

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

## **ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
Ecole Nationale Polytechnique

### **Département de Génie Mécanique**

Projet de fin d'études  
Présenté pour l'obtention du diplôme d'état en Génie Mécanique

*Thème :*

**Quantification de l'endommagement par fatigue en flexion rotative d'éprouvettes avec double entailles à l'aide de l'essai de traction**

**Proposé et dirigé par :**

M. Y. BELKACEMI

M. B. GUERGUEB

**Réalisé par :**

Nacereddine BELOUADAH

*Promotion 2010*

## ملخص :

الهدف من هذا العمل هو إيجاد العلاقة بين المسافة بين الخدشين (X) و حجم ضرر العينات. أجرينا اختبارات على عينات اسطوانية الشكل ذات خدشين متوازيين (نصف قطر قاع الخدش نق = 0.4 مم ، قطرها الصافي ق=6 مم) من الفولاذ XC48. علما أن المسافة بين الخدشين (X) تتغير من 1.5 مم إلى 20 مم. لكل X معطى استخدمنا اسطوانة كمرجع، والاسطوانات الأخرى خضعت لاختبار التعب في آلة الانحناء الدوراني بسرعة 2760 دو/د وذلك لمدة 50000 دورة، بعدها أخضعت كلها لاختبار آلة الشد. لتحديد حجم الأضرار التي لحقت العينات تراجع مقاومة الشد هو العامل الذي تم اختياره. واستنتجنا من هذه الدراسة أن نسبة الضرر مستمرة ببلالة المسافة بين الخدشين (X) لأجل المسافات الصغيرة، ثم العلاقة تصبح خطية ابتداء من قيمة معينة.

**كلمات البحث :** الضرر، التعب والإجهاد، الانحناء الدوراني، اختبار الشد.

## Abstract:

The aim of the current work is to find the relationship between the distance (X) between the two notches and the rate of damage (D). We conducted tests on cylindrical specimens with double notches (notch radius of  $r = 0.4\text{mm}$ , diameter net  $d = 6\text{mm}$ ) made with steel XC48. Note that the distance between notches (X) varies from 1.5mm to 20mm. For each X given a test tube was used as a reference, the rest received a fatigue test with rotating bending machine to 2760 rpm for 50000 cycle, to be passed all to the traction machine. To quantify the damage of the specimen fall of ultimate strength was the chosen setting. It appears from this study that the rate of damage is constant as a function of the distance between cuts (X) in a first zone, and then the relationship becomes linear from a certain value. This result was confirmed by the inflexibility fall of the specimen.

**Keywords:** Damage, fatigue, rotating bending, tensile test.

## Résumé:

Le but de ce travail est de mettre en évidence la relation entre la distance entre entailles (X) et le taux d'endommagement (D). Nous avons mené des essais sur des éprouvettes cylindriques avec double entailles parallèles (rayon du fond d'entaille  $r=0.4\text{mm}$ , diamètre net  $d=6\text{mm}$ ) en acier XC48. Notons que la distance entre entailles (X) est variable de 1.5mm jusqu'à 20mm. Pour chaque X donné, une éprouvette a servi comme référence, les autres ont subi un essai de fatigue sur machine de flexion rotative à 2760 tr/min durant 50000 cycles. Les éprouvettes ainsi endommagées ont été rompues par traction. La chute de la résistance ultime est donc le paramètre choisi pour quantifier l'endommagement. Il ressort de cette étude que le taux d'endommagement (D) est constant pour les petites distances (X). La relation entre D et X devient linéaire au-delà d'une certaine valeur. Ces résultats ont été corrélés par la chute de la rigidité flexionnelle de l'éprouvette.

**Mots clés :** Endommagement, fatigue, flexion rotative, essai de traction.

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail avec beaucoup de reconnaissance :*

*A mes parents qui n'épargnent aucun effort pour me soutenir et qui étaient derrière moi avec leurs conseils et leur affection durant tout mon cursus scolaire et universitaire, que DIEU les protège.*

*A mon frère KHALIL ma source éternelle d'aide et d'encouragements.*

*A toute la famille....*

*A mes cousins, A tous mes chers amis.....*

*A tous ceux qui m'ont répondu dans le besoin avec le moindre geste qu'il soit.*



## Remerciements

Je remercie tout d'abord **DIEU** le tout puissant pour m'avoir donné le courage et la force pour terminer ce travail.

Je remercie mes encadreurs monsieur **Y.BELKACEMI** et monsieur **B.QUERQUEB** pour avoir accepté de diriger ce travail ainsi pour leurs conseils et leurs orientations, je leur en suis reconnaissant.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury qui ont examiné ce travail et accepté d'être présents.

J'adresse mes sincères remerciements à monsieur **H. ZAHANA** le chef de l'entreprise **USI-PRECIS** qui nous a beaucoup aidés, ainsi qu'à monsieur **A. BAOUALI** responsable du laboratoire d'essais mécaniques de la société **ALTUMET (REQHAIA)**.

Finalement je tiens à remercier tous les professeurs qui ont contribué à ma formation, les techniciens du département et toute personne ayant participé de prêt ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Merci...

# Sommaire

<b><i>Introduction générale</i></b> .....	<b>2</b>
<b>CHAPITRE I : <i>Notions sur la mécanique de l'endommagement</i></b>	
Introduction.....	4
I-1-Approches de description de l'endommagement.....	5
I-1-1-Approche mécanique.....	5
I-1-2- Approche métallurgique.....	6
I-2-Modélisation de l'endommagement.....	7
I-2-1-Homogénéisation.....	7
I-2-2-Définition d'une variable d'endommagement.....	7
I-2-2-1- Concept de surface endommagée.....	7
I-2-2-2- Hypothèse d'isotropie.....	8
I-2-2-3- Contrainte effective.....	8
I-3-Mesure de l'endommagement.....	9
I-3-1-Mesure directe : Observation.....	9
I-3-1-1-Classement des défauts.....	9
I-3-2-Mesure indirecte : Mesure d'un paramètre physique.....	10
I-3-2-1-Mesure de densité.....	10
I-3-2-1-1- Mesure de l'écrouissage.....	10
I-3-2-1-2- Mesure de l'endommagement et l'écrouissage.....	10
I-3-2-2-Variation du module de Young.....	11
I-3-2-3-Méthodes électriques.....	12
I-3-2-3-1- Détection et suivi d'une fissure.....	13
I-3-2-3-2- Variation de résistance d'un matériau non fissuré.....	13

## SOMMAIRE

I-3-2-4-Ultra-sons.....	13
I-3-2-5-Emission acoustique.....	14
I-4-Dommage par fatigue.....	14
I-4-1-Définition, Amorçage, Propagation.....	14
I-5-Modification microstructurales induites par la déformation cyclique.....	15
I-6-Différents stades de l'endommagement.....	16
I-6-1-Amorçage de fissure.....	16
I-6-2-Propagation de fissure.....	17
Conclusion.....	17
 <b>CHAPITRE II : Généralités sur la fatigue</b>	
Introduction.....	19
II-1-Description du phénomène de fatigue.....	19
II-2-Les différentes grandeurs mécaniques caractéristiques de la fatigue.....	20
II-3-Essai de fatigue.....	20
II-3-1-Caractérisation du comportement en fatigue.....	20
II-3-2-Définitions.....	21
II-3-2-1-Limite de fatigue.....	21
II-3-2-2-Limite d'endurance.....	21
II-3-2-3-Durée de vie.....	22
II-3-2-4-Contraintes appliquées.....	22
II-3-2-5-Contrainte nominale.....	22
II-3-2-6-Cycle de contrainte.....	22

