

N° d'ordre : 05/2006-M / G.M

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
« HOUARI BOUMEDIEN »
FACULTE DE GENIE MECANIQUE ET GENIE DES PROCEDES



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

EN : GENIE MECANIQUE

Spécialité : MECANIQUE ET FATIGUE DES MATERIAUX

Par : Madame DOUMI NEE ADAMOU NAWAL SIHAM

Sujet:

***QUANTIFICATION DE L'ENDOMMAGEMENT EN
FATIGUE SOUS CORROSION
SOUS ENTAILLE PAR ESSAIS DE TRACTION***

Soutenu le 18 Avril 2006 devant le jury composé de Messieurs :

☞ T. BOUKHAROUBA	Prof.	USTHB	Président
☞ A. AHMED BENYAHIA	M.C.	USTHB	Examineur
☞ K. AZOUAOUI	M.C.	USTHB	Examineur
☞ A. BELOUHRANI	M.C.	E.M.P.	Examineur
☞ Y. BELKACEMI	C.C.	E.N.P.	Rapporteur

Abstract:

In study, fatigue tests at ambient conditions and under corrosion were conducted on steel XC38 notched specimens ($r = 0.4\text{mm}$, net $\phi = 8\text{mm}$).

A special cell adapted to the rotating flexural testing machine (2790tr/min) has been conceived to conduct these tests. Sea water is used as a corroding media. The damage level is evaluated by the ultimate tensile strength decrease. The notch locates the corrosion damage process. This study has shown that the corrosion damage is effective after $5 \cdot 10^5$ cycles.

Résumé:

Dans cette étude, des essais de fatigue à l'air libre et sous corrosion, en concevant et réalisant une cellule adaptée à la machine de flexion rotative tournant à 2790tr/min, ont été menés sur des éprouvettes entaillées sur un acier de nuance XC38 (rayon de fond d'entaille

$r = 0.4\text{mm}$, diamètre net $\phi = 8\text{mm}$). Le milieu corrosif choisi est de l'eau de mer. Le but est de quantifier l'endommagement en utilisant des essais de traction. La chute de la résistance ultime a été choisie comme paramètre pour quantifier l'endommagement. L'entaille localise tout le processus d'endommagement par corrosion au niveau du fond d'entaille. Il ressort de cette étude que la mesure de l'endommagement par la corrosion devient effective à partir d'un certain nombre de cycles estimé à $5 \cdot 10^5$.

Mots clés:

Endommagement, fatigue, fatigue sous corrosion, Concentration de contrainte, entaille, effet d'entaille, flexion rotative, traction, résistance ultime, rayon à fond d'entaille, XC38.

Sommaire

Introduction générale	3
Chapitre I : Notions sur la mécanique de l'endommagement	6
I-1/ Introduction.....	7
I - 2/ Historique.....	7
I - 3/ Aspect phénoménologique.....	7
I – 3 –a/ Variables d'endommagement.....	8
I – 3 –b/ Contrainte effective.....	9
I – 3 –c/ Principe d'équivalence en déformation.....	9
I – 3 - d/ Principe d'équivalence d'énergie de déformation.....	9
I – 4 / Mesure d'endommagement.....	10
I – 4 –a/ Variation du module d'élasticité.....	10
I – 4 –b/ Variation des caractéristiques de plasticité.....	11
I – 4 – c/ Variation des caractéristiques de viscoplasticité.....	12
I – 4 – d/ Variation de courant électrique.....	12
I – 5 / Les différents modes de rupture.....	12
I – 6 / Les dommages par fatigue.....	14
I – 7 / Introduction à la mécanique de la rupture.....	15
I – 8 / Conclusion.....	21
Chapitre II : Notions sur la fatigue	22
II-1/ Introduction.....	23
II-2/ Historique.....	23
II-3/ Courbe de Wöhler.....	24
II-4/ Classification de essais de fatigue.....	25
II-5/ Les différents paramètres d'influence.....	26
II-5-a/ Effet de la fréquence et du type d'essai.....	26
II-5-b/ Influence des contraintes appliquées.....	26
II-5-c/ Influence des paramètres géométriques.....	26
II-5-d/ Influence de la température et de l'environnement.....	29
II-6/ Conclusion.....	30
Chapitre III : Notions sur la corrosion	31
III-1/ Introduction.....	32

III-2/ Historique.....	32
III-3/ Description de la corrosion.....	33
III -3-a/ Processus de la corrosion.....	34
III-3-b/ Morphologie de la corrosion.....	35
III – 4/ Conclusion	38
Chapitre IV : Notions sur la fatigue corrosion.....	40
IV-1/ Introduction.....	41
IV-2/ Définition de la fatigue- corrosion.....	41
IV-3/ Les différents paramètres d’influences.....	42
IV-3-a/ Influence des paramètres mécaniques.....	43
IV-3-b/ Influence des paramètres physico-chimiques.....	43
IV-3-c/ Influence des paramètres électrochimiques.....	43
IV-4/ Mécanisme d’amorçage.....	44
IV-4-a/ Mécanismes par adsorption.....	44
IV-4-b/ Mécanisme par dissolution électrochimique.....	44
IV-4-c/ Fragilisation par l’hydrogène.....	44
IV- 5/ Cas pratiques de Fatigue sous corrosion	44
IV- 6/ Conclusion	48
Chapitre V : Etude expérimentale.....	49
V-1/ Introduction.....	50
V-2/ Matériaux et éprouvettes d’essais	50
V-2-a/ Matériau d’essais	50
V-2-b/ Eprouvettes d’essais.....	51
V-3/ Matériels d’essais.....	53
V-3-a/ Machine de flexion rotative.....	53
V-3-b/ Elaboration des éprouvettes.....	60
V-3-c/ Le milieu corrosif.....	60
V-4/ Protocole et résultats d’essais.....	61
V-5/ Conclusion.....	70
Conclusion générale.....	71
Références bibliographique.....	74

Introduction générale

Introduction Générale

Les ruptures de pièces ou de structures sont très souvent dues à l'endommagement par fatigue et ceci suite à l'application d'efforts répétés ce qui fait la modification des caractéristiques du matériau conduisant à une rupture brutale.

Or, l'influence de l'environnement est très importante dans le comportement des matériaux. La rupture d'un métal résultant de l'action combinée d'un milieu corrosif et d'efforts répétés est appelé **Fatigue-corrosion**, dont le dégât est généralement plus important que l'addition des dégâts de corrosion et fatigue considérés séparément.

Plusieurs structures métalliques conçues pour travailler en sécurité sous contraintes inférieures à la limite de fatigue subissent une rupture inattendue causée par le phénomène de " fatigue - corrosion ".

A titre d'exemple, nous citons l'arbre d'hélice de bateau travaillant en toute sécurité avec satisfaction jusqu'à ce qu'une fuite se produise permettant à l'eau d'imprégner l'arbre en une zone de contraintes alternées maximales. Le développement des fissures peut se faire au bout de quelques jours entraînant la rupture brutale de l'arbre.

Les tubes de pompes en acier pour puits de pétrole utilisés pour pomper l'essence dans les sous-sols ont une durée de vie limitée à cause de la fatigue sous corrosion qui résulte de leurs expositions aux eaux salées.

Vu la fréquente utilisation des aciers dans l'industrie et vu la grande influence des eaux naturelles sur la fatigue - corrosion de l'acier [1], nous allons quantifier l'endommagement d'un acier de construction en fatigue - corrosion.

Pour mener à bien cette étude, nous avons jugé important de consacrer un premier volet pour donner quelques notions sur l'endommagement et les différentes façons de le quantifier, ceci se résume dans le chapitre I qui résume des notions sur la mécanique de l'endommagement ; suivi de notions sur la fatigue au chapitre II, où sont détaillés les paramètres d'influences sur la tenue en fatigue, on s'arrête sur l'effet d'entaille qui présente un volet de ce travail.

Des notions sur la corrosion et la fatigue sous corrosion sont détaillées respectivement aux chapitres III et IV, on termine ce volet avec les résultats d'expériences de différents travaux en fatigue sous corrosion.

Le second volet : est un chapitre détaillant l'étude expérimentale qui englobe les essais utilisés dans cette étude, à savoir la fatigue par flexion rotative et la traction simple, ainsi que les détails des expériences effectuées sur l'acier de construction C 35 couramment utilisée dans la construction des arbres l'interprétation des résultats obtenus est nécessaire pour atteindre l'objet de notre étude qui est la quantification du dommage en fatigue sous corrosion.

Chapitre I :
Notions sur la mécanique de
l'endommagement

I – 1 / Introduction

L'endommagement des matériaux est le processus physique de l'altération d'une ou plusieurs propriétés mécaniques qui conduit à la rupture des structures.

Les matériaux qui sont soumis à des sollicitations mécaniques statiques, cycliques, périodiques ou permanentes subissent une détérioration progressive qui précède la rupture macroscopique, on dit que le matériau est endommagé.

I – 2 / Historique

Ce n'est que récemment que l'on s'est préoccupé de faire la modélisation de la détérioration progressive de la matière qui précède la rupture macroscopique.

1958, c'est la date historique pour la mécanique de l'endommagement, liée à **KACHANOV** [2] c'est la date de publication de son premier mémoire consacré à une variable continue d'endommagement, suivi en **1968** de son élève **RABOTNOV** [3] qui a introduit la notion de contrainte effective.

Cette notion a été reprise principalement en **1970** par LEMAITRE et CHABOCHE, en Suède par HULT, en Angleterre par LECKIE et au Japon par MURAKAMI, et étendue au cas de la rupture ductile et de la rupture par fatigue [2], [3].

I – 3 / Aspects phénoménologiques

L'évaluation du dommage est liée à la durée de vie résiduelle, mais ce concept ne conduit pas à la notion de loi de comportement de l'endommagement.

Les mesures mécaniques globales tel que la modification des caractéristiques d'élasticité, de plasticité ou de viscoplasticité, sont plus faciles à interpréter en terme de variables d'endommagement grâce à la notion de contrainte effective introduite par RABOTNOV [1], KACHANOV [4] de sa part considère que la perte de rigidité du matériau est le paramètre d'endommagement.

Un matériau est vierge de tout endommagement s'il est dépourvu des fissures et de cavités à l'échelle microscopique. Le stade final de l'endommagement est la rupture de l'élément de volume, c'est-à-dire, l'existence d'une fissure macroscopique.

La théorie de l'endommagement décrit l'évolution des phénomènes entre l'état vierge et l'amorçage de la fissure macroscopique. Elle intéresse tous les matériaux aux températures basses et élevées, et tous les types de sollicitations [2], [3].

Les lois d'endommagement fournissent par intégration dans le temps, l'évolution de l'endommagement jusqu'à l'amorçage de la fissure macroscopique. On détermine ainsi le temps correspondant à l'amorçage d'une telle fissure au point le plus sollicité de la structure ; et permet aussi la connaissance des modifications des propriétés mécaniques des produits engendrées par les opérations de formage [2], [3].

I – 3 – a / Variable d'endommagement

Soit un solide endommagé, d'un matériau homogène, isotrope, uniaxial, d'où on isole un élément de volume, figure (I-1).

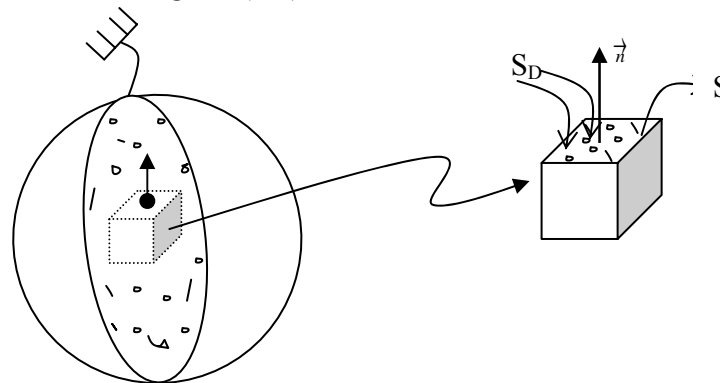


Figure I-1 : Elément endommagé.

S : l'aire de la facette de l'élément de volume repérée par sa normale \vec{n}

S_D : surface des défauts existants dans S .

\tilde{S} : l'aire résistante effective ($\tilde{S} < S$), $\tilde{S} = S - S_D$

Soit D_n l'endommagement local dans la direction \vec{n} défini par :

$$D_n = \frac{S_D}{S} = \frac{S - \tilde{S}}{S} \quad (\text{I-1})$$

On fait correspondre $D_n = 0$ à l'état non endommagé ou vierge, $D_n = 1$ à l'élément de volume rompu en deux parties selon un plan normal à \vec{n} , et l'état d'endommagement est caractérisé par $0 \leq D_n \leq 1$.

I – 3 – b / Contrainte effective

La contrainte effective est la contrainte rapportée à la section qui résiste aux efforts, c'est à dire : $\tilde{S} = S - S_D = S (1-D)$.

On définit donc la contrainte effective par la relation suivante :

$$\tilde{\sigma} = \sigma \cdot \frac{S}{\tilde{S}} \Rightarrow \tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (\text{I-2})$$

$$\tilde{\sigma} \geq \sigma$$

$$\tilde{\sigma} = \sigma : \text{matériau vierge}$$

$$\tilde{\sigma} \rightarrow \infty : \text{au moment de la rupture}$$

I – 3 – c / Principe d'équivalence en déformation

La notion de la contrainte effective repose sur ce qui suit :

Le comportement à la déformation d'un matériau endommagé est traduit par les lois de comportement du matériau vierge, où on remplace la contrainte usuelle par la contrainte effective.

On écrit à titre d'exemple la loi d'élasticité d'un matériau endommagé sous la forme :

$$\varepsilon_e = \tilde{\sigma} / \tilde{E} = \frac{\sigma}{(1-D)E} \quad (\text{I-3})$$

Avec: E le module de Young.

I – 3 – d / Principe d'équivalence d'énergie de déformation

De même que pour le principe d'équivalence en contrainte et déformation, on écrit l'équation d'énergie élastique emmagasinée par rapport à un matériau endommagé sous la même forme que celle d'un matériau vierge (non endommagé) selon SIDDOROFF et

$$\text{CORDEBOIS [4] : } \frac{1}{2} \frac{\tilde{\sigma}^2}{\tilde{E}} = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E}$$

D'où l'équation :

$$\tilde{E} = E (1 - D^2) \quad (\text{I-4})$$

\tilde{E} : Module de Young d'un matériau endommagé,

E : Module de Young d'un matériau non endommagé.

I – 4 / Mesure de l'endommagement

Le concept de contrainte effective associé au principe d'équivalence en déformation, est souvent choisit comme variable pour représenter le phénomène d'endommagement. Son évaluation quantitative est liée à ces variables [2], [4].

I – 4 – a / Variation du module d'élasticité

a – 1 / Méthode statique

Nous avons déjà cité la formule de la loi d'élasticité d'endommagement est unidimensionnelle : $\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} = E \varepsilon_e$, et $\tilde{E} = E (1- D)$

Si E est connu alors on peut quantifier l'endommagement :

$$D = 1 - \frac{\sigma}{E \cdot \varepsilon_e} \quad (I-5)$$

Avec $\sigma = \tilde{E} \varepsilon_e$, on obtient finalement :

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (I-6)$$

Cette méthode est très délicate à exécuter car pour les mesures des modules d'élasticité cela nécessite une bonne précision sur de très faibles déformations; figure (I-2).

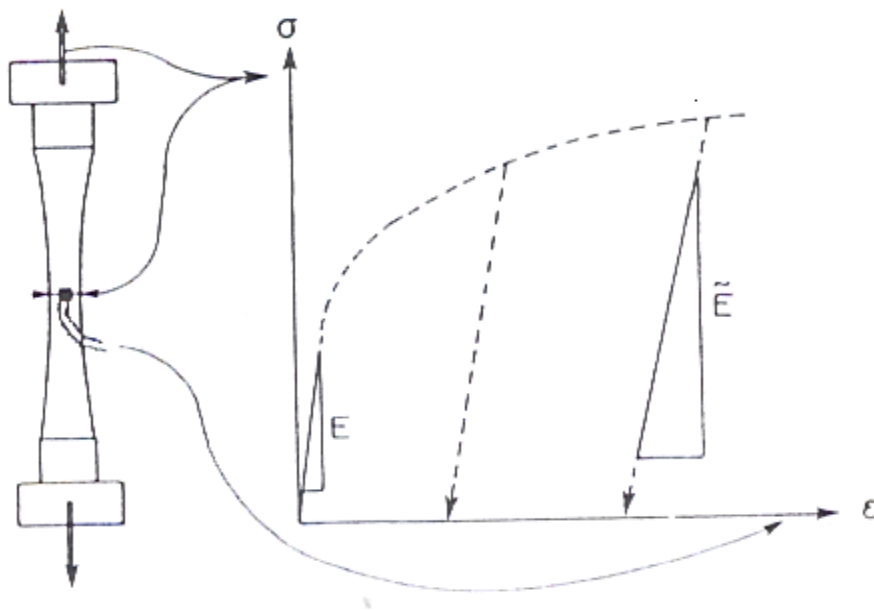


Figure I-2 : Procédure de mesure d'endommagement.

a – 2/ Méthode dynamique par ultra-sons

En dynamique, c'est le même principe qui peut être utilisé. La mesure de la vitesse ou du temps de propagation d'ondes planes dans l'éprouvette du matériau endommagé conduit au module d'élasticité \tilde{E} et de là à l'endommagement $D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E}$; qui s'expriment en fonction des vitesses des ondes longitudinales \tilde{v}_l et transversales \tilde{v}_t .

$$\tilde{E} = \rho \tilde{v}_t^2 \frac{3\tilde{v}_l^2 - 4\tilde{v}_t^2}{\tilde{v}_l^2 - \tilde{v}_t^2} \quad (\text{I-7})$$

$$D \text{ où : } D = 1 - \frac{\tilde{v}_l^2}{v_l^2} \quad (\text{I-8})$$

ρ : Masse volumique du matériau

ν : Coefficient de Poisson

I – 4 – b/ Variation des caractéristiques de plasticité

b – 1/ Caractéristiques d'érouissage monotone

Cette méthode est intéressante pour caractériser l'endommagement plastique ductile en complément des mesures de variation du module d'élasticité. Cet endommagement accompagne les grandes déformations plastiques des métaux et polymères. Il est important à l'approche des conditions de striction [3].

b – 2 / Caractéristiques d'érouissage cyclique

Cette méthode est adaptée à la mesure de l'endommagement par fatigue, et ne s'applique que dans le domaine oligocyclique [3]. Le dommage D s'exprime par la relation :

$$D = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_m^*} \quad (\text{I-9})$$

σ_m : Contrainte maximale.

σ_m^* : Contrainte maximale équivalente de l'endommagement.

I – 4 – c/ Variation des caractéristiques de viscoplasticité

Cette méthode met en évidence l'endommagement de fluage qui se développe au cours du temps. Plus la température est élevée, plus l'endommagement est important [2].

$$D=1-\left[\frac{\dot{\varepsilon}_p^*}{\dot{\varepsilon}_p}\right]^{1/N} \quad (I-10)$$

Avec :

N^* : l'exposant de viscosité.

$\dot{\varepsilon}_p^*$: Vitesse de fluage secondaire.

$\dot{\varepsilon}_p$: Vitesse de fluage tertiaire.

I – 4 –d / Variation de courant électrique

La notion de contrainte effective est remplacée par la densité de courant effectif [2].

$$\tilde{i} = \frac{i}{1-D} \quad (I-11)$$

\tilde{i} : Densité de courant effectif.

I – 5 / Les différents modes de rupture

On dénote quatre modes de ruptures :

- **Par déchirure** : c'est le type de rupture statique ductile, se produit avec la déformation plastique, donc un chargement généralement élevé, (figure I-3).

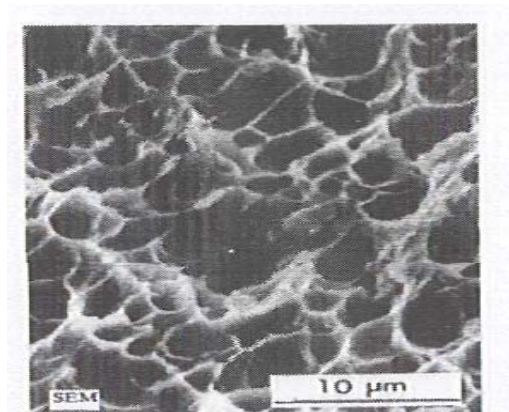


Figure I-3 : Rupture par déchirure [5]

- **Par clivage** : c'est le mode de rupture statique le plus fragile. Le faciès présente des plages planes, brillantes, (figure I-4).

