials 1” ; Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP ; 1996.

[6] : Claude Bathias, André Pineau ; “Fatigue des matériaux et des structures 2” ; Lavoisier ; 2008.

[7] : J. J. Lamoureux ; “Précis de corrosion” ; Tecscult 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 Teubner Verlag Wiesbaden ; 2006.