## SOMMAIRE

II-3-2-7-Rapport d'endurance.....	22
II-4-Classification des sollicitations des essais de fatigue.....	22
II-4-1-Essais sous amplitude constante.....	23
II-4-2-Essais à amplitude variable.....	24
II-5-Les éprouvettes d'essai.....	24
II-5-1-Dimensions des éprouvettes.....	24
II-5-2-Forme des éprouvettes.....	25
II-5-3-Usinage des éprouvettes.....	25
II-6-Présentation pratique des résultats.....	25
II-6-1-Courbe de Wöhler.....	26
II-6-2-Tracé de la courbe de Wöhler.....	26
II-6-3-Courbe d'équiprobabilité de rupture.....	27
II-6-4-Diagrammes d'endurance.....	27
II-6-4-1-Diagramme de Haigh.....	28
II-6-4-2-Diagramme de Goodman-Smith.....	28
II-6-4-3-Diagramme de Roš.....	28
II-6-4-4-Diagramme de Moore-Kommers-Jasper.....	28
II-7-Estimation des caractéristiques de résistance et d'endurance en fatigue.....	28
II-7-1-Nature et aspect de la dispersion des résultats des essais de fatigue.....	28
II-7-2-Méthodes d'estimation de l'endurance à N cycles.....	29
II-7-2-1-Méthode de l'escalier.....	29
II-7-2-2-Comparaison des différentes méthodes.....	29
II-7-2-3-Choix entre ces méthodes.....	29
II-8-Influence de divers facteurs sur la fatigue.....	30
II-8-1-Facteurs d'ordres métallurgiques.....	30



## SOMMAIRE

II-8-2-Facteurs d'ordres géométriques et mécaniques.....	30
II-8-2-1-Influence de la fréquence.....	30
II-8-2-2-Effets de la surcharge et de la sous charge.....	30
II-8-2-3-Effet d'entaille.....	30
II-8-2-4-Effet d'échelle.....	31
II-8-2-5-Effet de l'état de surface.....	31
II-8-3-Influence de l'environnement.....	31
II-8-3-1-Influence de la température.....	31
II-8-3-2-Influence de la corrosion.....	32
Conclusion.....	32

## CHAPITRE III : *Résultats et interprétations*

Introduction.....	34
III-1-Matériau d'essai.....	34
III-1-1-Propriétés.....	34
III-1-2-Emplois types.....	34
III-1-3-Etat d'emploi.....	34
III-1-4-Composition chimique.....	34
III-1-5-Caractéristiques mécaniques.....	35
III-2-Eprouvettes d'essai.....	35
III-2-1-Forme et dimensions.....	35
III-2-2-Usinage des éprouvettes.....	37
III-3-Machines d'essais utilisées.....	37
III-3-1-Machine de flexion rotative.....	37

## SOMMAIRE

III-3-1-1-Description de la machine.....	38
III-3-1-2-Mode de sollicitation de l'éprouvette.....	39
III-3-2-Machine de traction.....	39
III-4-Résultats d'essais.....	41
III-4-1-Représentation et interprétation des résultats.....	44
III-4-2-Mesure de la flèche.....	46
Conclusion.....	48
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>50</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>52</b>

## Liste des figures

## **LISTE DES FIGURES**

<b>Figure I-1</b> : Représentation schématisée de la contrainte effective.....	5
<b>Figure I-2</b> : Observation de l'endommagement par microscope optique. Compression sur parallélépipède.....	6
<b>Figure I-3</b> : Schéma illustrant la définition de la surface effective.....	7
<b>Figure I-4</b> : Mesure de l'endommagement par variation du module d'Young. Eprouvettes, courbes d'écrouissage et d'endommagement.....	12
<b>Figure I-5</b> : Mesure de l'endommagement par ultra-sons.....	13
<b>Figure I-6</b> : Mesure de l'endommagement par émissions acoustiques.....	14
<b>Figure I-7</b> : Représentation schématique de la courbe d'endurance de Wöhler (A) et de la courbe de dommage de French (B).....	15
<b>Figure I-8</b> : Extrusion-intrusion observées en microscopie à force atomique.....	16
<b>Figure I-9</b> : Différents sites d'amorçage.....	16
<b>Figure I-10</b> : Passage de stade I en stade II.....	17
<hr/>	
<b>Figure II-1</b> : Aspect général d'une surface de rupture après défaillance due à un phénomène de fatigue.....	19
<b>Figure II-2</b> : Cycle de contrainte de fatigue.....	21
<b>Figure II-3</b> : Différents types de sollicitations.....	23
<b>Figure II-4</b> : Type de cycle de contrainte.....	23
<b>Figure II-5</b> : Formes des éprouvettes des essais de fatigue.....	25
<b>Figure II-6</b> : Courbe de Wöhler.....	26
<b>Figure II-7</b> : Courbe d'équiprobabilité de rupture (résultat théorique).....	27

## **LISTE DES FIGURES**

<b>Figure II-8 :</b> Variation des propriétés mécaniques avec la température d'essai, acier doux à 0,17 % C.....	32
<hr/>	
<b>Figure III-1 :</b> Eprouvette avec double entailles parallèles.....	35
<b>Figure III-2 :</b> Forme de l'entaille.....	36
<b>Figure III-3 :</b> Schéma de la machine de flexion rotative.....	38
<b>Figure III-4 :</b> Mode de sollicitation sur l'éprouvette.....	39
<b>Figure III-5 :</b> Courbes de traction d'une éprouvette de référence (n6) et celle endommagée (n7) pour une distance entre entailles $X=1.5\text{mm}$ .....	43
<b>Figure III-6 :</b> Courbes de traction d'une éprouvette de référence (n14) et celles endommagées (n15 et 16) pour une distance entre entailles $X=7.5\text{mm}$ .....	43
<b>Figure III-7 :</b> Courbes de traction d'une éprouvette de référence (n3) et celle endommagée (n4) pour une distance entre entailles $X=20\text{mm}$ .....	44
<b>Figure III-8 :</b> Variation du taux d'endommagement (D) en fonction de la distance entre entailles (X) de l'acier XC48.....	44
<b>Figure III-9 :</b> Variation de la flèche en fonction du nombre de cycle pour $X=2.5\text{mm}$ , $10\text{mm}$ , $20\text{mm}$ .....	47

## **Listes des photos et tableaux**

## LISTES DES PHOTOS ET TABLEAUX

<b>Photo III-1</b> : Variation de la distance X entre entailles.....	36
<b>Photo III-2</b> : Machine de flexion rotative SCHENCK.....	37
<b>Photo III-3</b> : Machine de traction monotone utilisée.....	40
<b>Photo III-4</b> : Aspect d'interaction entre entailles lors de la rupture, X=1.5mm.....	45
<b>Photo III-5</b> : Aspect d'interaction entre entailles lors de la rupture, X=1.5mm.....	45
<b>Photo III-6</b> : Aspect d'interaction entre entailles lors de la rupture, X=1.5mm.....	45
<b>Photo III-7</b> : Faciès de rupture d'éprouvette endommagée de X=17.5mm.....	46

<b>Tableau III-1</b> : Composition chimique de l'acier XC48.....	34
<b>Tableau III-2</b> : Caractéristiques mécaniques de l'acier XC48.....	35
<b>Tableau III-3</b> : Résultats de l'essai de traction des éprouvettes.....	41
<b>Tableau III-4</b> : Résultats de l'essai de traction pour éprouvettes avec une seule entaille au milieu.....	42
<b>Tableau III-5</b> : Evolution de la flèche en fonction du nombre de cycle, X=2.5mm, 10mm, et 20mm.....	47

# **Introduction générale**



Les observations faites sur des pièces mécaniques en service ont montré que celles-ci se rompent sous l'effet de chargements de service qui paraissent modestes devant leurs capacités à supporter les charges statiques. Ce phénomène est connu sous le nom de fatigue ou endommagement par fatigue. Ces observations ont montré aussi que les essais statiques ne suffisent pas à eux seuls pour dimensionner les pièces.