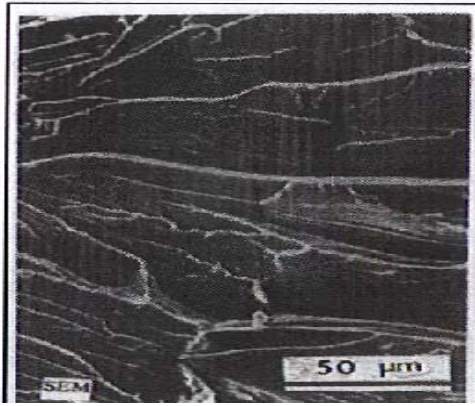


Figure I-4 : Rupture par clivage [5]

- **Par décohesion :** c'est un mode de rupture statique, se produit sans déformation plastique. Il est généralement assisté par l'environnement (température élevée, corrosion...). La séparation dans le métal se produit au niveau des joints de grains. La rupture prend un aspect intergranulaire, (figure I-5).

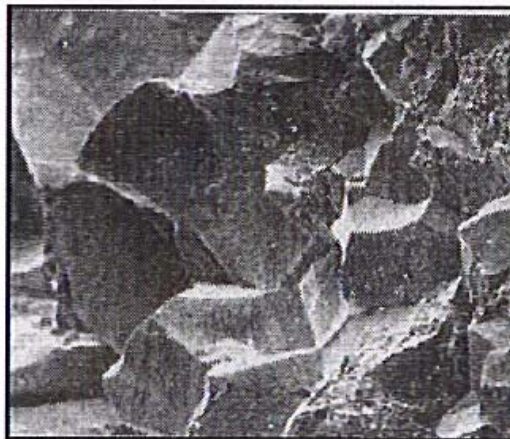


Figure I-5 : Rupture par décohesion [5]

- **Par fatigue :** concerne les sollicitations mécaniques de type répétitif et se produit si la contrainte globale est au dessous d'un seuil situé dans le domaine élastique du comportement du matériau. Plus le niveau de contrainte est faible, plus la distance entre les stries est petite, (figure I-6).

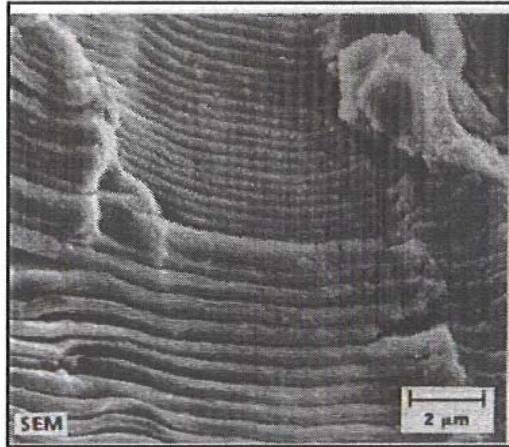


Figure I-6 : Rupture par fatigue [5]

I – 6 / Les dommages par fatigue

La notion de dommage regroupe en général deux définitions différentes, une notion de dommage physique et l'autre descriptif.

Le dommage physique correspond aux variations des propriétés physiques des matériaux lorsqu'il y a fatigue, variations qui reflètent les modifications de structure consécutives à l'action des sollicitations périodiques.

Le dommage descriptif regarde l'histoire des déformations des matériaux quelles que soient leurs causes. Si les pièces d'essai sont soumises à des sollicitations parfaitement régulières il n'en est pas de même des pièces en utilisation. Il convient alors de mettre en lumière comment on arrive à sommer des déformations de nature différente [6].

➤ Représentation du dommage et notion de dommage cumulatif

La modélisation de la succession de dommage par fatigue est assez délicate. On peut néanmoins citer la règle de PALMGREN-MINER [1] qui est la plus fréquemment utilisée.

Cette méthode consiste en fait à sommer les dommages occasionnés au matériau, on définit le dommage par la relation : $D_i = n_i / N_i$ (I-12)

Avec n_i le nombre de cycles imposé sous une contrainte donnée σ_i et N_i le nombre de cycle entraînant la rupture. La façon de procéder est de considérer que les cycles sont cumulatifs et que par généralisation il y a rupture dès que :

$$\Sigma(n_i / N_i) = 1 \quad \text{(I-13)}$$

On parle dans ce cas de dommage linéaire cumulatif.

Il est clair que cette relation possède des limites car les niveaux de contraintes élevées sont plus endommageant que les autres. D'autres chercheurs ont alors amélioré cette relation. On retiendra en particulier deux théories :

HENRY [6] explicite le dommage subi pour un niveau σ de la contrainte par une relation dérivée de la précédente :

$$D = (n/N). (1+ a. (1-n/N)) \quad (I-14)$$

$$\text{Où } a = \sigma_d / (\sigma - \sigma_d) \quad (I-15)$$

De son côté MANSOON [7] essaie de décomposer les phases de propagation de la fissure pour améliorer sa modélisation. Il distingue deux phases :

- une phase d'amorçage, correspond à l'apparition de la fissure,
- une phase de propagation qui décrit la croissance de la fissure dans le temps.

I – 7 / Introduction à la mécanique de la rupture

La mécanique de la rupture a pour objet l'étude des fissures macroscopiques.

Ceci consiste en l'étude du champ des contraintes et des déformations correspondants, et l'établissement des données qui permettent de porter un jugement sur la cinétique et la propagation des défauts ainsi que leur taille critique.

L'hypothèse essentielle de la mécanique linéaire élastique de la rupture (MLER) suppose le matériau :

- homogène,
- isotrope,
- avec un comportement élastique linéaire,
- les forces de volumes et les accélérations sont négligées, et la rupture dynamique n'est pas traitée.

Tout point d'une fissure plane (figure I-7) est repéré soit par ses coordonnées cartésiennes (x, y) soit par ses coordonnées cylindriques (r, θ) :

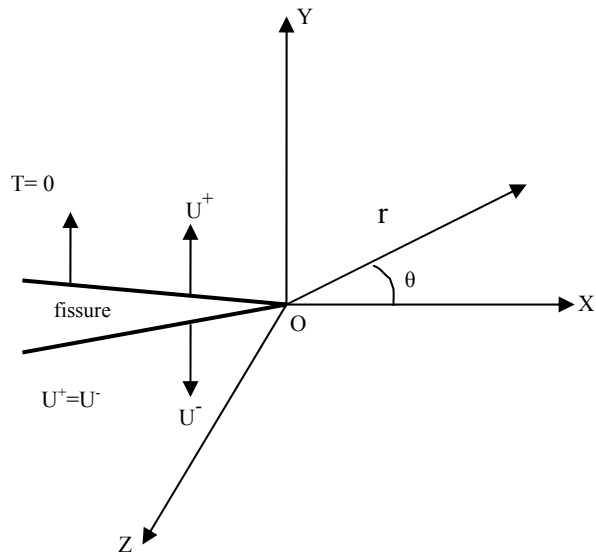
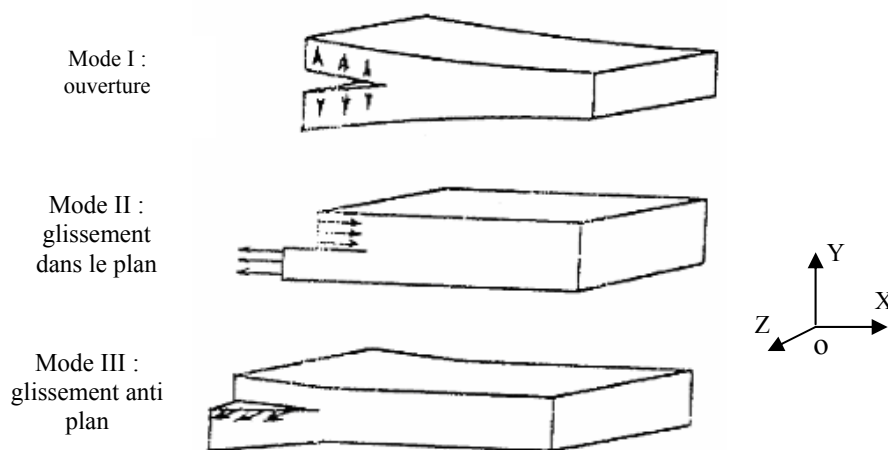


Figure I-7 : Notations adaptées pour une fissure plane.

Les différents modes d'ouverture d'une fissure

Les différents déplacements des lèvres d'une fissure se réduisent à la combinaison de trois modes essentiels, le mode I, II, et III (figure I-8).

- **Mode I :** c'est le mode d'ouverture, considéré comme le mode le plus dangereux.
- **Mode II :** c'est un cisaillement dans le plan de la fissure et parallèle à OX.
- **Mode III :** c'est un cisaillement antiplan, situé dans le plan de la fissure et parallèle à OZ.



les flèches indiquent les déplacements des faces de la fissure

Figure I-8: Modes de sollicitations d'une fissure.

I – 7 – a / Introduction du facteur d'intensité des contraintes K

Un résultat important en élasticité linéaire a été établi par Irwin. Le premier terme du développement limité des contraintes devant une fissure est identique pour tous les problèmes correspondant à un mode d'ouverture donné [8].

Ce facteur est connu à un facteur multiplicatif près, noté K_I , K_{II} , K_{III} appelés facteurs d'intensité de contraintes en mode I, II ou III. Il est important de ne pas confondre le facteur de concentration de contraintes K_t qui donne l'information locale à la pointe de l'entaille, et le facteur d'intensité de contraintes K qui décrit l'ensemble de la singularité spatiale du champ de contrainte.

Soit une plaque avec une entaille elliptique aiguë (figure I-9) ($b \ll a$), cette dernière a un

$$\text{facteur de concentration de contrainte : } K_t \cong 2\sqrt{\frac{a}{r}} \quad (\text{I-16})$$

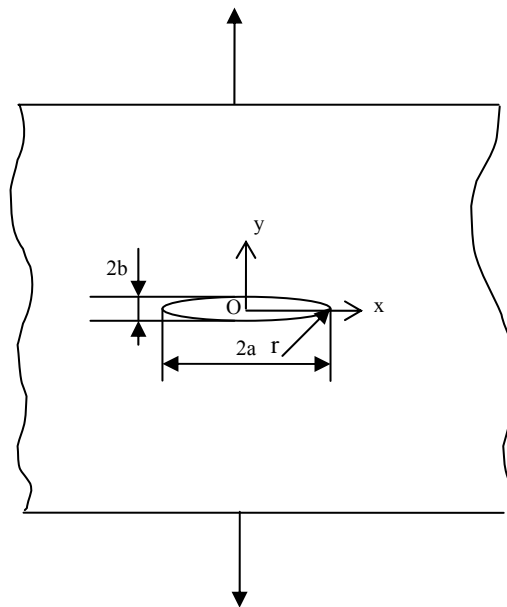


Figure I-9 : Fissure dans un milieu plan infini sollicité en mode I.

De façon générale, on notera :

$$\sigma_{ij} = \frac{K_\alpha}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^\alpha(\theta) + o\left(\frac{1}{\sqrt{r}}\right) \quad (\text{I-17})$$

Il a été montré par Irwin que K_I peut s'exprimer par un passage à la limite comme suit :

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sigma_{\max} \sqrt{r} \quad (\text{I-18})$$

Où r est le rayon de courbure de l'entaille.

L'expression de K_I pour le cas d'une fissure de longueur $2a$ dans une plaque infinie, connue aussi comme la plaque ou le modèle de Griffith est :

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (\text{I-19})$$

Il est à noter que l'intérêt est plus porté sur le mode I, c'est le plus fréquemment retrouvé car il dissipe moins d'énergie.

I – 7 –b / Le principe énergétique

b - 1/ Taux de restitution d'énergie « G »

Les premières théories concernaient les matériaux très fragiles comme le verre. Vers 1920, Griffith a proposé une théorie basée sur l'énergie élastique restituée lors de l'avancée de la fissure et l'énergie dissipée sous forme de création de nouvelles surfaces. La théorie de Griffith s'appuyait sur le calcul d'une cavité elliptique.

On appelle P l'énergie potentielle emmagasinée dans la structure. On note ∂A l'incrément de surface correspondant à l'extension de la fissure. On désigne par G la force d'extension de la fissure ou encore le taux de restitution d'énergie [8].

$$G = - \partial P / \partial A \quad (\text{I-20})$$

Soit le système fermé constitué par la pièce fissurée et les forces qui lui sont appliquées, en supposant que le matériau a un comportement linéaire élastique, (figure I-10).

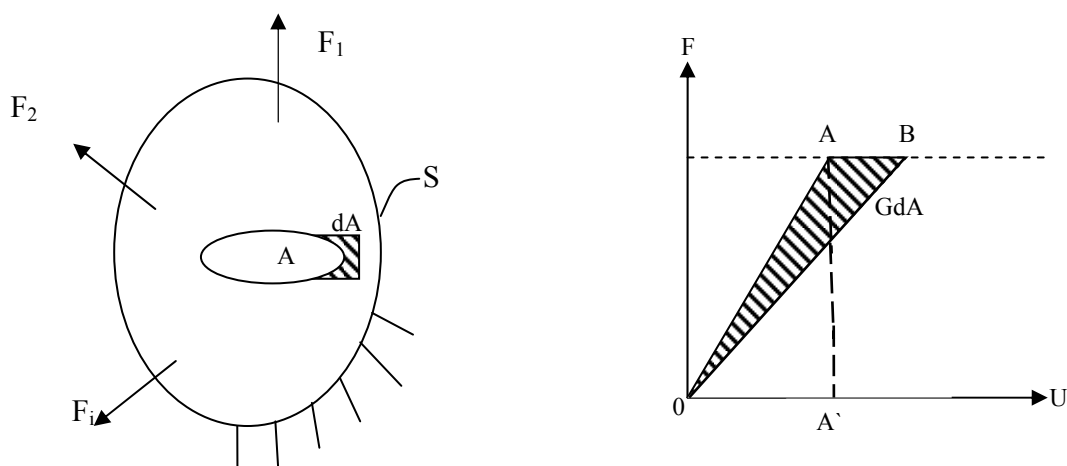


Figure I-10 : Schéma du bilan-énergétique en élasticité linéaire [8]

L'énergie constante de ce système comprend l'énergie potentielle des forces appliquées U , l'énergie élastique emmagasinée E , l'énergie de surface $(S+2A) \gamma_s$, où S est la surface externe et A celle de la fissure comportant deux lèvres, et l'énergie cinétique W_c , le premier principe fait que :

$$dU+dE+d(2A+S)\gamma_s+dW_c=0 \quad (\text{I-21})$$

En considérant :

$$dS=0 \text{ et } dP=dU+dE,$$

avec :

P : l'énergie potentielle totale $U+E$;

on obtient :

$$dP+2\gamma_s dA+dW_c=0$$

$$\text{En posant : } G=2\gamma_s+\frac{dW_c}{dA} \quad (\text{I-22})$$

A l'équilibre nous avons : $dW_c=0$,

Nous aurons :

$$G_c = 2\gamma_s \quad (\text{I-23})$$

En dépassant le seuil critique G_c , il y a propagation de la fissure.

Lorsque $G < G_c$, la fissure devrait se refermer, mais réellement ceci ne se produit pas car il y a apparition de plusieurs processus irréversibles notamment l'oxydation des surfaces de la rupture.

b – 2 / Relation entre G et K

Le facteur d'intensité de contraintes décrit la distribution des contraintes et des déformations près d'une fissure. Le taux de restitution d'énergie G est une grandeur globale, alors que K est une grandeur locale.

Supposons le cas plan d'une plaque d'épaisseur B contenant une fissure de longueur (a) avec une avancée de $(a+\Delta a)$, (figure I-11), c'est le cas du mode I, dans un plan [9].

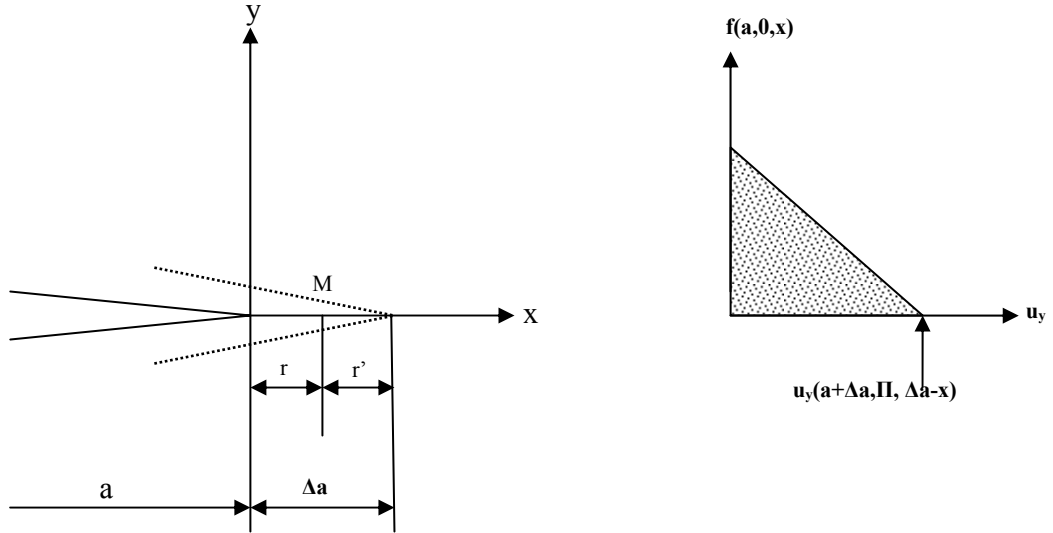


Figure I-11 : Etat virtuel de l'avancée et la fermeture d'une fissure.

L'énergie élastique libérée au cours de cette avancée est égale en valeur absolue au travail ΔW nécessaire pour refermer la fissure sur l'étendue Δa . Au cours de la refermeture, les déplacements en tout point M passeront de $u_y(a+\Delta a, \Pi, \Delta a-x)$ à 0, et les forces par unité d'épaisseur vont augmenter de 0 à $\sigma_{yy}(a,0,x)dy$.

Le travail correspondant sera : $dW = 2(B/2) \sigma_{yy}(a,0,x) u_y(+\Delta a, \Pi, \Delta a-x) dx$

Le travail total pour les deux lèvres sera égal à [9]:

$$\Delta W = B \int_0^{\Delta a} \sigma_{yy} u_y dx = GB\Delta a \quad (I-24)$$

$$\Delta W = B \int_0^{\Delta a} \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} (x-a)^{-1/2} \frac{(k+1)}{2\mu} \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} (a+\Delta a-x)^{1/2} dx \quad (I-25)$$

$$\text{On obtient : } G = \frac{k+1}{2\mu} \frac{K_I^2}{4} \quad (I-26)$$

$$\text{En déformation plane : } k = 3 - 4\nu : G = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{E} \quad (I-27)$$

$$\text{En contrainte plane : } G = \frac{K_I^2}{E} \quad (I-28)$$

$$\text{En mode mixte (II et III) : } G = \frac{(K_I^2 + K_{II}^2)(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1+\nu)}{E} K_{III}^2 \quad (I-29)$$

Notons que cette équation ne peut être appliquée que dans le cas où la propagation se fait dans le plan de la fissure.

I - 8 / Conclusion

Les lois d'endommagement telle qu'elles ont été définies par RAVOTNOV et KACHANOV [2,3], donnent l'évolution de l'endommagement jusqu'à l'amorçage des fissures. Elles nous permettent également de quantifier l'endommagement, afin d'avoir une idée sur les modifications mécaniques engendrées. La mécanique de la rupture porte un intérêt à l'étude des fissures macroscopiques. Le facteur de concentration de contraintes est défini pour donner l'information locale à la pointe d'une fissure. Le facteur d'intensité de contraintes, par contre, décrit les singularités du champ de contrainte, c'est une grandeur utilisée en fatigue.

Chapitre II :
Notions sur la Fatigue

II- 1 / Introduction

L'origine du terme "**fatigue**" est le terme latin "**fatigāre**" qui signifie "Épuiser - fatiguer".

La définition descriptive de la fatigue a été retrouvée dans le rapport intitulé : "Principes généraux sur les essais de fatigue des métaux" publié en 1964 par l'organisation internationale de standardisation de Genève [10].

La fatigue est un phénomène superficiel pour ce qui concerne les pièces mécaniques sollicitées en tant que des pièces de structures.

L'essai de fatigue a pour objet la détermination du comportement d'éprouvettes de métal des pièces ou d'ensembles mécaniques, sous sollicitations de contraintes périodiques.

Il en résulte une rupture qui peut survenir pour des contraintes appliquées bien inférieures à la charge de rupture statique [11].

Si le terme "**Fatigue**" a été consacré par l'usage pour désigner la défaillance en service, on a appelé "**Endurance**" l'aptitude à résister à la fatigue.

II- 2 / Historique

La "**fatigue**" est la cause de la défaillance à laquelle n'échappe aucun matériau sous l'action des efforts variables.

Les premiers essais entrepris dans ce sens ont été effectués en 1829 par ALBERT, en Allemagne.

En 1839, HODGKINSON [3] fut chargé par le gouvernement britannique d'étudier les conditions d'emploi du fer et de la fonte dans les chemins de fer; en particulier pour la construction des ponts métallique.

Dés 1843, RANKINE [12] (jeune ingénieur des chemins de fer anglais qui devait s'illustrer plus tard dans l'étude de la mécanique) reconnut les caractères distinctifs des cassures de "fatigue" et souligna les dangers des pièces comportant des angles vifs.

En Allemagne : WÖHLER [11], entreprit de nombreux essais en vue de déterminer les causes de rupture d'essieux. Il poursuivit ses expériences de 1852 à 1869, créa les premières machines d'essais, de flexion rotative et formula les lois fondamentales de la fatigue.

En 1864, sir W.FAIRBAIN [12], poursuivit des essais de flexion rotative sur des poutres de fer reposant sur deux appuis et qui étaient fléchies en leur milieu.

Vers 1900, EWING, HAMFREY s'attachèrent à l'étude du mécanisme de la fatigue à l'aide de l'observation microscopique.

A la même époque, GILCHRIST expliqua le phénomène de la fatigue comme une fissuration résultant du déplacement de la charge de rupture.

Dans le même ordre d'idée, en 1910, BAIRSTOW mit en évidence l'hystérésis des déformations élastiques et sa relation avec la fatigue [12].

D'autres recherches ont été élaborées dans cette période, par : SMITH (1910), BACH (1913), HAIGH (1915), MOORE et STEELEY (1915), SMITH et WEDGWOOD (1915), LUDWIK (1919), GOUGH et HANSON (1923), JENKIN (1923), MASING (1926) et SODERBERG (1939) [3], [11], [12].

Plusieurs travaux ont été sérieusement étudiés, à titre d'exemple les travaux remarquables qui ont été poursuivis à l'institut Allemand WÖHLER sous la direction du Docteur FÖOPL. Des chercheurs ont conjugué leurs efforts pour faire face à l'ampleur des problèmes soulevés par l'étude du comportement en fatigue [13].

II - 3 / Courbe de WÖHLER

L'essai le plus simple consiste à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodiques d'amplitude maximale et fréquence constante.

On porte sur une échelle semi-logarithmique le nombre de cycles à rupture, en fonction de la contrainte maximale des cycles.

A chaque éprouvette correspond un point (N_r , σ_r) sur un graphe appelé : courbe de WÖHLER. Généralement cette courbe tend asymptotiquement vers une limite appelée : limite d'endurance notée σ_D , en dessous de laquelle l'amorçage ne se produit pas, (figure II-1).

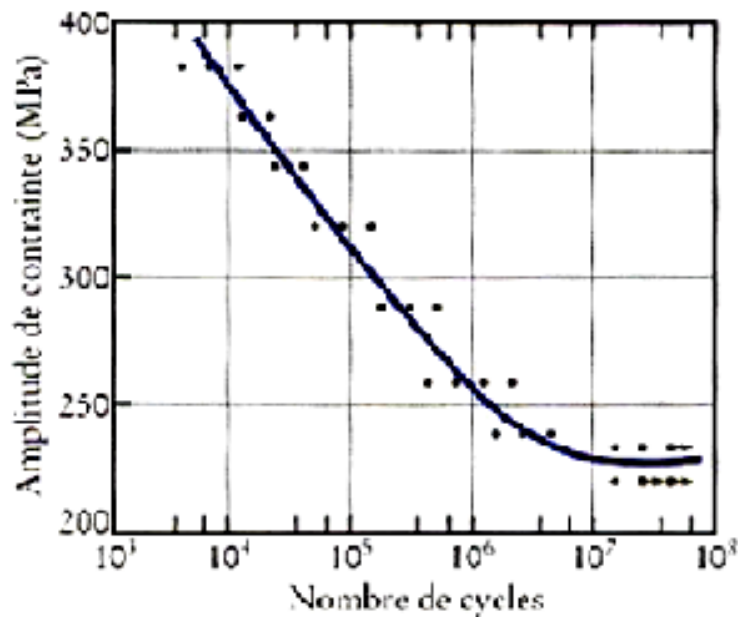


Figure II - 1 : Courbe de WÖHLER [14]

II - 4 / Classification des essais de fatigue

Il existe deux catégories d'essais de fatigue :

- Essais sous amplitude à charge constante.
- Essais sous amplitude à charge variable.

On distingue dans le premier cas à titre d'exemple, les essais d'endurance permettant la détermination de la limite d'endurance et les essais de fissuration permettant la mesure de la vitesse de propagation des fissures de fatigue [14].

Dans le second cas, nous citerons par exemple, les essais à charge imposée (essai de flexion rotative), des essais à déplacements imposés (essai de flexion plane). On peut classer les modes de sollicitation comme suit :

- les essais sous efforts axiaux (traction ou compression),
- les essais de flexion plane ou rotative,
- les essais de torsion,
- les essais sous efforts combinés.

II - 5 / Les différents paramètres d'influences

Plusieurs paramètres de différentes natures influent d'une manière ou d'une autre sur la tenue en fatigue.

Dans ce paragraphe, nous citons brièvement ces différents paramètres d'influence.

II - 5 -a / Effet de la fréquence et du type d'essai

La comparaison des résultats d'essais a montré que les valeurs des limites d'endurance diminuent lorsqu'on passe de la flexion rotative à la flexion plane, puis à la traction - compression et enfin à la torsion. Ceci pour montrer que pour un matériau donné, la résistance à la fatigue varie en fonction du type d'effort.

Notons que l'effet de la fréquence est relativement faible dans le cas des aciers sollicités à l'air ambiant, tandis que dans un milieu différent de ce dernier, le rôle de la fréquence est primordial [12].

II - 5 -b / Influence des contraintes appliquées

La limite de fatigue peut varier selon la façon dont les contraintes sont appliquées aux pièces en service. Si par exemple, on applique à une éprouvette momentanément des efforts alternés supérieurs à la limite d'endurance et durant une période d'application suffisante, on trouvera une nouvelle limite de fatigue inférieure à la précédente, ce phénomène est appelé l'endommagement du matériau par surcharge " **overstressing** ".

Au contraire si les efforts alternés sont inférieurs à la limite d'endurance, on obtiendra une nouvelle limite plus élevée, c'est ce qui est appelé l'effet de sous charge " **understressing** " [15].

II - 5 -c / Influence des paramètres géométriques

Nous avons vu que la fatigue est un phénomène superficiel, donc les fissures de fatigue s'amorcent généralement à la surface des pièces, aux endroits de concentration de contraintes, provenant soit de la forme géométrique (entaille, filetage, congé, trou, rainure,...), soit de la micro géométrie de la surface telle que les rayures d'usinage.

Il a été trouvé au cours des essais de fatigue que la limite d'endurance diminue avec l'augmentation des dimensions des éprouvettes d'essais [11].

Il faut noter encore que la modification des propriétés dans la couche superficielle (décarburation) où la présence d'hétérogénéité dans le métal (inclusions) fait qu'il y a une influence sur la tenue en fatigue [7].

c - 1/ Effet d'entaille

Parmis les paramètres qui influent sur la fatigue, la variation de la géométrie des pièces mécaniques, dont nous citons les entailles, qui perturbent localement le champ des contraintes et conduisent ainsi à des concentrations de contraintes locales élevées, à partir desquelles une fissure de fatigue peut s'amorcer, (figure II-2).

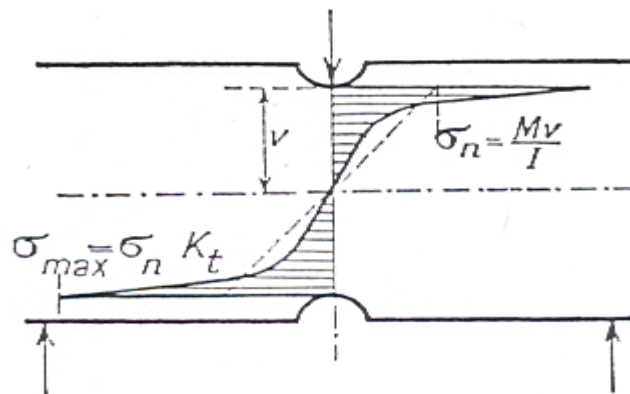


Figure II-2 : Allure du champ de contrainte au fond d'entaille [12]

c – 1 – 1/ Le facteur de concentration de contrainte

La concentration de contrainte locale est mesurée à l'aide des coefficients de concentration de contrainte [16].

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_n \quad (\text{II-1})$$

σ_{\max} : la contrainte maximale à fond d'entaille

σ_n : la contrainte nominale

C'est un coefficient théorique et son calcul repose sur les hypothèses de la théorie d'élasticité pour les cas de charges statiques. Il est donné mathématiquement à l'aide des formules illustrées dans les travaux de NEUBER et de PETERSON, citée par CAZAUD [12] :

$$K_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{A \frac{2r}{D-d} + B \frac{2r(1+2r/d)^2}{d}}} \quad (\text{II-2})$$

Avec :

D: diamètre extérieur ou largeur extérieur de l'éprouvette,

d : diamètre à fond d'entaille ou largeur à fond d'entaille,

r : rayon à fond d'entaille,

A et B : dépendent du type de sollicitations (traction - compression, flexion, torsion).

c – 1 – 2 / Facteur d'effet d'entaille K_f et le facteur de sensibilité à l'entaille q

L'influence de l'entaille sur la durée de vie est décrite par le coefficient de réduction à la fatigue $K_f = \sigma_{D0} / \sigma_D$ (II-3)

σ_{D0} : limite d'endurance sur éprouvette lisse

σ_D : limite d'endurance sur éprouvette entaillée

La détermination de K_f se fait en deux étapes :

D'abord, l'acuité de l'entaille est estimée en considérant le matériau élastique par le coefficient de concentration de contrainte K_t , rapportant la contrainte maximale à fond d'entaille σ_{max} à la contrainte nominale σ_n , qui ne tient pas en compte la perturbation apportée par l'entaille (déterminée généralement par la loi de l'entaille $K_t = \sigma_{max} / \sigma_n$).

Après, il est tenu en compte l'adaptation du matériau au fond d'entaille. En effet, du fait du niveau élevé de la contrainte, le matériau s'adapte localement par plasticité et ceci d'autant plus que R_m est faible et l'acuité de l'entaille est élevée.

De ce fait, notons qu'on a toujours $K_f \leq K_t$. la relation entre K_t et K_f est exprimée par le coefficient de sensibilité à l'entaille q défini par THUM [18] :

$$q = (K_f - 1) / (K_t - 1) \quad (II-4)$$

Une autre relation proposée par YEN et DOLAN [19]:

$$q = K_f / K_t \quad (II-5)$$

PETERSON [9] de sa part propose pour q la relation :

$$q = 1 / (1 - a/r) \quad (II-6)$$

Avec : a (mm) : $270^{1,8} / R_m$ (MPa)

r (mm) : rayon à fond d'entaille

Une autre relation a été proposée par PLUVINAGE [20] basée sur la contrainte locale :

$$q = \sigma_l / \sigma_{max}(r, \psi) \quad (II-7)$$

Avec : σ_l : contrainte locale, elle correspond à la limite élastique

$\sigma_{\max}(r, \psi)$: valeur maximale du champ de contrainte déterminée numériquement.

Une autre relation empirique du facteur de sensibilité d'entaille en fonction du rayon à fond d'entaille donnée par NEUBER [21] sous la forme :

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho}{r}}} \quad (\text{II-8})$$

Avec ρ : constante du matériau appelée constante de NEUBER. NEUBER a relié cette constante à la grosseur du grain des aciers, mais plus tard, KHUN et HARDRATH [22] l'ont relié à la limite de rupture des aciers. Cette relation est donnée sous forme d'une courbe (figure II-3).

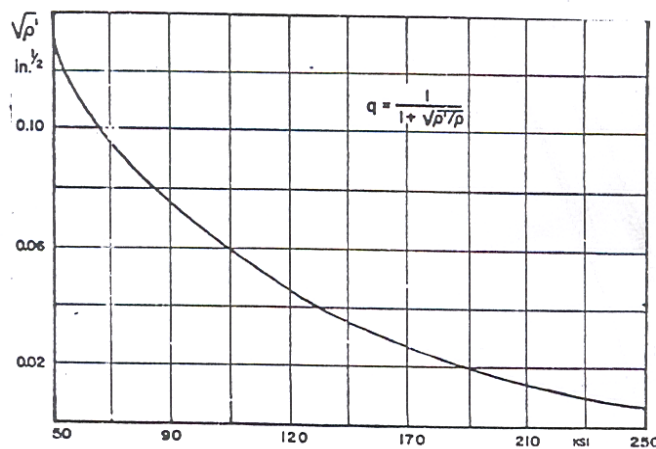


Figure II-3: Constante de NEUBER en fonction de la limite de rupture

II - 5 -d / Influence de la température et de l'environnement

L'environnement joue un rôle très important sur la tenue en fatigue, surtout que de très nombreuses pièces soumises à des sollicitations cycliques sont souvent plongées dans des environnements agressifs.

Beaucoup d'expériences et de recherches ont été élaborées dans ce sens et il en résulte que la diminution de la résistance à la fatigue par corrosion avant l'essai est généralement faible, par contre, l'influence de la corrosion exercée lors de l'essai de fatigue est quand même considérable [1], [14].

Il est à noter que la température aussi a un effet sur la tenue en fatigue des matériaux, la raison pour laquelle il est recommandé de noter la température moyenne des essais [12].

II – 6/ Conclusion

La fatigue est un phénomène d'endommagement cyclique. Plusieurs paramètres, influent sur la tenue en fatigue, dont l'effet d'entaille qui constitue un volet de ce travail. En fatigue, il peut être décrit comme étant la modification du champ de contraintes dans les pièces entaillées, et change considérablement avec la géométrie de l'entaille et le mode de chargement, [33].

Chapitre III:
Notions sur la corrosion

III-1/ Introduction

Le verbe « *corroder* » est dérivé du mot latin « *rodere* » signifiant « qui ronge ». Ce mot est entré dans la langue française en 1314 pour désigner l'action de ronger, de détruire progressivement par une action chimique.

Le mot « *corrosion* » est emprunté, au début du XIV^e siècle, au bas latin « *corrosio* », qui désigne l'action de ronger, la morsure. Il a d'abord été introduit en médecine [23].

Ici dans notre contexte désigne la détérioration lente, progressive ou rapide des propriétés d'un métal.

Autrefois, il était fréquent d'entendre parler d'oxydation pour désigner ce qu'on appelle plus couramment aujourd'hui de la corrosion. L'utilisation de ce terme était correcte car la corrosion est aussi une réaction de nature électrochimique où le métal est oxydé pour se retrouver le plus souvent à l'état d'oxyde, il se trouvait dans le minerai.

L'immense majorité des problèmes de corrosion est liée à la présence d'eau liquide au contact des métaux. C'est le cas particulièrement des environnements naturels, tels que : les eaux douces ou de mer, mais aussi : l'atmosphère ou les sols.

Les différents phénomènes de corrosion « métallique humide » qui se traduisent par une vaste diversité de forme d'attaque, sont tous d'origine électrochimique [24].

Une conclusion peut être faite, c'est que la corrosion est le résultat d'un ensemble de réactions électrochimiques ; qui mettent en jeu des électrons, des espèces chimiques neutres (atomes et molécules), ou chargées (ions), qui se déroule à l'interface d'une phase métallique et d'une phase aqueuse.

III-2/ Historique

La corrosion est un phénomène connu depuis la découverte des métaux. L'étude scientifique a commencé au début du XIX^e siècle avec la découverte de la décomposition de l'eau par électrolyse en 1800 par NICHOLSON et CARLYLE [25], à partir du courant électrique fourni par une « batterie galvanique ».

HUMPHREY DAVY [26], établit alors une relation entre la production d'électricité et l'oxydation du zinc, l'un des métaux constituant le générateur d'électricité, l'autre étant le cuivre.

Le chimiste genevois AUGUSTE DE LA RIVE développa en 1830 les bases de la théorie électrochimique de la corrosion qui fut reprise au début du XX^e siècle par W.R.WITHNEY et achevée par T.P.HOAR et U.R.EVANS à la fin des années 1920, [27, 28].

C'est dans le premier quart du XX^e siècle que l'étendu le coût de la corrosion des métaux fut perçu dans toute son ampleur.

III-3/ Description de la corrosion

Il est important de spécifier qu'un métal peut se trouver dans trois états vis à vis de son milieu ambiant. Ces états sont, [29, 30, 31]:

➤ Immunité

C'est le cas où le métal et le milieu sont dans un état de stabilité thermodynamique ; ils ne peuvent réagir, même à vitesse négligeable : la corrosion est impossible. Cette situation est rencontrée, dans la pratique avec les métaux nobles tel que l'or et le platine.

➤ Passivité

Dans ce cas, le métal et le milieu ne sont pas dans un état de stabilité thermodynamique, mais le métal se couvre d'un film protecteur – d'une façon naturelle- qui fait son isolement du milieu extérieur.

Nous citons à titre d'exemple : l'aluminium, l'acier inoxydable qui ont la caractéristique de résistance à la corrosion due à leur comportement passif. Ce film ne doit pas présenter de faiblesse locale.

➤ Activité

Contrairement au deux cas de figures, ici le métal n'est pas stable thermodynamiquement, et il n'est pas recouvert d'une couche protectrice. Dans sa réaction avec le milieu environnant, le métal se corrode.

Le phénomène de corrosion se passe à l'interface entre une phase métallique [électrode] et une phase aqueuse [électrolyte] mettant en jeu des charges et des ions.

III- 3- a / Processus de la corrosion

La corrosion d'un métal ou d'un alliage peut se développer selon différents processus qui font la caractéristique de chaque type de corrosion :

- corrosion chimique,
- corrosion électrochimique,
- corrosion biochimique,
- corrosion accompagnée d'érosion.

a-1/ Corrosion chimique

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide, le métal, et une phase gazeuse ou liquide. On appelle *corrosion sèche*, le phénomène où le réactif est gazeux ; tandis que si le réactif est liquide, il en résulte une attaque du métal avec la formation d'un produit de corrosion à sa surface même. Le plus souvent ce type de corrosion est accompagné de corrosion électrochimique, [24].

a-2/ Corrosion électrochimique

Ce type de corrosion se manifeste dans le cas d'une hétérogénéité, soit dans le métal, soit dans le réactif. L'existence de ces hétérogénéités forme une pile avec le passage d'un courant de l'anode vers la cathode dans le réactif. Ce type de corrosion est d'une grande importance, (figure III-1), [25]. D'après Pluvinaige et Qilafkou [33], le même principe se passe au fond d'entaille, la figure (III-2) illustre ce type de corrosion au fond d'entaille.