L'endommagement par fatigue est influencé par plusieurs facteurs d'ordre métallurgique (composition chimique et structure cristallographique, inclusions, défauts...), d'ordre géométrique et mécanique (type et fréquence de chargement, effet d'échelle, présence des entailles, état de surface...), sans oublier l'effet de l'environnement (température, fatigue-corrosion...). Le but du présent travail est de faire apparaître l'influence de la variation de la distance entre deux entailles parallèles dans l'endommagement en fatigue.

Ce mémoire comporte trois chapitres. Le premier traite de la mécanique de l'endommagement. Le deuxième chapitre présente les essais de fatigue. La partie expérimentale de ce travail est présentée dans le chapitre III. Des essais d'endommagement par fatigue en flexion rotative sur des éprouvettes en acier XC 48 avec double entailles parallèles, tout en variant la distance entre entailles pour mettre en évidence la relation entre cette dernière et le taux d'endommagement des éprouvettes en fatigue.

# **Chapitre I :**

## *Notions sur la mécanique de l'endommagement*

**Introduction :**

Le concept de l'endommagement est né dans deux familles : vers 1956 chez les physiciens métallurgistes français de l'Institut de Recherche de la Sidérurgie (IRSID), Ch. Crussard, G. Henry, J. Plateau, afin d'interpréter certains faciès de rupture qu'ils étaient les premiers à observer. Vers 1958 chez les mécaniciens russes, L. M. Kachanov principalement, et aussi Y. N. Rabotnov, afin de prévoir le temps au bout duquel se rompt un matériau sous fluage. Malgré la quasi-simultanéité de ces événements, chaque famille mena ses recherches dans l'ignorance des travaux développés par l'autre [1].

L'aventure scientifique a débuté, lorsque l'équipe de l'IRSID a réussi en 1956, à mettre au point une nouvelle technique de répliques capables de reproduire les faciès tourmentés des ruptures à faciès ductile et fragile et pouvant être observées au microscope électronique.

En Russie, les travaux de L. M. Kachanov semblent avoir été plus modestes. Il proposa pour la première fois une variable continue, reliée à la densité des défauts produits par endommagement variable qu'il introduisit dans une relation permettant de prévoir le temps de rupture d'un matériau sous fluage [1].

Après 1970 et pendant quelques années, des relations écrites, en termes de contraintes ou de déformations, ont été établies pour rendre compte de l'évolution du paramètre endommagement au cours de la déformation des matériaux. Plusieurs mécaniciens français et étrangers ont joué un rôle important : dès 1970 et indépendamment Y. Hult, F. Leckie, J. Lemaitre, puis vers 1975... Hayhurst, S. Murakami, J. L. Chaboche [1].

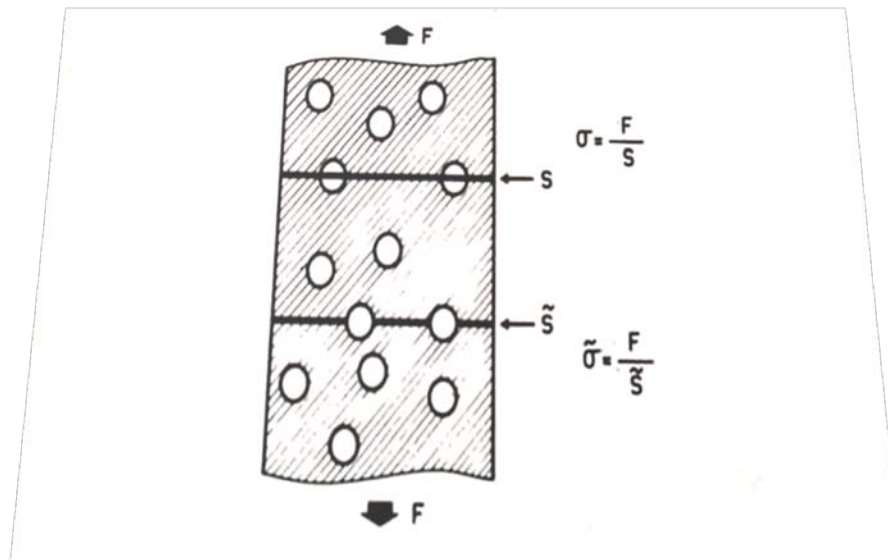
L'histoire de ces dernières années a été marquée par une collaboration active entre des physiciens et des mécaniciens français dans le domaine de l'endommagement. En effet, dans le domaine des matériaux, cette science est sans nul doute celle où la métallurgie physique, la thermodynamique et la mécanique sont tant liées qu'il serait vain de développer des approches dissociées [1].

**I-1-Approches de description de l'endommagement :**

Afin de décrire l'évolution de cet endommagement, deux approches sont possibles : approche mécanique et approche physique ou métallurgique.

**I-1-1-Approche mécanique :**

Pour définir le comportement d'un matériau contenant des cavités par des grandeurs macroscopiques, Kachanov (1958) [1] a introduit une variable d'endommagement  $D$  qui est un paramètre scalaire opérant sur la contrainte de traction en chargement uniaxial et permettant de définir une contrainte effective :



**Figure I-1 : Représentation schématisée de la contrainte effective [1].**

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

Avec :

$\tilde{\sigma}$  : Contrainte effective.