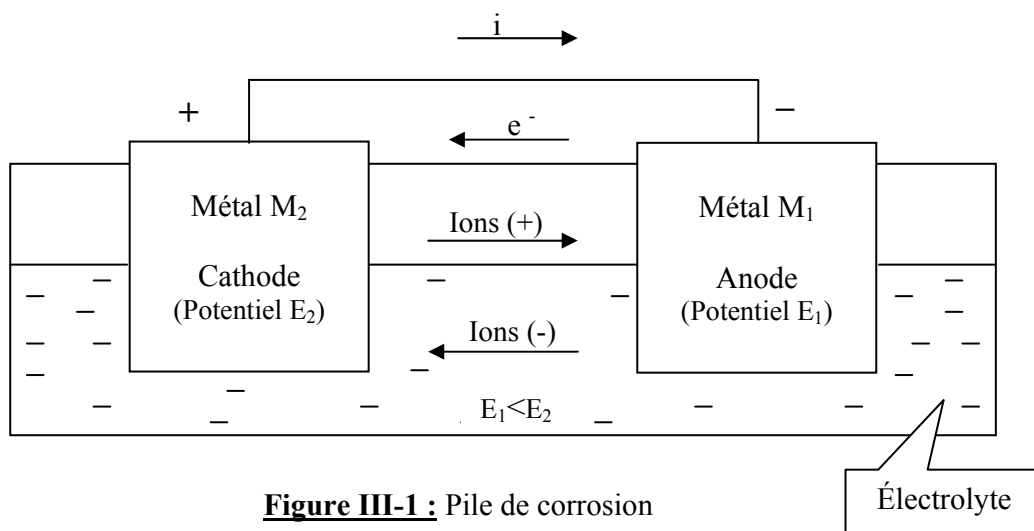


Figure III-1 : Pile de corrosion

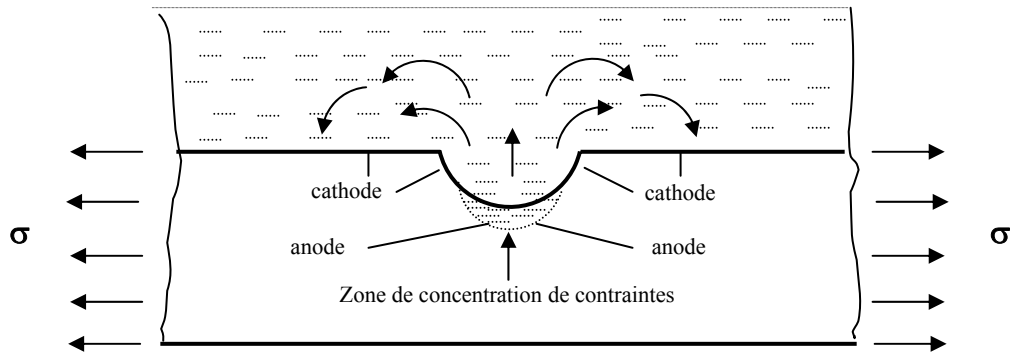


Figure III – 2 : Schéma représentatif du processus de corrosion au fond d'entaille [33]

a-3/ Corrosion biochimique

C'est l'attaque bactérienne des métaux particulièrement dans les canalisations enterrées, [31].

a-4/ Corrosion avec érosion

Quand les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface du métal, ils ralentissent en général la vitesse de corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même, ou celui des particules solides qu'il contient, il y a alors accélération de la corrosion, [31].

III–3-b/ Morphologie de la corrosion

Les différentes formes de corrosion peuvent être classé comme suit :

- a) la corrosion généralisée,
- b) la corrosion localisée,
- c) la corrosion en présence de contraintes,
- d) la corrosion à usure mécanique.

b-1/ Corrosion généralisée

Tel que l'indique son nom, la corrosion généralisée se manifeste par une usure de toute la surface exposée. Cette forme peut être : uniforme ou galvanique.

b-1-1/ La corrosion uniforme

Se caractérise par une attaque de toute la surface exposée au milieu, elle se caractérise normalement par une réaction chimique ou électrochimique, elle est attribuable aux modifications du milieu ou celles de la surface d'un même métal, [25].

b-1-2/ la corrosion galvanique

Elle introduit les notions d'anode et de cathode de la différence de potentiel entre chacune, ainsi que le courant de corrosion.

La corrosion galvanique fait intervenir des métaux différents, c'est une forme de corrosion généralisée qui se reconnaît à l'usure de la surface et se traduit par une perte d'épaisseur et même de perforation, [27].

b-2/ La corrosion localisée

C'est une forme de corrosion très insidieuse qui peut être catastrophique. Elle n'intéresse que certains sites de la surface qui ne comportent que des sites anodiques contrairement aux parties non attaquées qui sont cathodiques, [27].

b-2-1/ Corrosion par piqûres

Les piqûres constituent une forme d'attaque extrêmement localisée qui aboutit au percement du métal, suite à une profonde pénétration due à l'installation de la corrosion dont la zone anodique ici se limitant à un point.

Vu leurs dimensions réduites, il est très difficiles de déceler ces piqûres et parce que très souvent recouvertes de produits de corrosion. Ce type de corrosion peut avoir plusieurs origines, tel que l'existence d'inclusions, [25].

b-2-2/ Corrosion caverneuse (par crevasses)

Il s'agit d'une corrosion qui se manifeste au niveau des interstices existant entre pièces métalliques, entre lesquelles l'électrolyte peut séjourner. Elle est particulièrement dangereuse dans le cas de certains aciers inoxydables, [28].

b-2-3/ Corrosion intergranulaire

Les métaux à l'état solide sont constitués par des « grains » et possèdent une structure granulaire ou cristalline. Des attaques localisées aux interfaces s'appellent : corrosion intergranulaire. Ce type de corrosion est particulièrement dangereux car, bien que la quantité de métal attaqué soit faible, les caractéristiques mécaniques sont altérées car les fissures ainsi produites affaiblissent le métal, [31].

b-3/ La corrosion en présence de contraintes

Cette forme de corrosion se traduit par l'existence de fissures qui suivant le cas peuvent être inter ou transgranulaires, ou ramifiées.

Nous citons la fatigue-corrosion et la corrosion sous contraintes et l'attaque par fragilisation par hydrogène, [25]. Cette forme de corrosion englobe les usures faisant intervenir les contraintes comme une caractéristique mécanique des matériaux.

b-3-1/ La corrosion sous tension

La corrosion sous tension correspond à l'attaque d'un milieu corrosif sur un matériau sous contrainte. Elle se présente sous la forme de fissures intergranulaires et transgranulaires ; ces types de fissures peuvent se trouver dans un même alliage en fonction de l'environnement et de la structure métallique, [28].

b-3-2/ La fatigue – corrosion

Tel que l'indique son nom, ce type d'usure réunit l'effet de corrosion avec l'effet de fatigue, les fissures dans ce cas sont perpendiculaires aux contraintes elles sont habituellement transgranulaires et ne présente pas de branches comme plusieurs fissures de corrosion sous contraintes, [27].

b-3-3/ Attaque de fragilisation par hydrogène

Cette forme d'attaque localisée est décrite parmi les usures occasionnées par les contraintes. La pénétration de l'hydrogène entraîne une baisse des caractéristiques mécaniques des matériaux. Le mécanisme de ce type de rupture découle de la différence entre l'hydrogène atomique et moléculaire. L'hydrogène atomique provenant des réactions

de corrosion par exemple, peut se diffuser dans le métal avant de se combiner à sa surface à l'endroit où il trouve un vide pour former l'hydrogène moléculaire, qui ne peut plus se diffuser.

La figure (III-3) résume les trois types de corrosion en présence de contrainte, [31].

b-4/ La corrosion à usure mécanique

Les usures mécaniques comprennent la corrosion-érosion et la cavitation.

L'action simultanée de formation de films d'oxydes et d'usure par les agents non électrochimiques lie les phénomènes.

b-4-1/ La corrosion – érosion

La corrosion-érosion suppose un accroissement de la vitesse de détérioration en raison du mouvement relatif du fluide et de la surface métallique. Le métal éliminé en surface sous forme d'ions dissous ou, encore, sous la forme de produits solides de corrosion, balayés mécaniquement de la surface métallique.

b-4-2/ La cavitation

C'est un genre d'usure mécanique. Un métal ayant subi une cavitation, a une apparence semblable à un métal piqué sauf que les usures sont très rapprochées et forment un certain motif de surface usée.

III – 4 / Conclusion

L'effet de la corrosion est très néfaste ; il est de plus en plus grave lorsqu'on est devant un problème de corrosion localisée. Sous l'action combinée d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif, des fissures peuvent s'amorcer et se propager jusqu'à, dans un grand nombre de cas, provoquer la rupture des pièces. La fatigue sous corrosion, est citée parmi les différentes formes de corrosion sous contrainte, qui sera détaillée dans le chapitre qui suit.

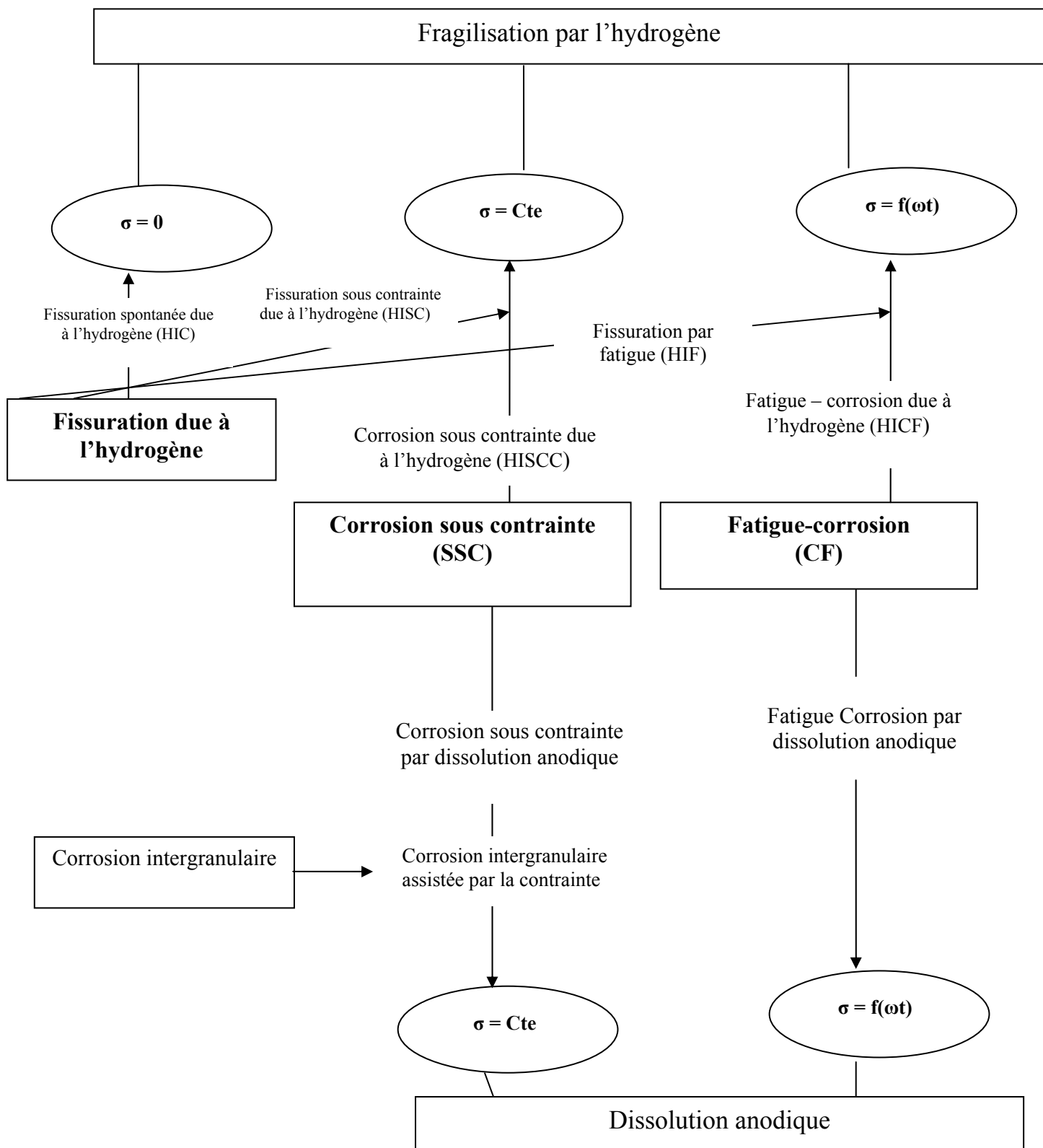


Figure III-3 : Les phénomènes de fissuration sous contrainte due à la fissuration par l'hydrogène et la dissolution anodique [31].

Chapitre IV :
Notions sur la fatigue sous corrosion

IV-1/ Introduction

Bien que l'expression «Fatigue sous Corrosion » ait été utilisé auparavant par MAC ADAM en 1926, ce n'est qu'en 1971 que s'est tenue à Storrs, Connecticut, USA, une conférence internationale sur la fatigue sous corrosion pour passer en revue et analyser ce problème, [11].

Cette conférence n'a pas permis de comprendre la fatigue sous corrosion mais elle a fourni une excellente approche interdisciplinaire du problème en analysant les facteurs environnementaux, mécaniques et métallurgiques qui affectent ce type de rupture.

Nous avons appelé le phénomène où un métal se rompt quand il est soumis à des contraintes alternées ou répétées, rupture par fatigue. Dans un milieu corrosif, cette dernière n'existe pas (n'a pas lieu) ; nous dirons dans ce cas que la rupture se fait pour toute contrainte appliquée si le nombre de cycles est suffisamment grand. La rupture du métal résultant de l'action combinée d'un milieu corrosif et d'efforts alternées ou répétées est appelée : Fatigue sous Corrosion.

IV-2/ Définition de la fatigue sous corrosion

La fatigue sous corrosion est un processus complexe d'endommagement des matériaux qui résulte de l'interaction de deux mécanismes différents : la fatigue et la corrosion.

Il est important d'insister sur le terme « interaction » car il a été montré que : ni la contrainte cyclique à l'air libre, ni la corrosion ne conduisait séparément au même dommage que celui résultant de la combinaison des deux. La fatigue - corrosion nécessite la présence d'un environnement agressif.

En fait, la majorité des essais de fatigue sous corrosion dont la composition en air ambiant, habituellement est de l'eau en vapeur additionné à l'oxygène. Cependant, il y a des cas où les réactions avec l'environnement peuvent être bien néfaste. On donne ci-dessous les définitions des termes les plus courants en fatigue sous corrosion, [34].

- **Fatigue sous corrosion** : c'est l'action combinée de la fatigue et d'un environnement agressif conduisant à l'accélération du comportement en fatigue.
- **Environnement** : ensemble d'éléments chimiques et d'énergie entourant l'échantillon d'essai.

- **Cellule d'essai** : un récipient contenant la partie utile de l'éprouvette d'essai et les accessoires de mesures.
- **Composition du milieu corrosif** : c'est la concentration des produits chimiques dans le milieu liquide au cours des essais de fatigue sous corrosion.
- **Temps de maintien** : c'est la durée dans le cycle de sollicitation pendant laquelle la variable d'essai contrôlée [charge, déformation, déplacement] reste constante avec le temps.

IV- 3/ Les différents paramètres d'influence

Différents types de matériaux ont fait l'objet d'expériences en fatigue sous corrosion, les résultats d'essais ont été comparés avec ceux des essais de fatigue à l'ambient. L'allure de la courbe de WÖHLER des deux cas de figure est la suivante [34], (figure IV – 1).

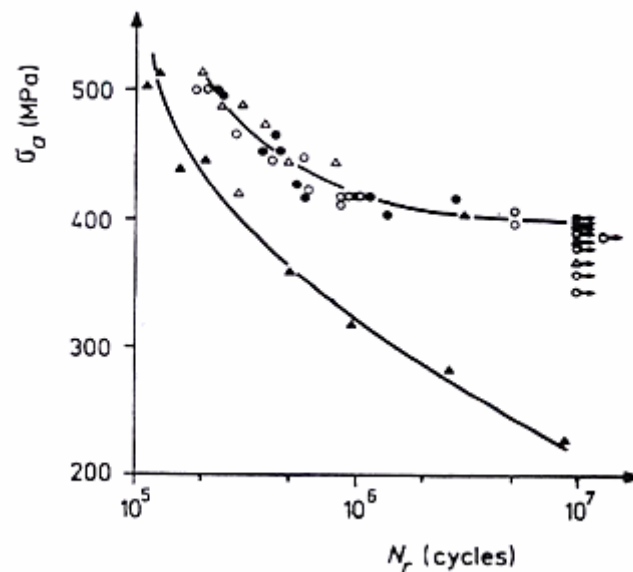


Figure IV-1 :L'allure des courbes d'endurance à l'air libre et sous corrosion [34].

Lors de l'essai dans l'air il a été constaté que :

- un certain nombre de cycles sous effort correspondant à une valeur supérieure à celle donnée par l'asymptote horizontale conduit à des ruptures, mais aucune rupture ne se produit pour un nombre illimité de cycles ; à une valeur inférieure, cette limite est appelée : limite d'endurance.

- dans un milieu corrosif, la rupture pour un niveau d'effort donné se produit habituellement sous peu de cycles et une véritable limite de fatigue n'est jamais observée.

IV-3 -a / Influence des paramètres mécaniques

a-1/ Influence de la fréquence de sollicitation

La fréquence de sollicitation influe d'une manière très claire sur le matériau. On constate une réduction de la durée de vie lorsque les deux sollicitations sont associées, et ceci lorsque la fréquence de sollicitation est faible, [35].

a-2/ Influence de la forme du cycle de sollicitation

Généralement, pour une fréquence déterminée ; les mises en charge lentes et les temps de repos longs réduisent sensiblement le temps à rupture des éprouvettes sollicitées en milieu corrosif, à titre d'exemple le cas d'une traction répétée utilisant un signal trapézoïdal, [26].

IV-3-b/ Influence des paramètres physico – chimiques

Il convient de remarquer que le phénomène de fatigue sous corrosion, s'observe aussi souvent dans les milieux réputés peu corrosifs : solution acide, solution chlorurée neutre, eau douce et même eau distillée.

Dans ces milieux, les matériaux non sollicités mécaniquement présentent soit : une passivité plus au moins stable, soit une activité électrochimique modérée.

Les paramètres sont :

- la teneur en chlorure (la teneur en $[Cl^-]$)
- le PH
- l'oxygène dissous dans la solution, [7].

IV- 3- c/ Influence des paramètres électrochimiques

L'agressivité de l'environnement est liée directement à l'activité électrochimique du couple : métal – environnement. Pour mettre en évidence le phénomène, on peut faire varier le potentiel de l'éprouvette de part et d'autre de son potentiel de corrosion (potentiel libre)

en l'imposant à l'aide d'un potentiostat, ce qui provoque, pour un potentiel anodique (supérieur au potentiel libre), une réduction des durées de vies en fatigue de l'éprouvette. Par contre un potentiel plus cathodique (inférieur au potentiel libre) correspond à une élévation très sensible des durées de vies, [34].

IV – 4/ Mécanisme d'amorçage

Dans le domaine de la résistance à la fatigue sous corrosion, à grands nombres de cycles ($N_r > 10^6$ cycles), les mécanismes généralement proposés se classent en trois catégories : adsorption, dissolution et fragilisation par hydrogène, [37].

IV - 4 –a / Mécanismes par adsorption

D'après certains auteurs [38], l'adsorption de certains atomes qui proviennent du milieu aqueux entraîne la diminution d'énergie superficielle et facilite la déformation plastique localisée.

IV- 4- b / Mécanismes par dissolution électrochimique

L'existence d'une dissolution préférentielle est nécessaire dans l'apparition rapide des fissures en fatigue sous corrosion. Cette dissolution peut se manifester de deux manières : soit en provoquant une corrosion localisée, soit en aggravant le processus d'amorçage mécanique, [39].

IV- 4- c/ Fragilisation par l'hydrogène

Il a été montré que les marches de glissement réversible constituent des sites d'adsorption préférentielle pour les atomes d'hydrogène qui sont produits par réaction cathodique. Ceux – ci pourraient pénétrer dans le métal et le fragiliser, [32].

IV- 5/ Cas pratiques de fatigue sous corrosion

Il a été défini que l'action combinée de la fatigue et la corrosion est très néfaste sur le comportement d'un métal, en d'autres termes :

Une éprouvette précorrodée ne présentera pas nécessairement une réduction importante sur la durée de vie en fatigue, et une éprouvette fatiguée d'abord à l'air ne conduira pas automatiquement à une vitesse de corrosion du métal accrue.

Afin d'illustrer cette idée, il est cité ci-dessous quelques exemples expérimentaux :

➤ **Cas de l'acier E36, [34, 1]**

Cet acier de construction sollicité en flexion rotative à différentes fréquences soit 3000tr/min et 30tr/min, (figure IV-2). L'effet du milieu corrosif et la fréquence du cycle de charge mènent à une chute des caractéristiques d'autant plus importante que la fréquence est plus faible.

A 3000tr/min, la courbe de WÖHLER à l'air libre donne une limite d'endurance de 255MPa.

L'hypothèse qui a été faite considère que l'effet de corrosion n'est dû qu'à une réduction de section des éprouvettes engendrée par corrosion généralisée, a donné les courbes en pointillés.

Remarquons qu'à 3000tr/min la courbe qui résulte de l'hypothèse se superpose avec celle obtenue à l'air libre.

L'expérience par contre en fatigue sous corrosion a donné une courbe, qui, en la comparant avec celle posée par l'hypothèse, montre que l'effet de corrosion en réalité est beaucoup plus important que ne le prévoit cette hypothèse.

A partir des courbes, on relève les contraintes correspondantes dans le cas d'une fréquence de 3000tr/min, et un maintien de 10^6 cycles, à l'air libre une valeur de 300MPa, et dans l'eau de mer une valeur de 200MPa ; soit une chute d'environ 33%.

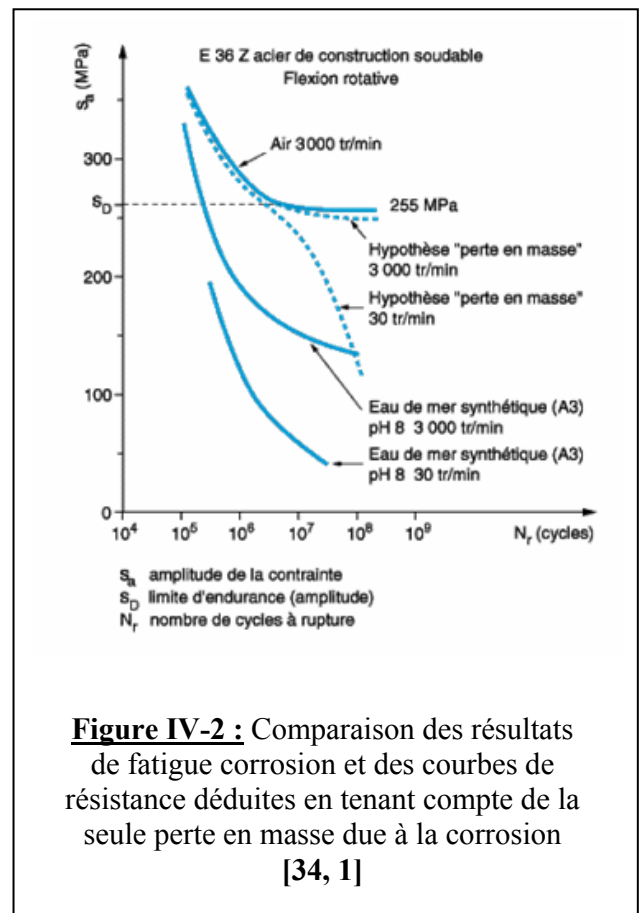


Figure IV-2 : Comparaison des résultats de fatigue corrosion et des courbes de résistance déduites en tenant compte de la seule perte en masse due à la corrosion [34, 1]

➤ Cas de deux aciers au carbone

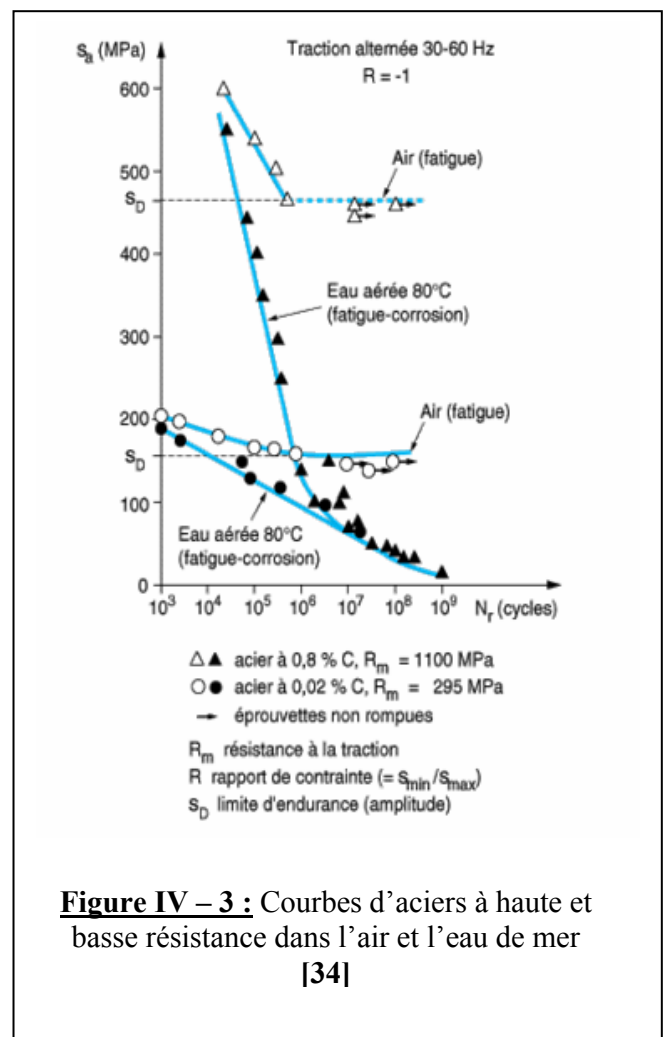
C'est le cas d'un acier à 0.8% Carbone et $R_m=1100\text{MPa}$, et un autre à 0.2% de Carbone et $R_m=295\text{MPa}$, sollicités en traction alternée 30-60Hz, à l'air libre et en eau aérée 80°C, (figureIV-3). L'exploitation de cette figure montre que les caractéristiques des matériaux importantes dans les essais d'endurance à l'air libre, ne paraissent plus significatives en fatigue sous corrosion. Reste que l'effet de corrosion, dans le cas des deux aciers fait chuter les caractéristiques de fatigue. A titre d'exemple, pour un maintien de 10^6 cycles :

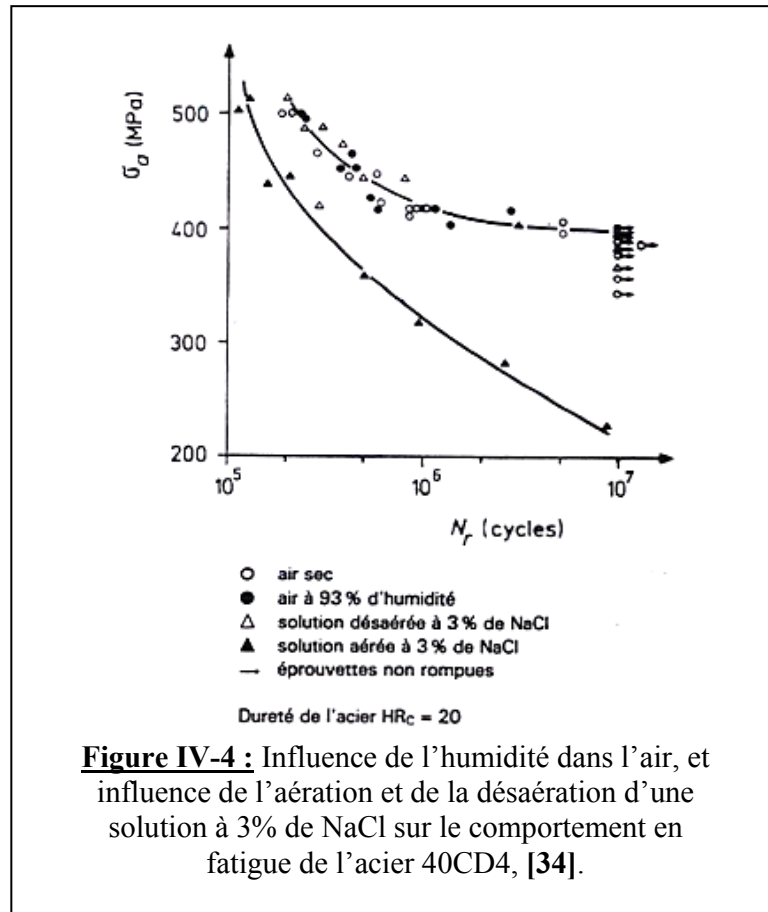
Pour l'acier à 0.8%C, à l'air libre, on note une contrainte de 460MPa environ, par contre sous corrosion, la chute est de plus de 70%, soit une contrainte de 130MPa.

Pour l'acier à 0.02%C, à l'air libre, notons une contrainte de 155MPa, par contre sous corrosion la chute est de plus de 35%, soit une contrainte de 100MPa.

➤ Cas de l'acier 40 C D 4

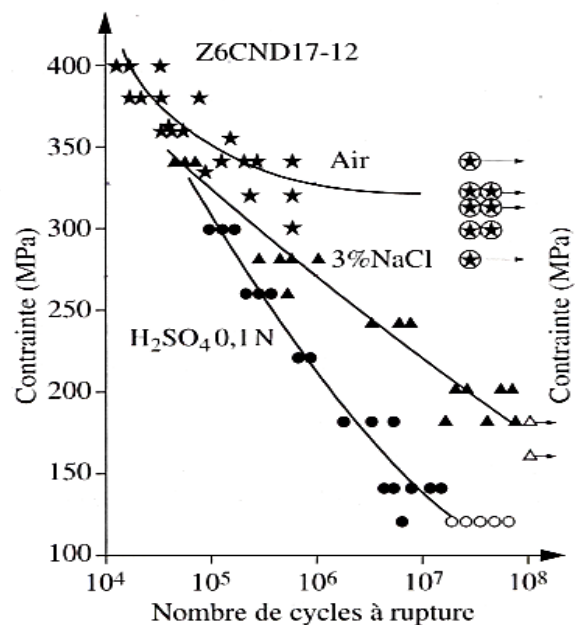
LIEURADE [34], précise que l'acier 40 C D 4, en eau douce et en eau salée désaérée, présente la même limite d'endurance qu'à l'air libre, (figure IV – 4). Par contre en eau salée aérée, les caractéristiques de fatigue diminuent rapidement. On relève à titre d'exemple, à 10^6 cycles, une chute d'environ 24% des caractéristiques, soit 420MPa à l'air libre, et 320MPa sous corrosion.





➤ **Cas d'un acier inoxydable en fatigue sous corrosion, [29]**

Pour l'acier inoxydable, de nuance Austénitique, AMZALLAG [29], précise que l'influence de la corrosion pour ce type d'acier modifie sa tenue en fatigue. La dégradation des caractéristiques est d'autant plus importante que le milieu est plus agressif, (figure IV- 5). Notons à titre d'exemple, qu'à 10^6 cycles, la chute des caractéristiques de fatigue, est d'environ 18% dans l'eau de mer, et plus importante dans une solution H_2SO_4 , soit environ 35%, par rapport à l'air libre.



➤ Cas d'un acier à haute limite élastique

Lee [29], dans ses travaux a établi des essais sur un acier à haute limite élastique, (figure IV-6), où la chute des caractéristiques de fatigue par rapport à l'air sec passent de 28% dans un milieu d'air humide, à plus de 37% dans une solution de 3% de NaCl aérée.

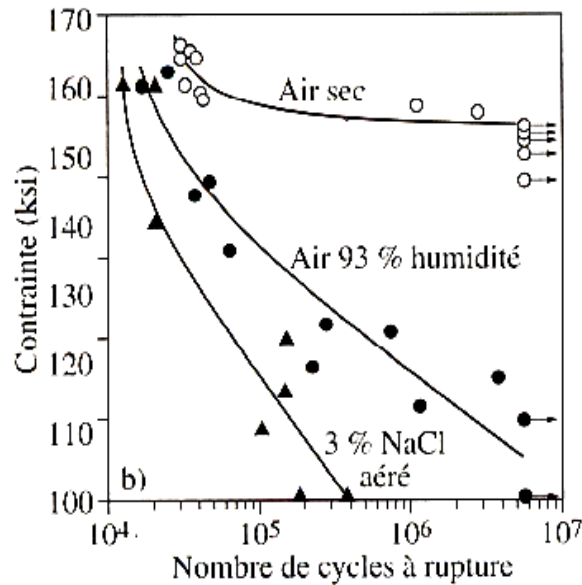


Figure IV-6 : Fatigue sous corrosion sur un acier à haute limite d'élasticité [29]

IV-7/ Conclusion

L'effet de l'environnement en fatigue, est un paramètre très important, surtout lorsque le matériau est plongé dans un milieu corrosif. C'est l'effet de la fatigue sous corrosion, dont le comportement ne peut être prévisible, et la dégradation des caractéristiques ne peut être non plus prédite.

Chapitre V
Etude expérimentale

V-1/Introduction

Le but de cette étude est la quantification des caractéristiques résiduelles après endommagement en fatigue sous corrosion sous entaille par essais de traction. Pour cela, nous aurons à utiliser des éprouvettes entaillées. La première série sera sollicitée à l'air libre. La deuxième série d'éprouvettes sera sollicitée sous corrosion, en flexion rotative, dont la fréquence de sollicitation est de 2760tr/min. Le nombre de cycles imposés est à la moitié du nombre de cycles entraînant la rupture.

V- 2/ Matériau et éprouvettes d'essais

V- 2- a/ Matériau utilisé

Le matériau utilisé dans cette étude est l'acier de construction C35 (XC38). Cette nuance d'acier correspond à un acier mi - doux, dont la composition chimique est résumée sur le tableau (V-1), elle a été établie au sein du Laboratoire de corrosion de l'Institut Algérien du Pétrole « I.A.P » Boumerdes.

C%	Si%	Mn%	Ni%	Cr%	P%	S%	Mo%	Cu%	Fe%
0.36	0.27	0.66	0.02	0.21	0.015	0.02	0.02	0.22	balance

Tableau V-1 : Composition chimique de l'acier C35.

Pour les caractéristiques mécaniques, nous avons relevé la moyenne des trois essais de traction sur la machine « INSTRON – WOLPERT », (tableau V-2).

Résistance à la rupture R_r (MPa)	Limite élastique R_e (MPa)	Allongement A%	La dureté [40] H_v
716.5	477.7	36.5	170 -195

Tableau V-2 : Caractéristiques mécaniques de l'acier C35.

La courbe de traction correspondante (figure V-1) présente trois zones :

- la zone de déformation élastique, limité par la valeur de la limite élastique R_e ,
- la zone de déformation plastique sans striction, limité par la valeur de la résistance à la rupture par traction R_r ,
- la zone de déformation plastique avec striction, et la rupture de l'éprouvette.

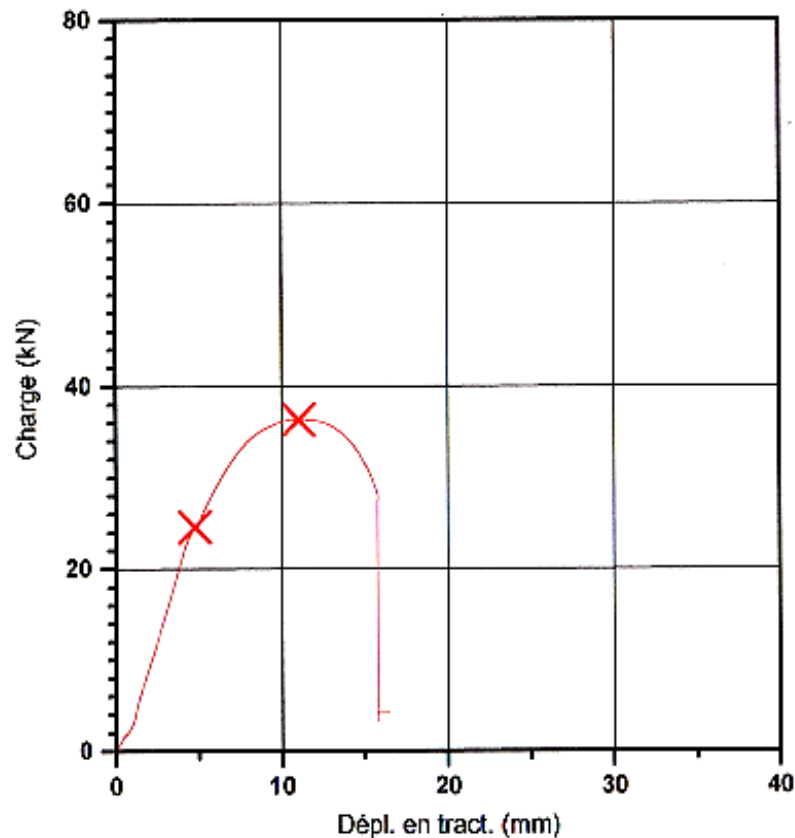


Figure V-1 : Courbe de traction de l'acier C35.

V – 2 – b/ Eprouvettes d'essais

Les éprouvettes utilisées sont de forme cylindrique avec un diamètre $\Phi 10$ de la partie utile diminué à $\Phi 8$ avec une entaille de profondeur de 1 mm, un angle de 60° et un rayon $r 0.4$ mm en fond d'entaille, (figure V-2). Les entailles ont été faites par outil à filetage métrique.

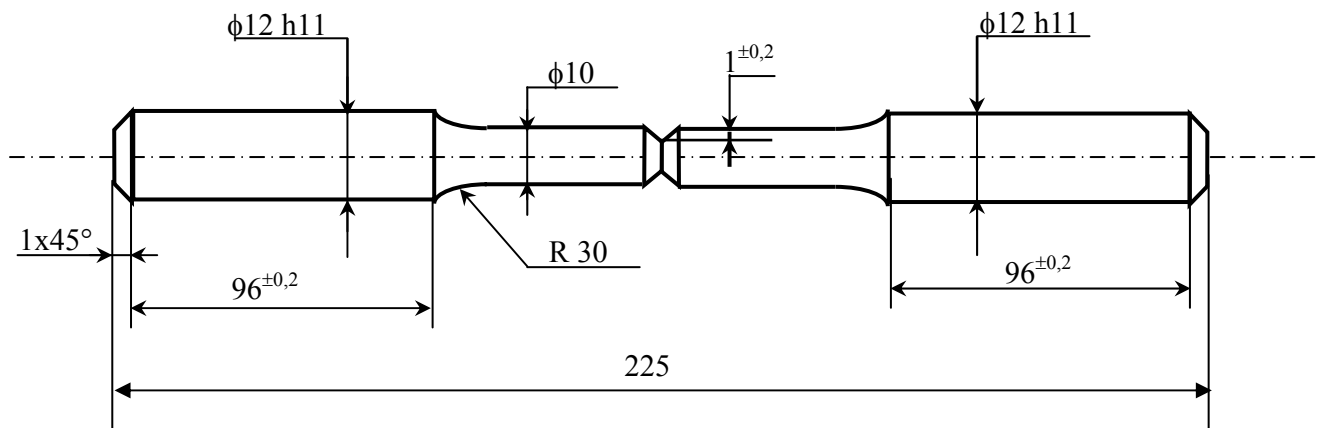


Figure V-2 : Dimensions de l'éprouvette.
Échelle 1/2

Les échantillons d'essais ont été prélevés dans la direction de laminage.

La préparation de l'éprouvette doit éviter d'altérer la structure et les caractéristiques du métal, en particulier en supprimant tout échauffement et en réduisant au minimum l'érouissage de la surface de l'éprouvette. Deux séries de vingt chacune ont été réalisées. La première série est destinée pour les essais à l'air libre. La deuxième série concerne les essais de fatigue sous corrosion.

L'usinage a été fait en tournage à partir de barreaux laminés $\Phi 14$ par des passes d'ébauche avec une surépaisseur de l'ordre de 0.5mm puis de semi finition et enfin de finition avec une profondeur de passe de 0.025mm.