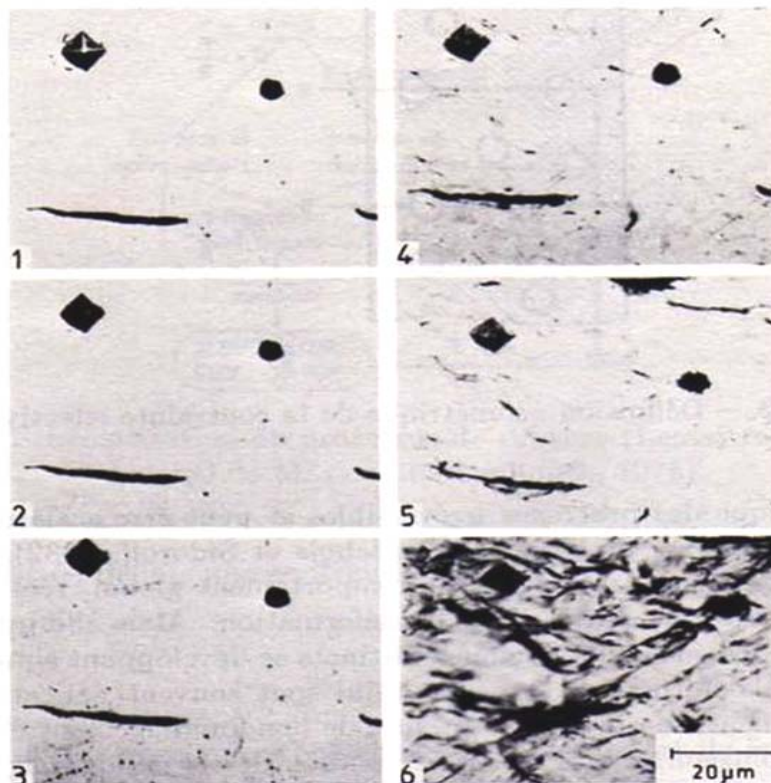
$\sigma$  : Contrainte macroscopique classique ; tel que  $\sigma = \frac{F}{S}$ .

$D$  : Paramètre caractérisant l'endommagement. Il est égal à 0 quand il n'y a pas d'endommagement ( $\tilde{\sigma} = \sigma$ ) et est égal à 1 à la rupture ( $\tilde{\sigma} = \infty$ ).

**I-1-2- Approche métallurgique :**

Afin de mesurer expérimentalement l'endommagement, il est nécessaire de le définir de façon physique. Lors de la déformation d'un matériau polycristallin, on peut résumer les mécanismes de déformation en trois aspects :

- Texture : rotation non aléatoire des réseaux cristallins des grains métalliques.
- Ecrouissage : phénomènes liés aux dislocations. Déplacement, création, multiplication, interaction, agencement.
- Porosité : amorçage, croissance, et coalescence des cavités apparues essentiellement autour des particules de seconde phase.



**Figure I-2 : Observation de l'endommagement par microscope optique. Compression sur parallélépipède [1].**

## I-2-Modélisation de l'endommagement :

Tous les calculs de prévision du comportement des solides sont fondés sur la mécanique des milieux continus. Introduire l'endommagement à des fins prévisionnelles dans les méthodes de la mécanique des milieux continus impose donc de caractériser ce phénomène par une variable continue.

### I-2-1-Homogénéisation :

L'observation des faciès de rupture montre que la géométrie des cavités et leur répartition sont très irrégulières. L'homogénéisation consiste à remplacer ce milieu anarchique par un milieu cellulaire périodique.

### I-2-2-Définition d'une variable d'endommagement :

#### I-2-2-1- Concept de surface endommagée :

Soit un solide endommagé au point M, on isole un élément de volume dont les dimensions sont suffisamment grandes devant celles des hétérogénéités. Soit une section S de cet élément, orientée par la direction de sa normale  $\vec{n}$ .

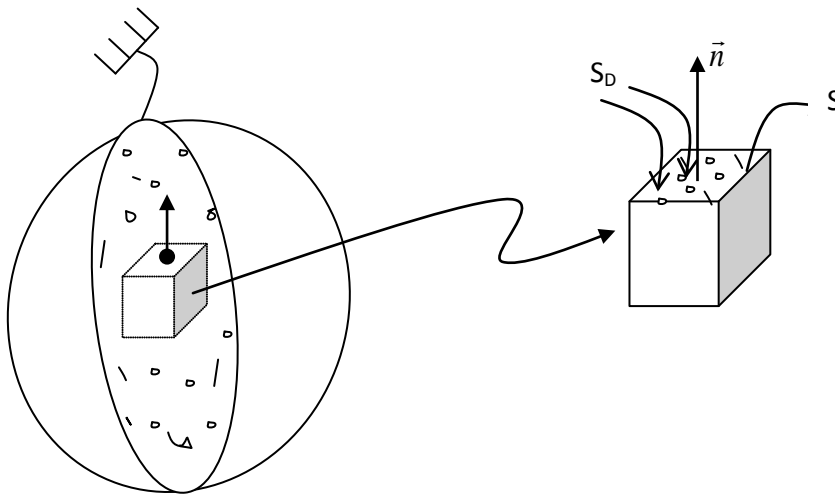


Figure I-3 : Schéma illustrant la définition de la surface effective [5].

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

$S_D$  : Surface des défauts existants dans S.

Soit  $\tilde{S}$  la section effectivement résistante tenant compte de la surface des défauts :  $\tilde{S} = S - S_D$

Par définition, la mesure de l'endommagement relative à la direction  $\vec{n}$  est :

$$D_n = \frac{S_D}{S} = \frac{S - \tilde{S}}{S} \quad (\text{I-2})$$

$D_n=0$  correspond au matériau initialement non endommagé ;

$D_n=1$  correspond au matériau totalement rompu perpendiculairement à  $\vec{n}$ .

$D_n$  est compris entre 0 et 1.

### I-2-2-2- Hypothèse d'isotropie :

Un cas particulier important est celui pour lequel  $D_n$  dépend peu ou pas de  $\vec{n}$ . Ceci correspond à l'hypothèse d'isotropie et l'endommagement au point M est complètement caractérisé par la variable scalaire  $D$ . Sur le plan physique ceci signifie que les fissures et les cavités sont uniformément distribuées par rapport à toutes les directions [1].

### I-2-2-3- Contrainte effective :

En supposant l'endommagement uniforme sur la surface  $S$ , la surface effectivement résistante est :

$$\tilde{S} = S(1 - D)$$

Par définition la contrainte effective est :

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{\tilde{S}} \quad (\text{I-3})$$

Soit encore :

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D}$$

**I-3-Mesure de l'endommagement :**

L'endommagement est la description de l'évolution des facteurs géométriques caractéristiques des cavités au cours de la déformation d'un métal, on distingue les méthodes de mesure directes et indirectes de l'endommagement.

**I-3-1-Mesure directe : Observation**

Pour observer toutes les étapes de l'endommagement, plusieurs démarches opératoires sont possibles :

- Observation d'une surface d'éprouvette préalablement polie puis déformée (examen surfacique).
- Observation d'éprouvette déformée puis sectionnée (examen de cœur).
- Observation de faciès de rupture (indication sur les derniers stades de la déformation).

**I-3-1-1-Classement des défauts :**

En général, dans la métallurgie physique et la physique du solide les défauts sont qualifiés de ponctuels (lacunes), linéaires (dislocation), surfaciques (défauts d'empilement) ou volumiques (microcavités) [1].

Les défauts sont également classés suivant leur forme définie à l'échelle de la métallographie optique, en uni-, bi- ou tridimensionnels

Les défauts dans l'endommagement des métaux sont surtout bi et tridimensionnels.

Bidimensionnels :

- Décohésion interphases
- Décohésion au sein de la matrice : clivage,...
- Fissuration : fatigue,...

Tridimensionnels :

Cavités amorcées au sein de la matrice (irradiation), aux joints de grains (fluage), autour des particules de seconde phase (inclusion ou précipités), ou encore par coalescence de défauts bidimensionnels.



**I-3-2-Mesure indirecte : Mesure d'un paramètre physique**

La variation d'une grandeur physique  $X$  est suivie au cours de la déformation depuis sa valeur  $X_0$  pour un état considéré comme initial jusqu'à sa valeur  $X_f$ , valeur à l'état rompu, on normalise en posant:

$$D = \frac{X - X_0}{X_f - X_0} \quad (\text{I-4})$$

**I-3-2-1-Mesure de densité :**

La présence des cavités à l'intérieur du matériau mène à le considérer comme un matériau poreux dit à porosité fermée. Sa densité macroscopique diminue et la mesure de celle-ci conduit à savoir directement la teneur volumique des cavités.

**I-3-2-1-1- Mesure de l'écroissage :**

L'introduction de défauts, dislocation ou lacunes, se traduit par le désordre de la structure cristalline. Plusieurs auteurs ont relié la densité de dislocation à la variation de densité des métaux.

$$\frac{\Delta V}{V} = \alpha \rho_d b^2 \quad (\text{I-5})$$

$V$  : volume de l'échantillon sans dislocation ;

$\Delta V$  : variation de volume due aux dislocations ;

$\rho_d$  : Densité de dislocation ;

$b$  : vecteur de Burgers des dislocations ;

$\alpha$  : Coefficient de proportionnalité. Il est égal à 3/2 d'après Friedel (1964), 2 d'après Stehle et Seeger (1956), et peut être supérieur à 2 d'après Lomer (1957) [1].

**I-3-2-1-2- Mesure de l'endommagement et l'écroissage :**

En faisant les hypothèses suivantes, il est possible de mesurer l'endommagement et l'écroissage en évaluant la densité :

- L'endommagement crée des défauts irréversibles par traitement thermique.

- L'écroutissement crée des défauts réversibles par traitement thermique : dislocations, lacunes.
- Le traitement thermique ne change pas la forme des cavités.
- Le traitement thermique ne change pas la structure métallurgique des alliages.

Si :

- La densité avant déformation  $d_0$
- La densité après déformation  $d_1$
- Après déformation et traitement thermique de restauration conduisant à la même structure de dislocation que l'état initial  $d_2$

Alors :

- $d_2 - d_1$  est due à l'écroutissement ;
- $d_2 - d_0$  est due à l'endommagement.

### I-3-2-2-Variation du module de Young :

Pour une éprouvette endommagée, la section efficace est :

$$\tilde{S} = S(1 - D)$$

La force appliquée en traction uniaxiale est :

$$F = \sigma S = \tilde{\sigma} \tilde{S}$$

On en déduit :

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D}$$

Le module de Young du matériau vierge est :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_e}$$

Et celui du matériau endommagé :

$$\tilde{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_e}$$

De trois dernières équations en déduit :

$$\tilde{E} = E (1 - D)$$

La mesure du module de Young au cours d'un essai de traction permet de mesurer l'endommagement  $D$ . Cette méthode nécessite la connaissance de  $\sigma$  et  $\varepsilon_e$  avec une très grande précision.

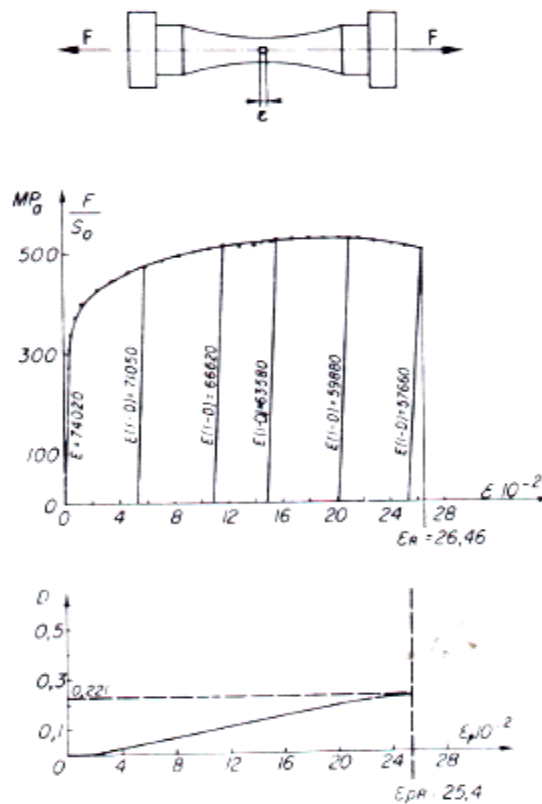


Figure I-4 : Mesure de l'endommagement par variation du module d'Young.  
Eprouvettes, courbes d'écrouissage et d'endommagement [1].

I-3-2-3-Méthodes électriques :

L'apparition de défauts dans un métal influe forcément sur sa résistivité, chose qui permet de pouvoir quantifier son endommagement. Les deux cas suivants sont souvent considérés comme méthode de mesure de l'endommagement.

**I-3-2-3-1- Détection et suivi d'une fissure :**

Dans cette méthode, l'éprouvette contenant une entaille ou fissurée par fatigue est traversée par un courant électrique qui contourne le défaut. Les montages sont intensiostatiques. Quand le défaut se propage les lignes de courant sont plus longues. Par conséquent le potentiel relevé augmente.

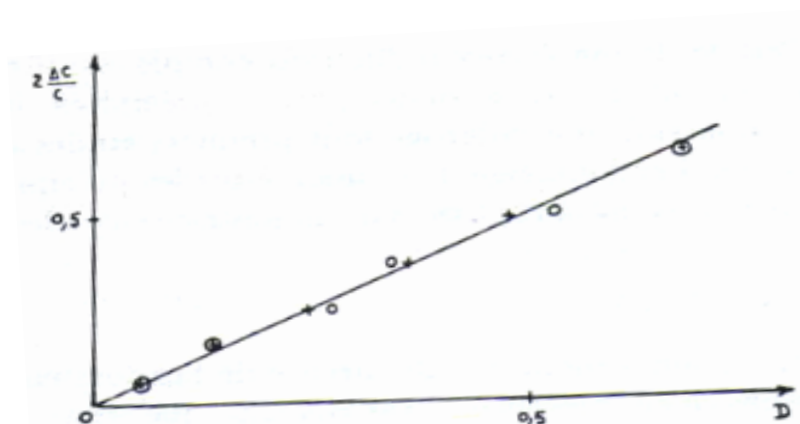
**I-3-2-3-2- Variation de résistance d'un matériau non fissuré :**

Il existe une analogie entre les équations de l'élasticité dans le cas des forces de volumes nulles et les équations de conductivité électrique dans le cas d'un régime stabilisé. De même, il y a une similitude entre les concentrations de contrainte et de densité de courant au voisinage d'un défaut circulaire dans une plaque infinie soumise à un champ de contraintes ou à une densité de courant uniaxiale et homogène à l'infini. On peut introduire une variable électrique d'endommagement  $D'$  opérant sur la densité électrique  $L$  comme la variable mécanique  $D$  opérant sur la contrainte  $\sigma$  [1] :

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad \text{et} \quad \tilde{L} = \frac{L}{1-D'} \quad (\text{I-6})$$