Toutes les éprouvettes réalisées ont été contrôlées au projecteur de profil au niveau de l'entaille, à savoir le diamètre du fond d'entaille $\Phi 8$ et le rayon de courbure $r 0.4$ mm.

Les éprouvettes dont les dimensions n'obéissent pas aux tolérances imposées ont été rejetées.

➤ Description de l'appareil

L'appareil qui a été utilisé, existe au laboratoire de métrologie de l'EMP (Ecole Militaire Polytechnique), c'est un appareil qui permet d'observer aussi bien les contours de l'objet en question que sa surface (traces d'usinage, rayures, défauts de surfaces, etc. grâce à la lumière, réfléchi par l'objet, projetée sur l'écran, et ceci en projection épiscopique, (figure V-3).

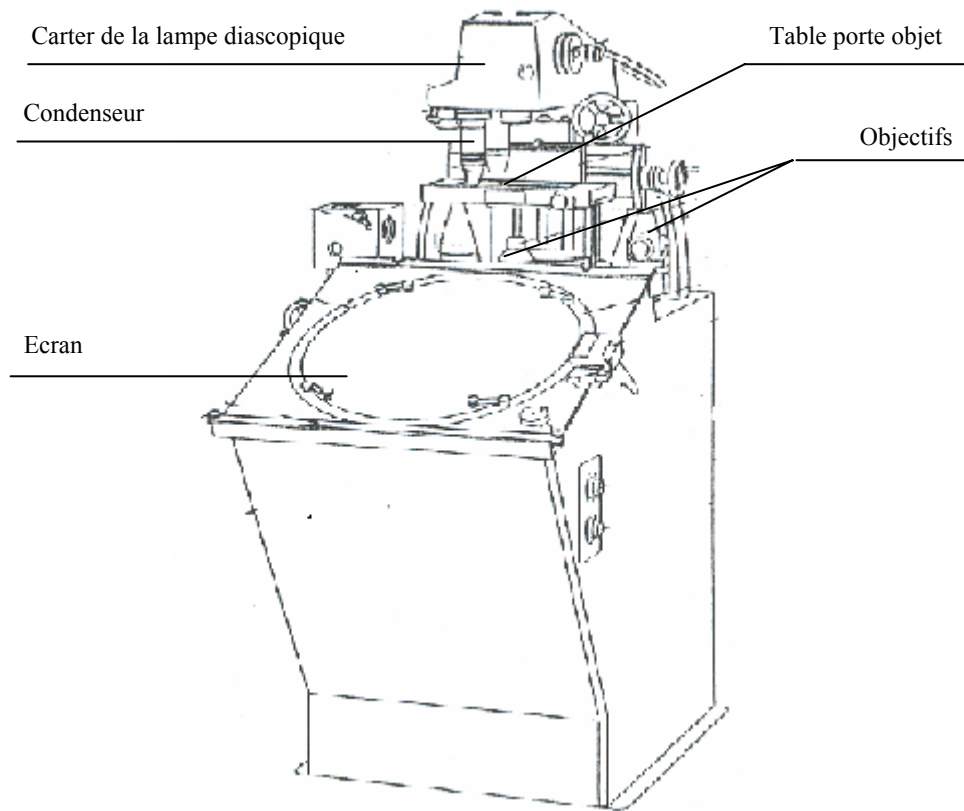


Figure V-3 : Schéma du projecteur de profil.

Afin de déterminer le rayon de courbure $r = 0.4\text{mm}$, et le diamètre en fond d'entaille $\Phi 8$, (figure V-4), on a procédé à un grossissement $20\times$, et grâce à des règles et calibres étalons nous avons pu faire la lecture et contrôler les différentes éprouvettes, puis faire la sélection.

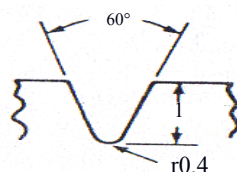


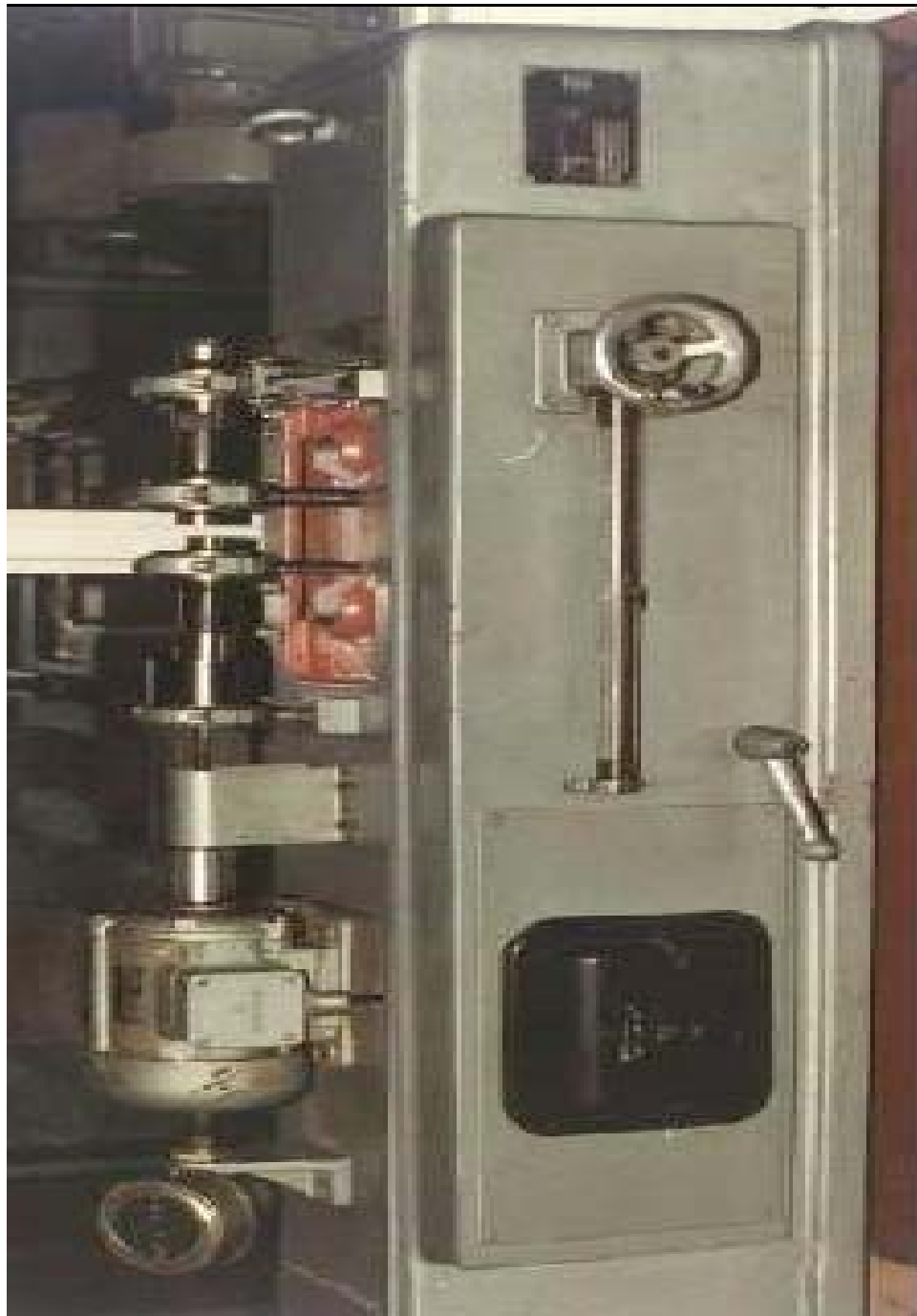
Figure V-4 : Détails du fond d'entaille

V – 3 / Matériels d'essais

V - 3 –a / Machine de flexion rotative

La sollicitation par fatigue a été réalisée sur la machine de flexion rotative type « **Schenck** » du laboratoire de traitements thermiques du département de Génie Mécanique de l'E.N.P, (photographie V-1).

Photographie V-1 : Machine flexion rotative.



a-1/ Mode de sollicitation sur la machine

La sollicitation sur la machine de flexion rotative « **Schenck** » est modélisée en flexion à quatre points d'une poutre, (figure V-5).

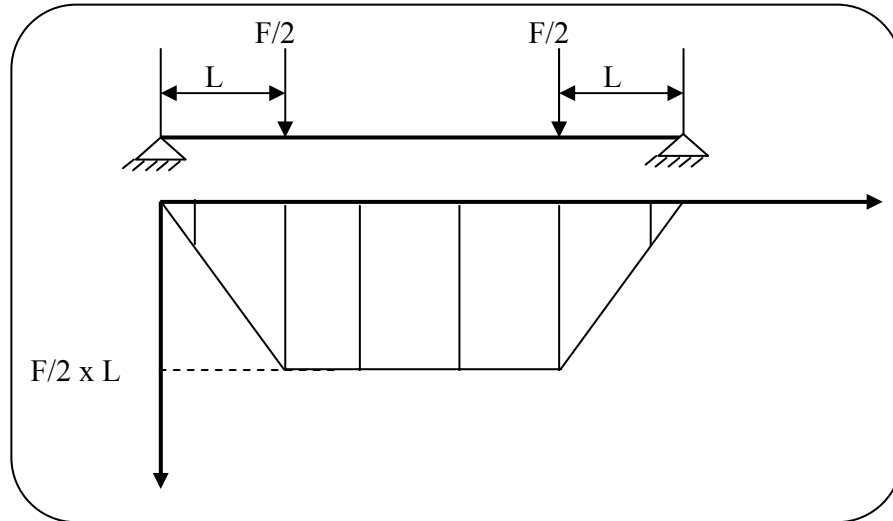


Figure V- 5 : Sollicitation de l'éprouvette.

Toutes les fibres sont tendues puis comprimées sauf la fibre neutre. Le moment fléchissant est constant tout le long de la partie utile de l'éprouvette.

a-2/ Description de la machine d'essai (figure V-6).

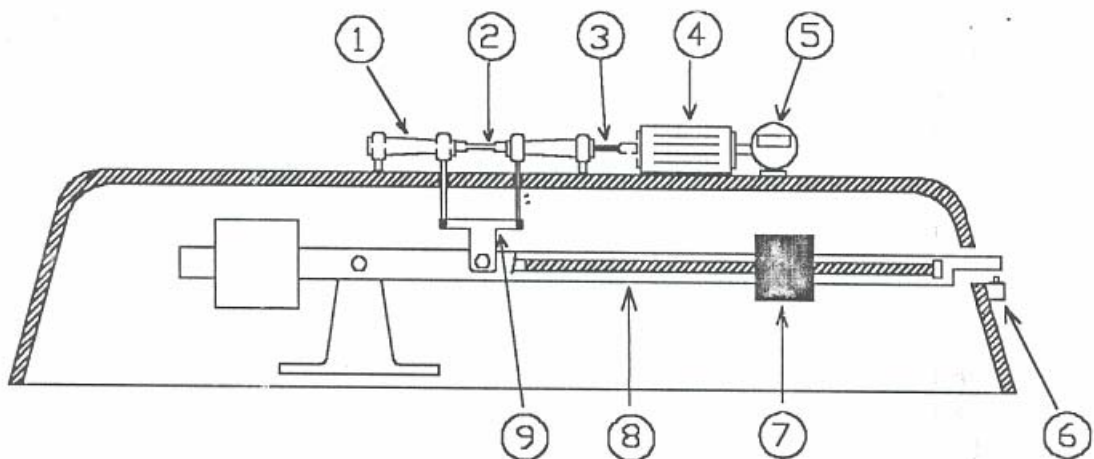


Figure V-6 : Croquis de la machine de flexion rotative.

La machine d'essai utilisée pour la présente étude est structurée en deux parties principales [41]:

- **La partie tournante :** Composée de deux fourreaux (1), à l'intérieur de chaque fourreau est monté une pince qui permet le serrage de l'éprouvette (2) lors du montage. Sur chaque fourreau sont montés deux roulements rotules à deux rangées de billes. L'un des fourreaux est relié à un moteur électrique (4) tournant à 2760 tr/min avec un accouplement élastique (3) et le moteur est relié à un compte tours (5).
- **La partie chargement :** Composée principalement d'un levier (8) sur lequel peut glisser une masse (7) dont le déplacement est mesuré grâce à une aiguille, coulissante le long d'une règle de 300mm [20 mm correspondant à une contrainte de 16.85 MPa]. Ce levier est relié au deux fourreaux par l'intermédiaire d'une chape de manière à transmettre à la partie tournante l'effort produit par la masse coulissante. Le levier peut entrer en contact avec un coupe circuit (6) lors de la rupture de l'éprouvette ce qui permet de mesurer le nombre de cycles effectués par l'éprouvette sous une certaine charge.

a-3/ Remise en marche de la machine

Deux problèmes ont été rencontrés lors de la partie expérimentale :

❖ Le problème principal était l'endommagement des pinces de fixation des éprouvettes, où il y a eu rupture sur différents plans ce qui a rendu leur reproduction très difficile vu l'inexistence de documents précisant leurs cotes de fabrication.

Nous avons pu régler ce problème en réalisant deux nouvelles pinces avec du *stüb*, mais en réduisant le nombre de fentes afin d'éviter leur déformation au cours d'essais, (figureV-7), (photographie V-2).



Photographie V-2 : Pince de fixation.

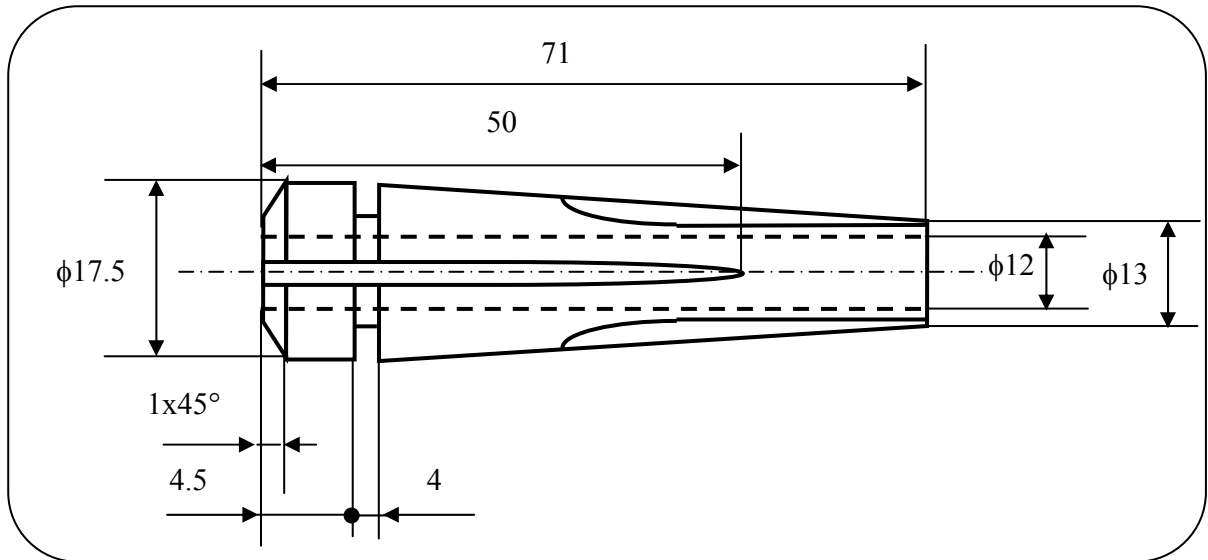


Figure V-7 : Pince de fixation.

❖ Le second problème était l'accouplement élastique, qui a pour rôle de transmettre le mouvement de rotation du moteur vers les fourreaux, avait lâché. Il a été changé par des brins soudés de part et d'autre sur les axes de raccordement avec le moteur et le fourreau. Ces brins forment la structure de l'accouplement élastique, (photographie V-3).



Photographie V-3 : Accouplement de transmission de mouvement.

a-4/ cellule de corrosion

Pour la réalisation des essais de fatigue sous corrosion, une cellule a été conçue. Elle a été fabriquée par tournage. C'est une cellule en Plexiglas, qui est composée de trois blocs A, B, et C, (figures V-8 et V-9).

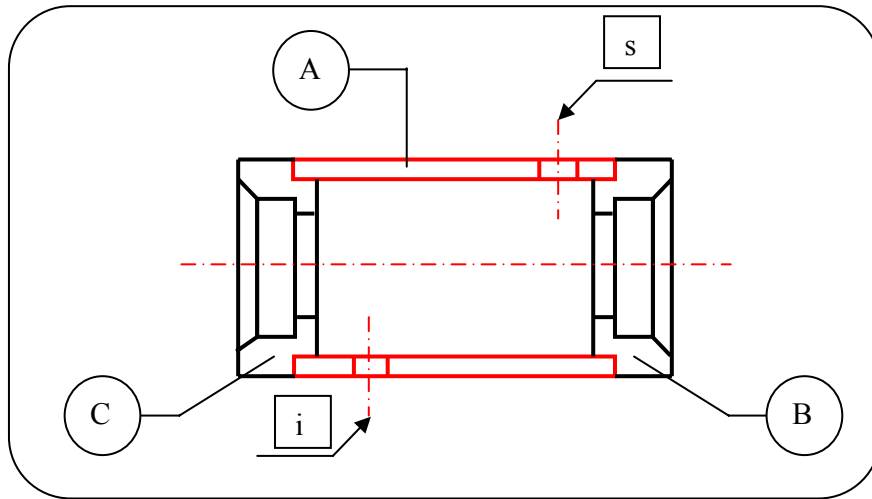


Figure V-8 : Cellule de corrosion.

Le bloc A contiendra la partie utile de l'éprouvette qui sera immergée dans le milieu corrosif qui sera introduit en permanence au cours de l'essai à partir du trou supérieur (s). L'alimentation se fera à partir d'un réservoir contenant le milieu corrosif aéré. La vidange se fera aussi de manière continue durant l'essai à partir du trou inférieur (i).

Les blocs B et C forment les bouchons de la cellule. Chacun est alésé sur lequel est monté un joint à lèvres qui pourra assurer l'étanchéité pendant les tests, et empêche toute fuite du milieu corrosif vers l'extérieur.

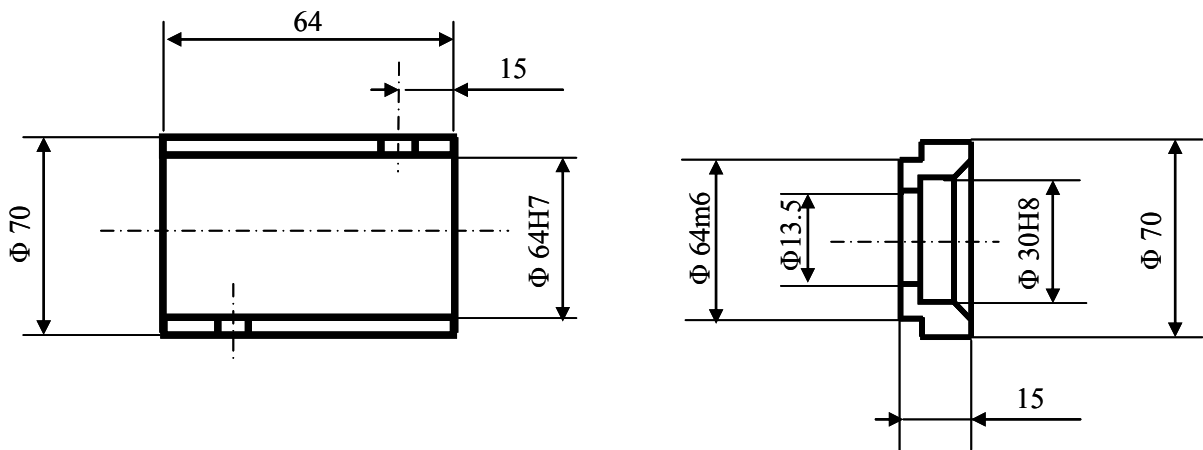


Figure V-9 : Dimensions de la cellule.