**I-3-2-4-Ultra-sons :**

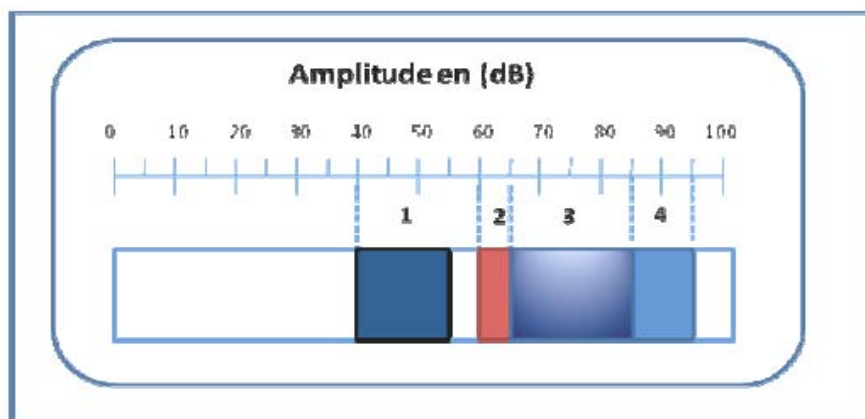
Gérard (1982) et Berthaud (1987) [1] ont utilisé une méthode ultrasonore pour quantifier l'endommagement. Dans un milieu unidimensionnel, la vitesse du son est en fonction de la masse volumique et du module de Young. L'endommagement modifie fortement le module de Young et donc la vitesse des ondes ultrasonores. La figure I-5 montre l'accord très satisfaisant entre la variation de la vitesse des ondes et celle du module de Young.



**Figure I-5 : Mesure de l'endommagement par ultra-sons. Points théoriques (+) et valeurs expérimentales (o) [1].**

### I-3-2-5-Emission acoustique :

Lors des essais de traction dans le cadre de l'étude faite par [13], les éprouvettes sont instrumentées par un capteur piézoélectrique capable de recueillir les signaux d'émission acoustique générés par l'endommagement du matériau. Ces signaux sont traités en amplitude maximale. Cette méthodologie de traitement a permis, dans le cas des matériaux composites à renfort synthétique et matrice organique d'attribuer à chaque plage d'amplitude un mécanisme d'endommagement.



- 1) 40-60 dB : fissuration matricielle (microfissuration de la matrice/coalescence des microfissures).
- 2) 60-65 dB : rupture de l'interface/décohésion.
- 3) 65-85 dB : frottement fibre-matrice, déchaussement des fibres « pull-out ».
- 4) 85-95 dB : rupture des fibres.

**Figure I-6 : Mesure de l'endommagement par émissions acoustiques [13].**

### I-4-Dommage par fatigue :

#### I-4-1-Définition, Amorçage, Propagation :

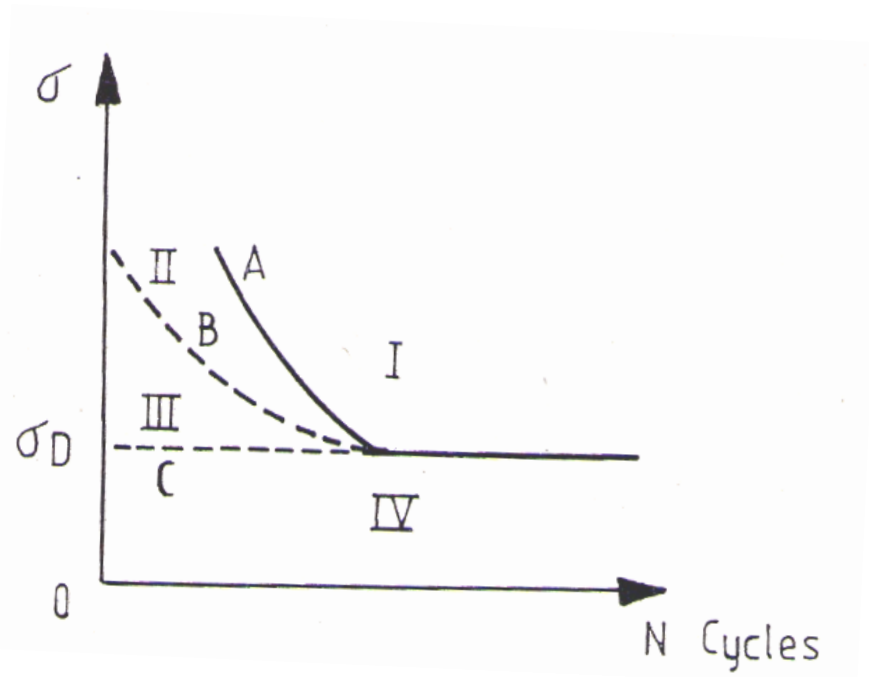
La notion de dommage présente deux aspects, l'un physique, l'autre descriptif.

L'aspect physique du dommage correspond aux variations des propriétés physiques des matériaux pendant la fatigue.

L'aspect descriptif de la notion de dommage consiste dans la présentation quantitative de l'endurance des matériaux.

French a proposé de distinguer quatre zones dans le diagramme d'endurance : la zone supérieure I correspondant à des conditions pour lesquelles les éprouvettes sont rompues. La zone inférieure IV correspond aux éprouvettes non rompues. La courbe A sépare les deux zones. Dans la région immédiatement inférieure à la courbe A, French distingue deux nouvelles zones, toutes deux situées au-dessus de la limite d'endurance. La zone II correspond à un endommagement du métal par surcharge. La zone III correspond à la partie supérieure de la zone IV, montrant une amélioration de l'endurance.

Entre les courbes A et B, il y a propagation des fissures jusqu'à la rupture. La courbe B est appelée courbe de dommage ou ligne de French [11].



**Figure I-7 : Représentation schématique de la courbe d'endurance de Wöhler (A) et de la courbe de dommage de French (B) [11].**

#### **I-5-Modifications microstructurales induites par la déformation cyclique :**

Même si la contrainte macroscopique est inférieure à la limite d'élasticité, le matériau subit des modifications microstructurales en surface par une déformation cyclique. Lors du mouvement de va et vient des dislocations, le matériau présente des reliefs à la surface conduisant à la formation d'intrusions et extrusions.

Dans la figure suivante, les extrusions apparaissent sous formes de languettes blanches, et les intrusions sous forme de sillons sombres.

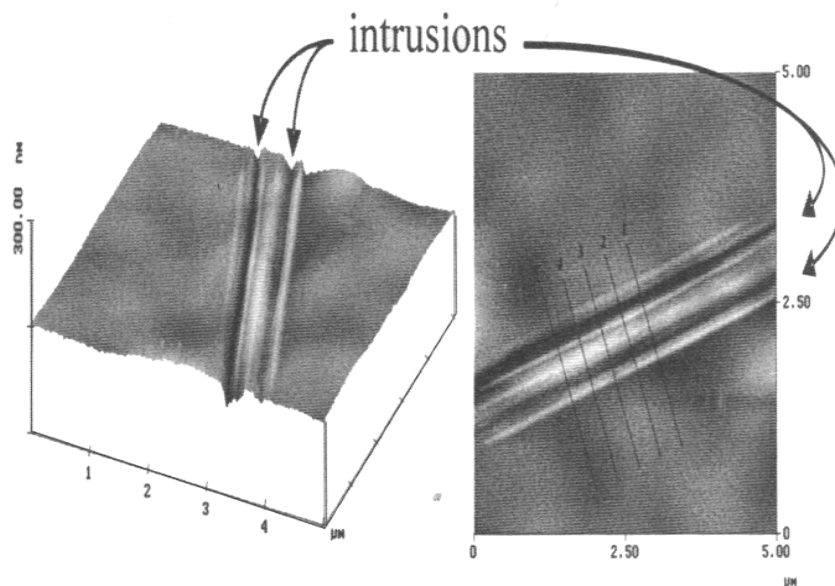


Figure I-8 : Extrusion-intrusions observées en microscopie à force atomique [2]

#### I-6-Différents stades de l'endommagement :

##### I-6-1-Amorçage de fissure :

Dans les alliages industriels, plusieurs processus d'amorçage peuvent intervenir en fonction de la microstructure et les conditions de sollicitation. La figure présente les différents sites d'amorçage potentiels.

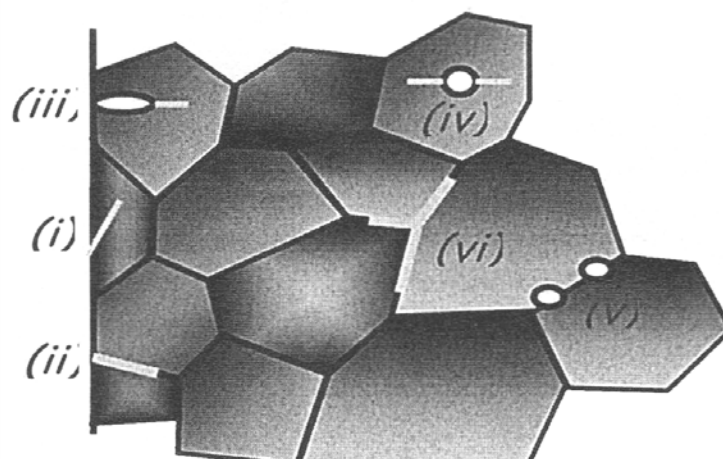
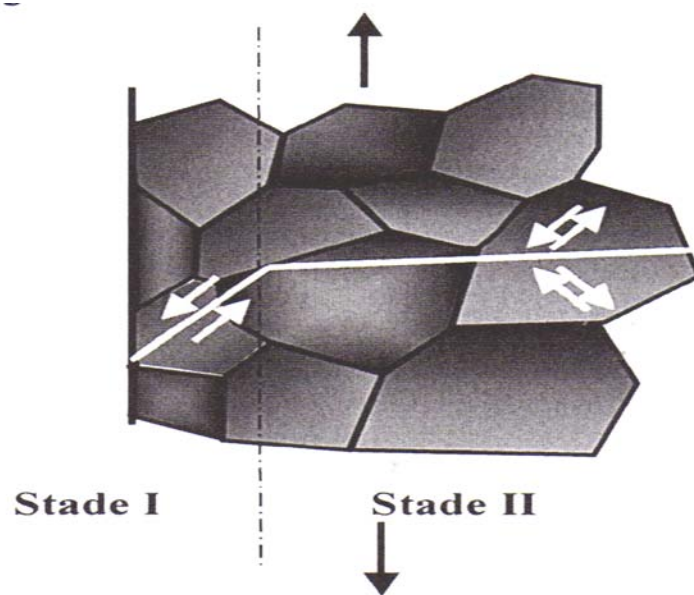


Figure I-9 : Différents sites d'amorçage : transgranulaire(i), intergranulaire (ii) défaut de surface (iii), inclusion interne (iv), microvide interne aux joints de grain (v), à l'intersection de joints de grain (vi) [2].

**I-6-2-Propagation de fissure :**

Après amorçage, les fissures peuvent éventuellement se propager sous l'action de sollicitations cycliques. Certaines fissures se propagent suivant les bandes de glissement jusqu'à l'apparition d'une fissure dite principale. Cette dernière va se propager suivant un plan macroscopiquement perpendiculaire à l'axe de sollicitation. La transition est dite d'un régime cristallographique (stade I) à un régime non cristallographique appelé stade II.



**Figure I-10 : Passage de stade I au stade II [2].**

**Conclusion :**

Les lois de la mécanique de l'endommagement permettent de quantifier l'endommagement et se faire une idée sur l'évolution des paramètres mécaniques. Avant l'amorçage des fissures nous sommes toujours dans les limites de l'endommagement, mais au-delà de cet instant, on fait appel à la mécanique de la rupture qui porte un intérêt à l'étude des fissures macroscopiques. Les techniques de quantification de l'endommagement présentées dans ce chapitre ne sont pas disponibles dans notre département. Nous avons adopté une méthodologie simple pour ce but. Nous avons choisi de quantifier l'endommagement par flexion rotative en mesurant la perte de résistance et la mesure de la flèche donnant la perte de rigidité flexionnelle.



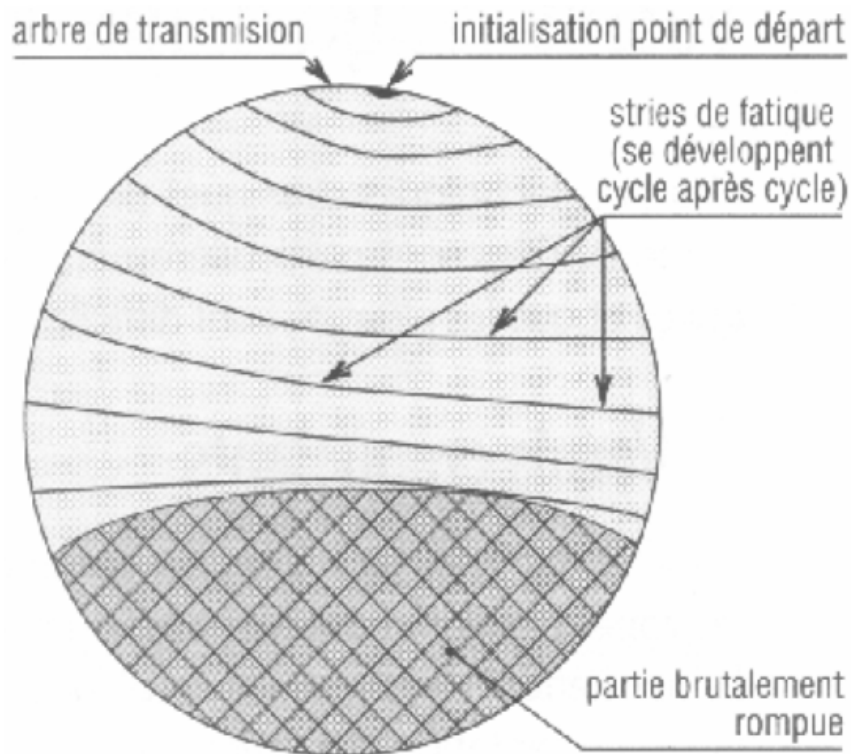
**Chapitre II :**  
*Généralités sur la fatigue*

**Introduction :**

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux consécutifs à l'application de cycles de chargement, cycles dont la répétition peut conduire à la fissuration puis à la rupture des pièces.