Ce dispositif a été adapté à la machine de flexion rotative « Schenck ». Il est fixé sur le bâti par un support réalisé selon les dimensions de la cellule de manière à faciliter le montage et le démontage de l'éprouvette lors des essais de fatigue sous corrosion, (figure V-10), (photographie V-4).

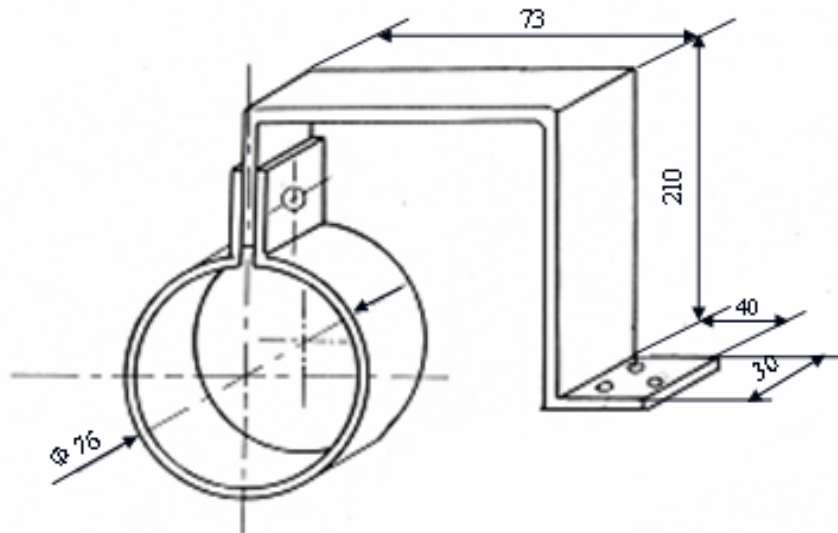
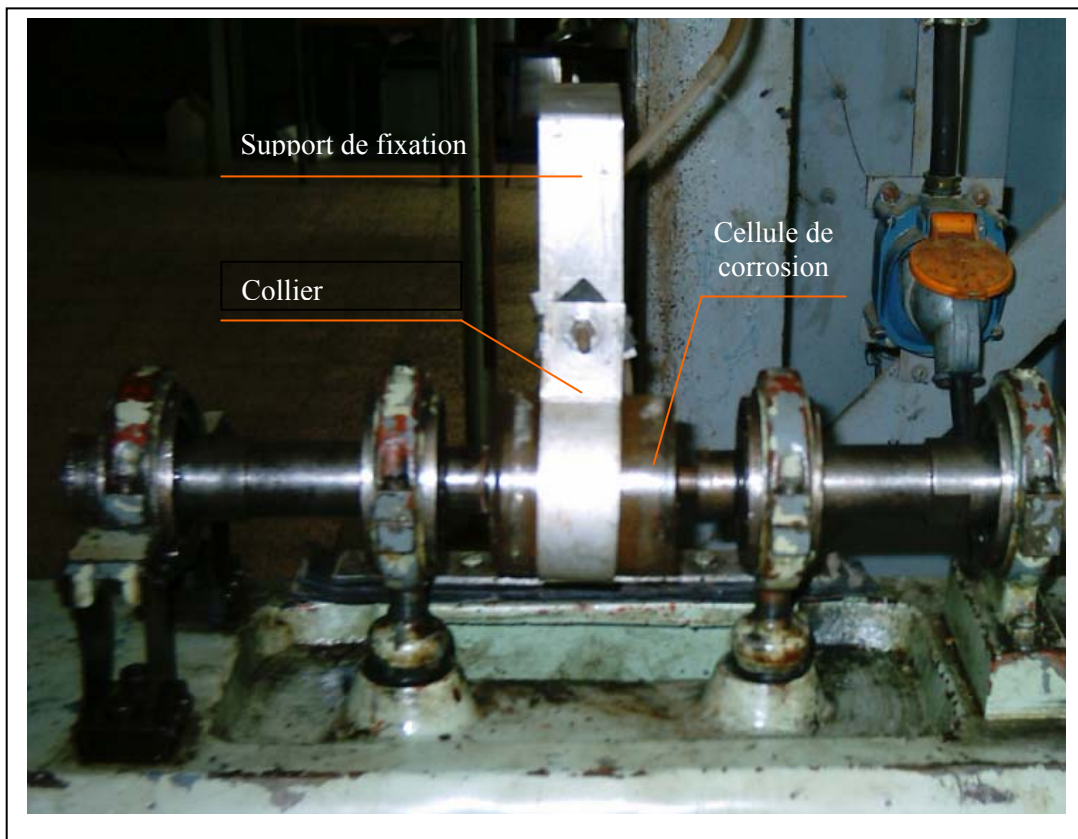


Figure V-10 : Support de fixation de la cellule.



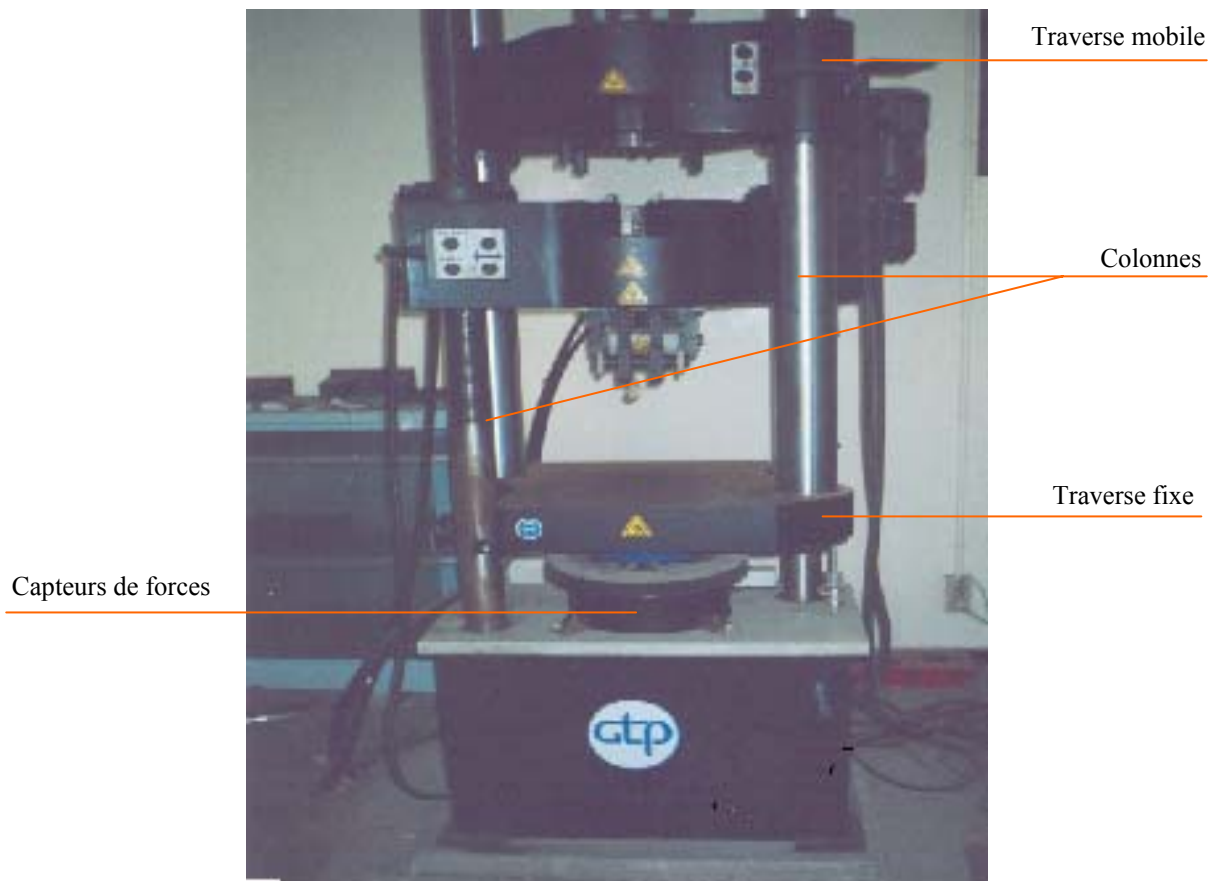
Photographie V-4 : Machine de flexion rotative avec cellule de corrosion.

V- 3- b / Machine de traction

Les essais classiques de caractérisation se font essentiellement en traction simple ou en traction – compression à température constante.

L'essai le plus couramment utilisé est l'essai de traction simple dans lequel la partie utile de l'éprouvette est soumise à un champ de contrainte uniaxial.

Afin de quantifier l'endommagement en fatigue - corrosion, qui est l'objet de cette étude, nous avons utilisé la machine de traction, type « INSTRON – WOLPERT » modèle 5590-HVL, de capacité 1100 KN, disponible au niveau du laboratoire de la société « ENGTP – REGHAIA », (photographie V-5).



Photographie V-5 : Machine de traction « INSTRON-WOLPERT ».

IV-3- d / Le milieu corrosif

Le milieu corrosif utilisé dans les essais sous corrosion est l'eau de mer.

Nous détaillons ci-dessous les principales caractéristiques de l'eau de mer :

La salinité : les principaux minéraux pour une eau de mer dont la salinité est de 35g.l⁻¹ sont indiqués dans le tableau (V-2). L'agressivité de l'eau de mer et du milieu marin en général est due à l'abondance de chlorure Cl⁻. On en trouve 19g.l⁻¹ sous la forme de chlorure de sodium NaCl, le « sel », et de chlorure de magnésium MgCl₂.

Élément	Teneur (g/kg)
Chlorures Cl⁻	19.353
Sulfates SO₄²⁻	2.712
Bicarbonates HCO₃⁻	0.142
Bromures Br⁻	0.067
Sodium Na⁺	10.760
Magnésium Mg²⁺	1.294
Calcium Ca²⁺	0.413
Potassium K⁺	0.387

Tableau V-3 : Principaux minéraux de l'eau de mer.

- **L'oxygène dissous :** l'eau de mer en surface contient entre 6 à 8 mg.l⁻¹(ppm) d'oxygène dissous. La concentration d'oxygène dans l'eau de mer varie sensiblement avec la profondeur de l'océan, mais également avec l'activité biologique du milieu.
- **Le pH :** le pH de l'eau de mer en surface est très stable et proche de 8.2. il varie très légèrement selon l'activité de la photosynthèse du plancton et des algues marines. Il varie également avec la profondeur.

V-4/ Protocole et résultats d'essais

Nous avons dans un premier temps effectué des essais de traction sur éprouvettes entaillées non endommagées par fatigue, qui ont servi comme référence pour l'endommagement. C'est l'entaille qui guide la surface de rupture. La courbe, (figure V-11), ne présente pas de déformation plastique à comparer avec la courbe de traction de l'éprouvette lisse de référence. Dans une seconde étape, nous avons procédé à endommager les éprouvettes par fatigue, à 2760tr/min, à l'air libre puis sous corrosion, pour des éprouvettes entaillées à différentes charges et à la moitié du nombre de cycles à rupture, définis au préalable pour

chaque niveau de contraintes. Ces dernières ont subi par la suite une traction. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau V-4.

N° éprouvette	Milieu d'essai	Essais de fatigue		Essais de traction post - fatigue		
		Contrainte maximale cyclique (MPa)	Nombre de cycles imposés	Limite de rupture R_r (MPa)	D%	R
N°17	air	59	800 000	849	11%	25.32%
N°33	Eau de mer			634	34%	
N°45	air	59	500 000	836	12%	8.97%
N°7	Eau de mer			761	20%	
N°38	Air	93	500 000	699	27%	23.18%
N°34	Eau de mer			537	44%	
N°27	air	124	300 000	816	10%	0.37%
N°25	Eau de mer			813	14%	
N°35	air	202	150 000	746	21%	0.80%
N°28	Eau de mer			740	22%	

Tableau V-4 : Résultats des essais de traction des éprouvettes entaillées endommagées par fatigue.

Avec :

$$D\% = \left(1 - \frac{R_r}{R_{r0}}\right) * 100,$$

R_{r0} : la limite de rupture de l'éprouvette entaillée de référence.

$$R = \left(1 - \frac{R_{r(\text{corrosion})}}{R_{r(\text{airlibre})}}\right) * 100.$$

Les figures (V-12-13-14-15-16) donnent les différentes courbes de traction à l'air libre et sous corrosion différentes éprouvettes (photographies V-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15).

Toutes les figures présentent la même allure :

- l'absence du domaine plastique due à la présence de l'entaille, ceci s'explique par la fissure qui s'amorce à la surface de la pièce dans la zone de concentration de contrainte et se développe dans un même plan : le gradient de contrainte et l'entaille guident la fissure,
- une baisse de la résistance à la rupture sous corrosion par rapport à l'air libre,

Figure V-11 : Courbe de référence sur éprouvette endommagée par fatigue.

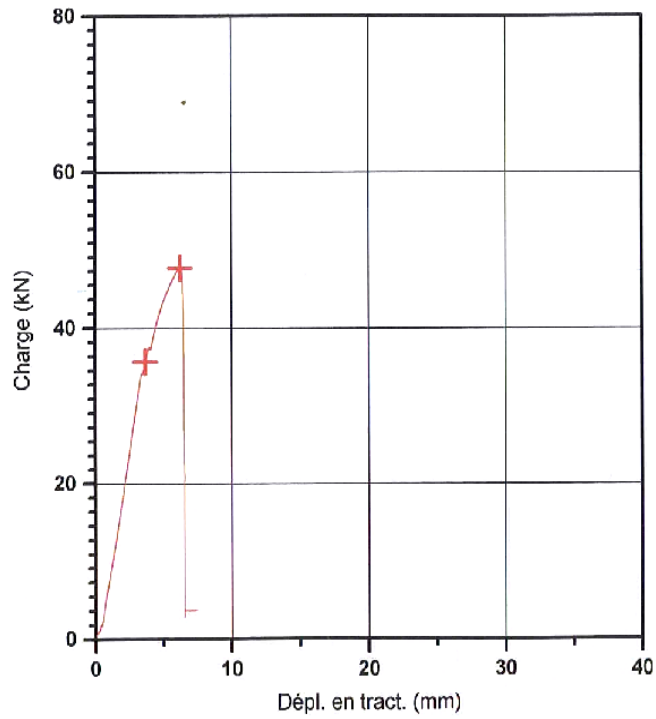


Figure V-12 : Courbe de traction (59MPa- 8.10^5 cycles).

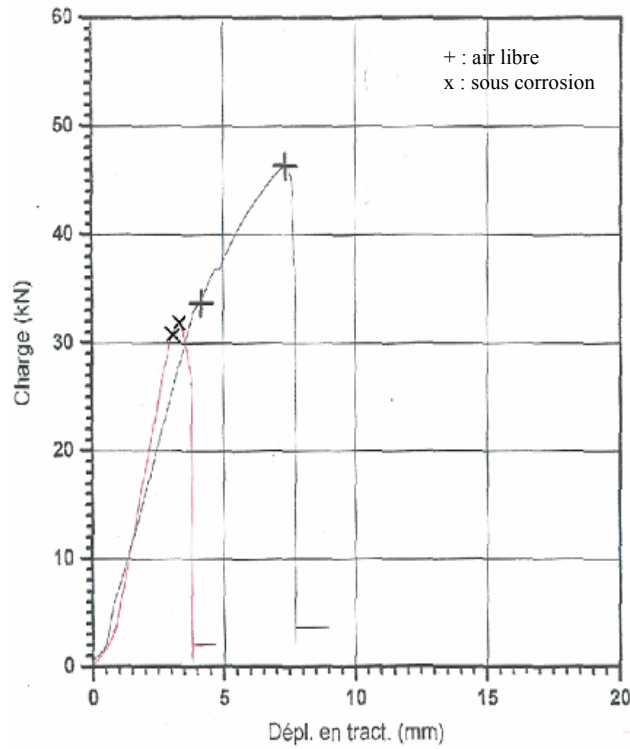


Figure V-13 : Courbe de traction (59MPa- $5 \cdot 10^5$ cycles).

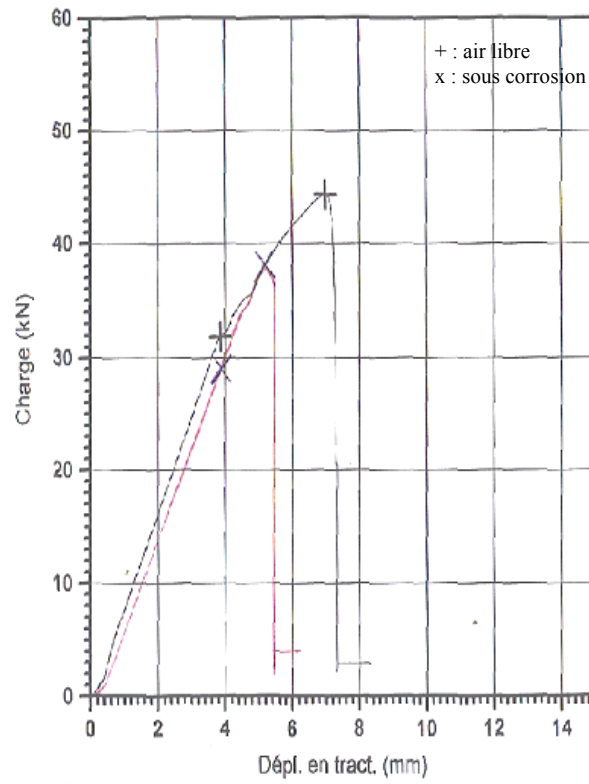


Figure V-14 : Courbe de traction (93MPa- $5 \cdot 10^5$ cycles).

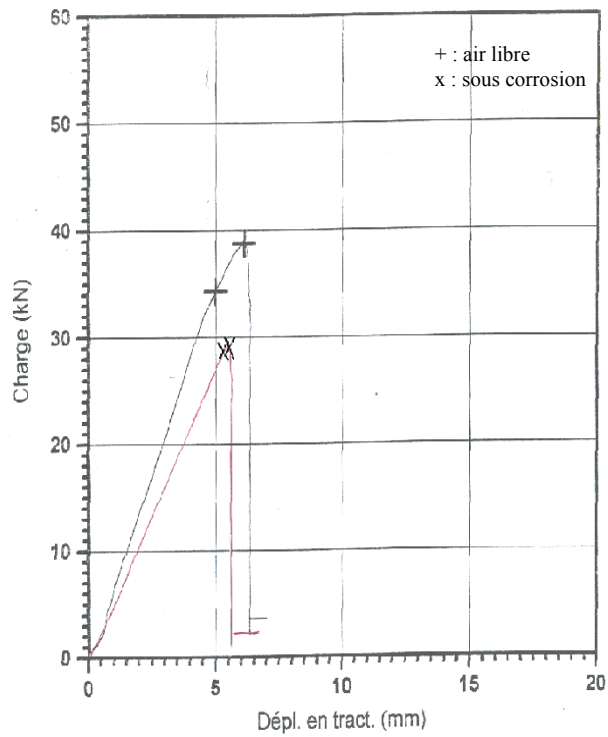


Figure V-15 : Courbe de traction (126MPa- 3.10^5 cycles).

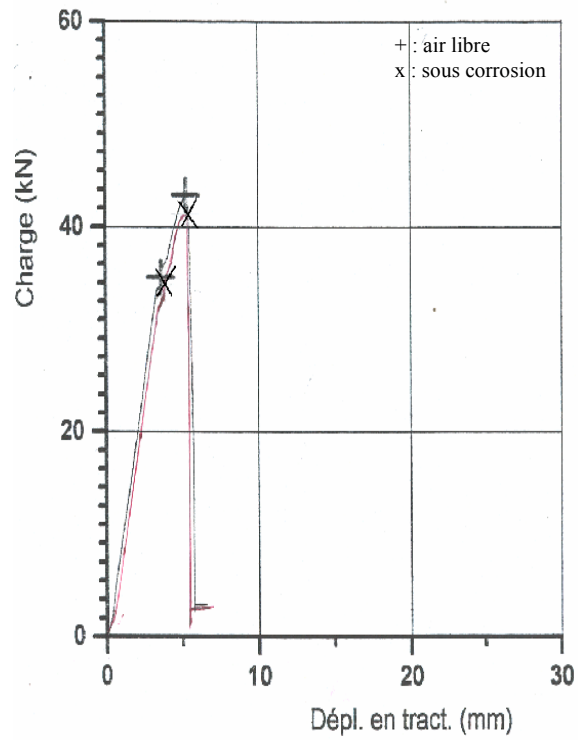
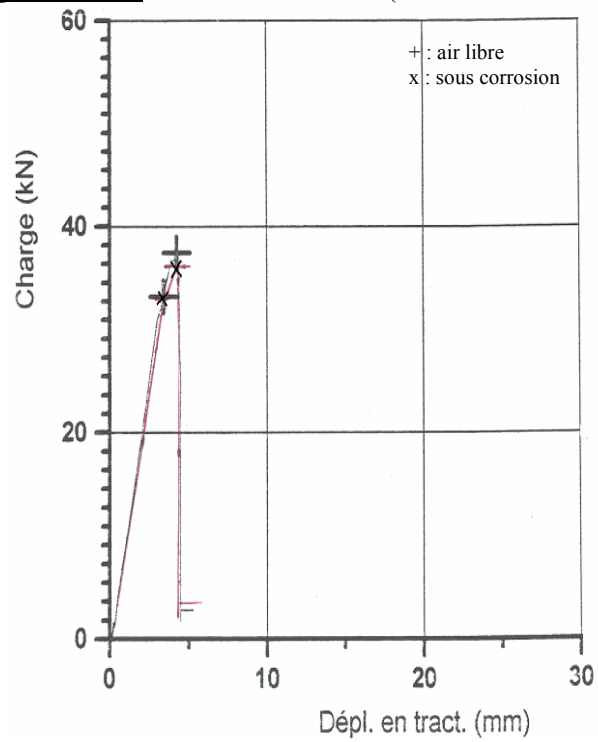


Figure V-16 : Courbe de traction (202MPa- $1.5.10^5$ cycles).





Photographie V-6 : Eprouvette N°17



Photographie V-7 : Eprouvette N° 33



Photographie V-8 : Eprouvette N°45



Photographie V-9 : Eprouvette N°7



Photographie V-10 : Eprouvette N° 38



Photographie V-11 : Eprouvette N° 34



Photographie V-12 : Epreuve N° 27



Photographie V-13 : Epreuve N° 25



Photographie V-14: Epreuve N° 35



Photographie V-15 : Epreuve N° 28

➤ **Discussion des résultats**

D'après l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus, nous remarquons que:

- la rupture est survenue suivant une surface pratiquement plane qui correspond au diamètre du fond d'entaille, ceci est dû à la concentration de contrainte au fond d'entaille, (photographies V- 6-7-8-9-10-11-12-13-14-15),
- sur les surfaces de rupture, nous distinguons deux zones d'aspects différents : la première d'apparence sombre entourant l'autre plus claire. La première qui est légèrement rugueuse, correspond à la zone d'élaboration du processus de fatigue : une fissure apparaît sur la circonférence en fond d'entaille et se propage ensuite vers

l'intérieur de la section jusqu'à la deuxième zone qui est plus rugueuse ; et c'est la zone de rupture par traction,

- pour de faibles charges la zone de rupture n'est pas centrée dans la section, mais plutôt décalée vers la circonférence que ce soit à l'air libre ou sous corrosion. Tandis que, pour de fortes charges, la zone de rupture est plutôt centrée dans la section.

Les histogrammes sur les figures (V-16 et V-17) résument respectivement :

- ✓ les limites de rupture à la traction pour chaque état de contrainte à l'air libre et sous corrosion par rapport à une éprouvette de référence,
- ✓ Les dommages D pour les éprouvettes à l'air libre et sous corrosion pour le même état de contrainte.

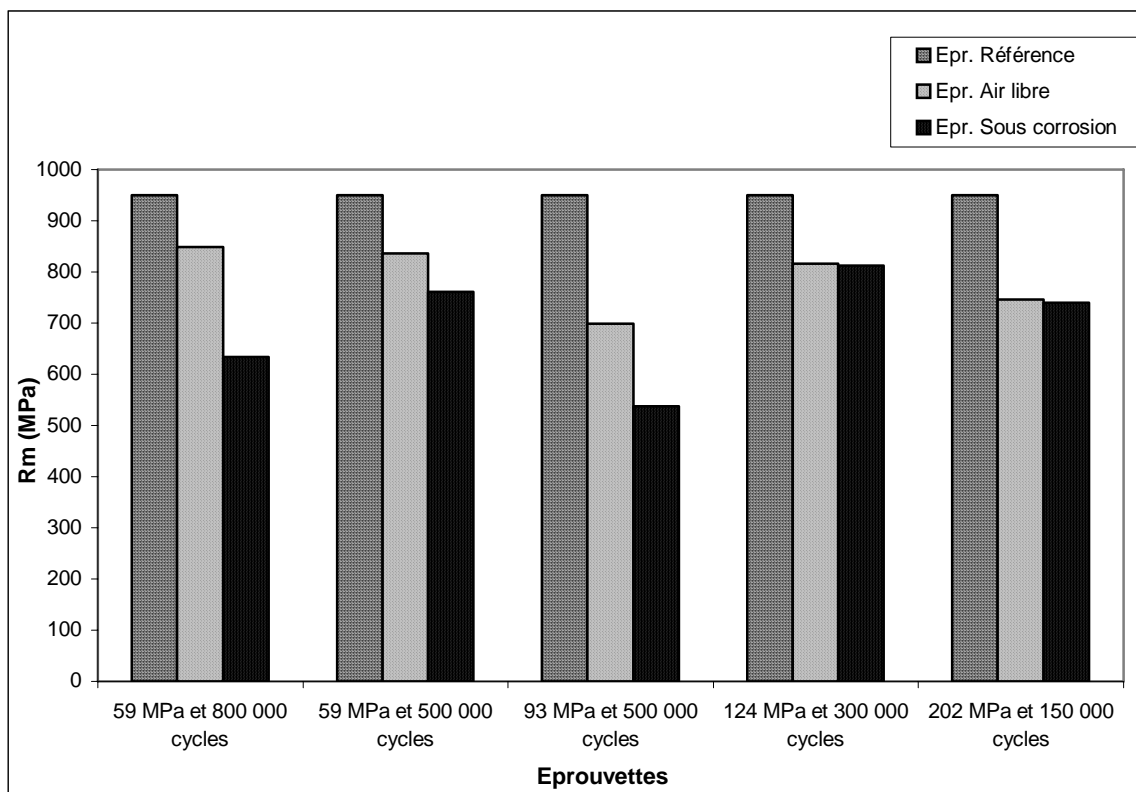


Figure V-16 : limite de rupture à la traction « référence / air libre /sous corrosion »

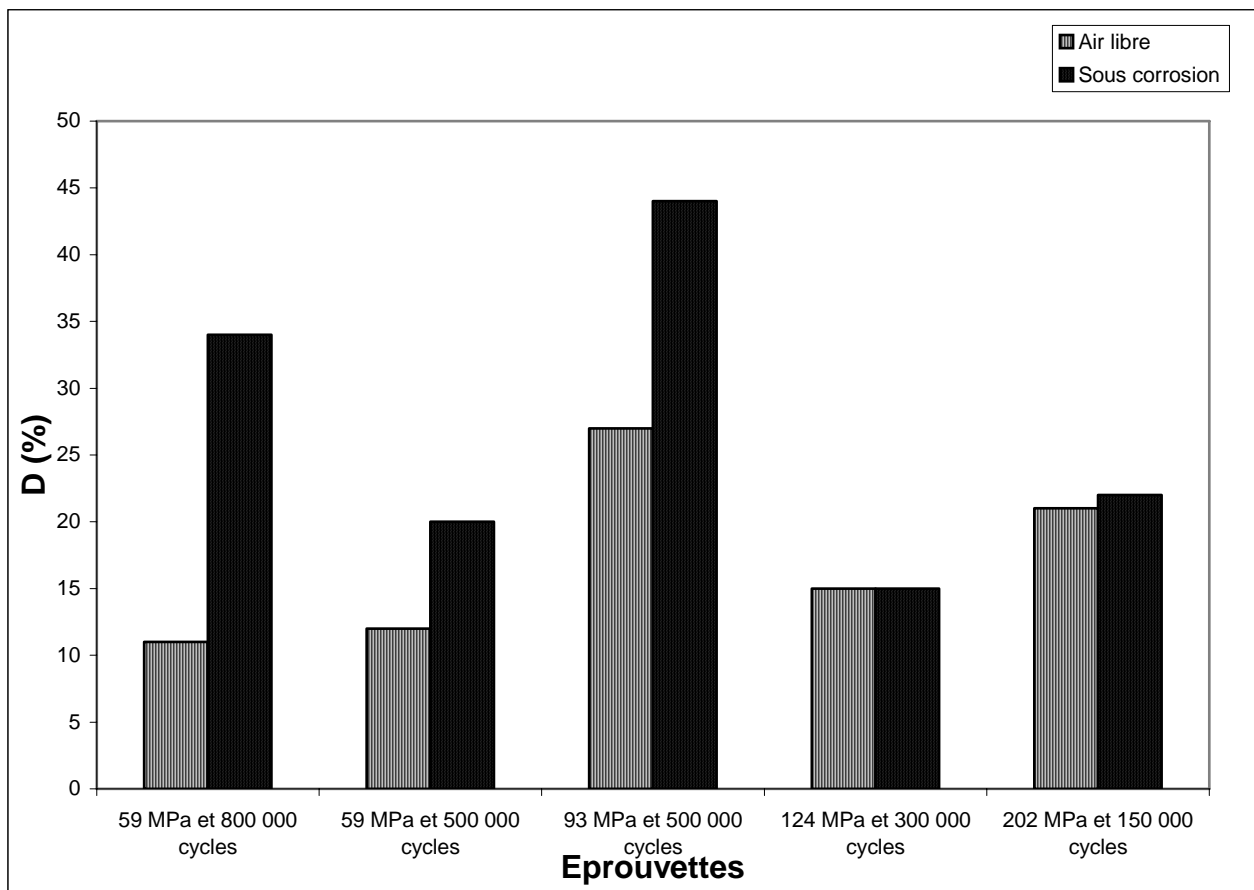


Figure V-17 : Le dommage D par niveau de contrainte « air libre/ corrosion »

- Une chute de l'ordre de 25% de la charge de rupture en traction entre les essais effectués en flexion rotative sous corrosion et ceux à l'air libre, sous faible contrainte cyclique et à 800 000 cycles.
- Pour la même contrainte cyclique, mais à un plus faible nombre de cycles sollicité, soit 500 000 cycles, la chute des résultats d'essais sous corrosion par rapport à l'air libre, est de l'ordre de 9%.
- Les résultats se rapprochent, pour une sollicitation à faible contrainte cyclique et un grand nombre de cycles [59MPa ; 800 000 cycles] et une sollicitation à plus forte contrainte cyclique et un plus faible nombre de cycles [93MPa ; 500 000 cycles].

- Plus on augmente la contrainte cyclique et avec un nombre de cycle moins important nous remarquons que la corrosion réagit faiblement, ou presque pas [à partir de 126MPa]
- Si nous comparons, pour le même niveau de contrainte, la différence des dommages D des éprouvettes endommagées (en milieu corrosif et à l'air libre) avec le rapport R des limites de rupture à la traction des éprouvettes (endommagée / saine entaillée), nous remarquons qu'il y a corrélation de ces résultats.

V – 5 / Conclusion

Les résultats d'essais de traction des éprouvettes entaillées endommagées par fatigue à l'air libre et sous corrosion, ont montré clairement une chute très importante des caractéristiques du matériau, à savoir : la limite de rupture à la traction ; et ceci en présence de l'eau de mer.

Cette quantification a été évalué à 9% pour 5.10^5 cycles, et passe à 25% pour 8.10^5 cycles pour un niveau de contrainte correspondant à 59MPa, et sera encore plus importante si la sollicitation atteignait 10^6 cycles et plus. L'effet de corrosion n'a pratiquement pas lieu quand la contrainte est importante ou le nombre de cycles est faible. Ceci confirme l'effet néfaste de la corrosion au cours de l'essai de fatigue pour des sollicitations de très longue durée et surtout à faibles contraintes cycliques.

Conclusion générale

Conclusion Générale

L'étude de la quantification de l'endommagement en fatigue sous corrosion a été menée sur l'acier de construction C35 (XC38).

Les essais de fatigue [à l'air libre et sous corrosion] ont été effectués sur des éprouvettes entaillées pour différents niveaux de contraintes. Le milieu corrosif utilisé est l'eau de mer.

Nous avons d'abord procédé à la caractérisation mécanique du matériau sur des éprouvettes lisses de diamètre utile $\phi = 10$ mm.

Nous avons aussi procédé à la détermination des caractéristiques mécaniques de l'éprouvette entaillée vierge par rupture en traction. La contrainte de rupture sera prise comme référence dans la quantification du pourcentage d'endommagement.

Des essais d'endommagement par fatigue, en flexion rotative sous entaille pour un certain niveau de contrainte et un nombre de cycles fixés de fatigue ont été fait à l'air libre et sous corrosion.

L'essai choisi est l'essai de traction. Les éprouvettes endommagées à l'air libre et celles ayant subi le même endommagement mécanique mais sous corrosion ont été rompues par traction afin de mettre en évidence la chute de la limite de rupture. C'est le paramètre choisi pour quantifier l'endommagement D en exprimant en pourcentage la chute de la limite de rupture sous corrosion par rapport à celle trouvée à l'air libre. D est d'autant plus important pour un grand nombre de cycles sous faible contrainte. Il y a une chute des caractéristiques mécaniques en présence de l'eau de mer, d'environ 25% au voisinage des 10^6 cycles. C'est l'effet synergique de la fatigue et la corrosion, ce résultat rejoint celui qu'a trouvé Lieurade [34] pour l'acier faiblement allié 40CD4. C'est une quantification préliminaire sur le taux d'influence de la corrosion pour l'acier C35, en flexion rotative, sous entaille, mais reste à préciser que le nombre de tests reste insuffisant pour trancher sur le taux d'influence de l'eau de mer sur ce type d'acier en fatigue.

D'après Hurman [42], le comportement des fissures de fatigue dans les milieux salins est caractérisé par rapport à l'air atmosphérique pris comme milieu de référence. Or, dans son étude, il a été constaté que l'air constitue déjà un milieu actif vis à vis de la fissuration par comparaison au vide.

L'interprétation des mécanismes d'endommagement dans les milieux salins est donc, extrêmement délicate puisqu'on compare le degré de nocivité de deux milieux actifs. Une

bonne compréhension des mécanismes nécessite de se référer au comportement en fatigue du matériau dans un milieu inerte.

Références bibliographique

- [1] : G.Beranger , G.Henry, G.Labbe, P.Soulinac :
« Les aciers spéciaux », Technique et documentation (1997).
- [2] : J. Lemaitre, J.L. Chaboche :
« Mécanique des matériaux solides », Dunod (1996).
- [3] : J. Lemaitre :
« A course on damage mechanics », Edition Springer (1996).
- [4] : K.Azouaoui :
« Etude de l'endommagement de plaque en composites soumises à la fatigue par chocs », Thèse de doctorat, USTHB (2004).
- [5] : Michael F.Ashby, David R.H.Jones :
« Matériaux –Propriétés et applications –», Dunod (1998).
- [6] : T. Marsac, Y. Masselin :
« Fatigue thermodynamique des métaux », Ecole des mines de Nancy (1997).
- [7]: Dominique François, André Pincau, André Zaoui:
« Comportement mécanique des matériaux : Elasticité et plasticité », Edition Hermes (1995).
- [8] : D. François, A.Pincau, A. Zaoui :
« Comportement Mécanique des Matériaux : Elasticité et plasticité », Edition Hermes (1995).
- [9] : J. Msounave, J.P. Bailon, J.I. Dickson :
« Les lois de fissuration par fatigue », Edition Maloine (1980).

- [10] : S. Surech :
« Fatigue of materials », the press syndicate of the university of Cambridge (2001).
- [11]: J. C. Bathias :
« La fatigue des matériaux et des structures », Hermes Science Publication (1997).
- [12]: R. Cazaud, P .Rabbe :
« La fatigue des métaux », Edition Dunod (1959).
- [13] : M. Barson, T. Rolfe :
« Fracture and fatigue control in structures », Butterworth – Heinman (2000).
- [14]: G.Pomey, H.P.Lieurade :
« Essais de fatigue », Technique de l'ingénieur M130 (1996).
- [15] : J. Coupry, R. Derelay :
« Technique et industrie », Revue N°38, printemps (1998).
- [16] : G. Qilafku, Z. Azari, N. Kadi, M. Gjenry, G. Pluvinage :
« Application of a new model proposal for fatigue life prediction on notches and key sents », International journal of fatigue 21 (1999).
- [17]: R.E. Peterson :
« Notch sensitivity, metal fatigue », Editions Chapman & Hall , London (1952).
- [18]: A. Thum et O. Synanessa:
« Double notch effect », NDI Zeitschr, 92, Nr 10, 1950.
- [19] : Yen et Dolan :
« A critical review of the criteria for the notches sensitivity in fatigue of metal», university of Illinois bulletin, vol 4, N°53, series 398 (1952).

- [20]: T. Boukharouba, T. Tamine, C. Chehimi et G. Pluvinage:
«Utilisation d'un nouveau critère d'amorçage en fatigue », Correspondance particulière/ Laboratoire fiabilité mécanique/Université Metz-France.
- [21] : Neuber, N.E. Frost, K. Marsh et L.P. Pook :
« Metal fatigue », Edition Oxford University, London (1974).
- [22]: Kuhn et Hardrath:
« An engineering method for estimating notch size effect in fatigue tests on steel», T. N. 2805, Washington (1982).
- [23]: H.Uhilg :
« Corrosion et protection », Dunod (1997).
- [24] : Karl H.Tostmann :
« Corrosion et protection contre la corrosion », Edition Wiley-Vch (2001).
- [25] : F.Dabosi :
« Corrosion et rupture », Stage GME (Avril 2005).
- [26] : M.Leiris, C.Bathias :
« Revue de métallurgie », N°1 – (1974).
- [27] : J. J. Lamoureux :
« Précis de corrosion », Edition Masson (1997).
- [28] : F. Dabosi, G. Beranger :
« Corrosion et protection des métaux », CNRS (1981).
- [29] : G. Beranger, H. Mazille :
« corrosion des métaux et alliages », Paris, Hermes publications (2002).

- [30] : J. F. Bosich :
« Prévention de la corrosion », Barnes and Noble (1977).
- [31] : D. Londolt :
« Corrosion et chimie des surfaces », Presses polytechniques et universitaires Romandes (2003).
- [32] : C. Patel, V. Rollins, T. Pyle :
« Metallic corrosion », 4th international conference on Metallic Corrosion Sydney, december (1975).
- [33] : M. Dmytrakh, G. Pluinage, G. Qilafku :
« On corrosion fatigue emanating from notches stress field and electrochemistry »
Materials science, Vol 37 N°2 (2001)
- [34] : G. Pomey, H.P. Lieurade :
« Essais de fatigue sous corrosion », Technique de l'ingénieur : M135 (1996).
- [35] : K. Endo, K. Komai :
« Corrosion-fatigue NACE 2 », Revue (1972).
- [36] : M. Leiris, C. Bathias :
« Revue de métallurgie », N°1 (1974).
- [37] : B. Mayonobe :
« Fatigue sous corrosion des aciers inoxydables en solution chlorurée », Thèse de Doctorat, U. Metz (1982)
- [38] : V. Likhtman, E. Schenkin, P. Rebinder :
« Physicochemical mechanics of metals », PGM of scientifics (1964).
- [39] : M. Truchon, P. Rabbe :
Mémoire, science, revue, métallurgie (F), Mars (1993).

- [40] : A. Chevalier :
« Guide pratique du dessin technique », Hachette Technique (1998).
- [41] : D. Mecheri :
« Etude du facteur de sensibilité à l'entaille par un modèle utilisant le gradient de contrainte, Etude expérimentale et numérique », Thèse Magistère, ENP (1996).
- [42] : B. Huneau :
« Influence de l'air ou de milieux salins avec polarisation cathodique sur le processus d'endommagement par fatigue d'un acier à haute limite d'élasticité », Thèse Doctorat, Université de Poitiers (décembre 2001)