**II-1-Description du phénomène de fatigue :**

Le phénomène de fatigue est de première importance sur les structures d'avions et dans de nombreux autres domaines (roulement, engrenage, arbre de transmission..). Une roue de voiture mal équilibrée est un exemple de système soumis à un phénomène de fatigue. La rupture peut se produire, après un certain nombre de cycles ou allers et retours, sous des efforts bien inférieurs à la limite élastique du matériau ( $R_e$ ). Le mode de rupture est simple. Les fissures de fatigue démarrent à partir des imperfections en surface : rayures, empreintes, stries d'usinage, arête de filetage, hétérogénéité due au traitement thermique, défaut du réseau cristallin... Après amorçage, la fissure s'agrandit sous l'action des efforts alternés qui écartent et rapprochent continuellement les parties fissurées. La rupture définitive se produit brutalement lorsque les dimensions de la partie non encore fissurée ne sont plus suffisantes pour supporter les charges exercées.



**Figure II-1 : Aspect général d'une surface de rupture après défaillance due à un phénomène de fatigue.**

**II-2-Les différentes grandeurs mécaniques caractéristiques de la fatigue :**

Pour étudier le comportement en fatigue d'une éprouvette, trois grandeurs mécaniques sont importantes :

- La durée de vie, c'est-à-dire le nombre de cycles au bout duquel l'éprouvette casse sous une contrainte (sinusoïdale dans notre cas) de valeur moyenne imposée.
- La limite de fatigue, c'est-à-dire la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'est pas constaté de rupture après un nombre considéré infini de sollicitations (traditionnellement évalué à  $10^7$  sollicitations) pour une contrainte moyenne donnée.
- La limite d'endurance, c'est-à-dire la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il est constaté 50% de rupture après un nombre fini N (appelé censure) de sollicitations en contraintes purement alternées (avec une contrainte moyenne nulle).

**II-3-Essai de fatigue :**

L'endommagement par fatigue est un phénomène connu depuis le 19<sup>e</sup> siècle. Afin de préciser les différents aspects de la fatigue des métaux, les chercheurs ont effectué des essais pour différentes sollicitations, généralement sur des éprouvettes de petites dimensions avec des sollicitations simples.

Les essais de fatigue peuvent être classés selon le type de sollicitations par :

- Les essais de traction-compression.
- Les essais de flexion plane alternée.
- Les essais de torsion.
- les essais de flexion rotative.

**II-3-1-Caractérisation du comportement en fatigue :**

Pour un type d'essai de fatigue donné, on définit différents paramètres pour bien décrire le mode de sollicitation de l'essai de fatigue. Dans la figure suivante, nous donnons un exemple :

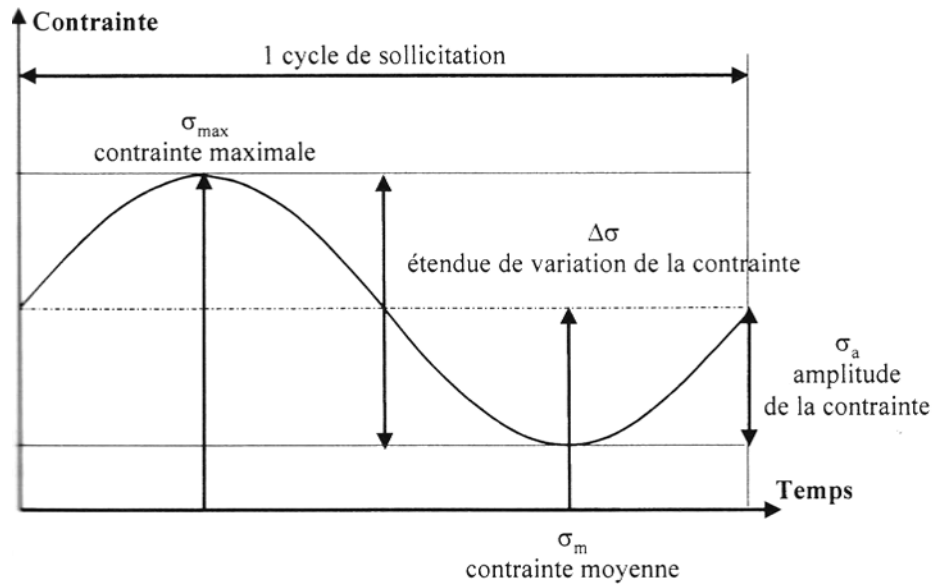


Figure II-2 : Cycle de contrainte de fatigue [2].

On définit enfin le rapport de contrainte  $R_\sigma$ , par :

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (\text{II-1})$$

### II-3-2-Définitions :

#### II-3-2-1-Limite de fatigue :

Pour une contrainte moyenne  $\sigma_m$  donnée, c'est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'est pas observé de rupture après un nombre infini de cycle. Dans le cas particulier des aciers, il est expérimentalement constaté que ce nombre infini peut être ramené à  $10^7$  cycles. En revanche, pour les aciers en présence de corrosion et pour certains alliages d'aluminium, de cuivre ou de titane, cette limite de fatigue reste théorique et sans intérêt puisque tous les mécanismes ont une durée de vie limitée par suite de l'usure, la corrosion... On est donc conduit à utiliser une autre grandeur appelée limite d'endurance [8].

#### II-3-2-2-Limite d'endurance :

Pour une contrainte moyenne  $\sigma_m$ , la limite d'endurance est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il est constaté 50% de rupture après un nombre fini N (appelé

censure) de sollicitations. La limite d'endurance en contraintes purement alternées s'écrit  $\sigma_D(N)$  [8].

### **II-3-2-3-Durée de vie :**

La durée de vie est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture  $N$ . L'exécution de  $n$  cycles ( $n < N$ ) entraîne un certain endommagement de la pièce qu'il est important de chiffrer car il détermine sa capacité de vie résiduelle et donc peut indiquer s'il faut ou non remplacer la pièce pour éviter un accident.

### **II-3-2-4-Contraintes appliquées :**

En service ou au cours d'essai de laboratoire, les efforts appliqués peuvent être des sollicitations de type simples, par exemple de traction-compression, de flexion ou de torsion, ou résulter d'une combinaison de ces sollicitations.

Généralement, au cours d'essais de fatigue, la contrainte appliquée variera suivant une fonction du temps approximativement sinusoïdale en raison des seules possibilités de fonctionnement des machines ou pour des raisons de commodité dans le traitement des résultats d'essai [8].

### **II-3-2-5-Contrainte nominale :**

La contrainte prise en charge au cours de l'essai de fatigue est une contrainte nominale. Elle est calculée par rapport à la section nette de la pièce ou de l'éprouvette considérée à l'aide de formules usuelles de la résistance des matériaux et relatives au domaine élastique. Elle ne fait pas intervenir la concentration de contrainte due à des entailles ou à d'autres causes [8].

### **II-3-2-6-Cycle de contrainte :**

Il y a un cycle de contrainte quand une contrainte d'amplitude variable dans le temps se répète périodiquement. Le plus utilisé est le cycle sinusoïdal.

### **II-3-2-7-Rapport d'endurance :**

C'est le rapport de la limite d'endurance à la contrainte de rupture en traction.

## **II-4-Classification des sollicitations des essais de fatigue :**

En service ou au cours d'essais de laboratoire, les efforts appliqués peuvent être des sollicitations de type simple (traction-compression, flexion ou torsion), ou de type combinés de deux ou plusieurs. Quelque soit le mode de sollicitation, l'effort appliqué varie en fonction du temps de façon aléatoire ou sinusoïdale avec une amplitude variable ou constante.

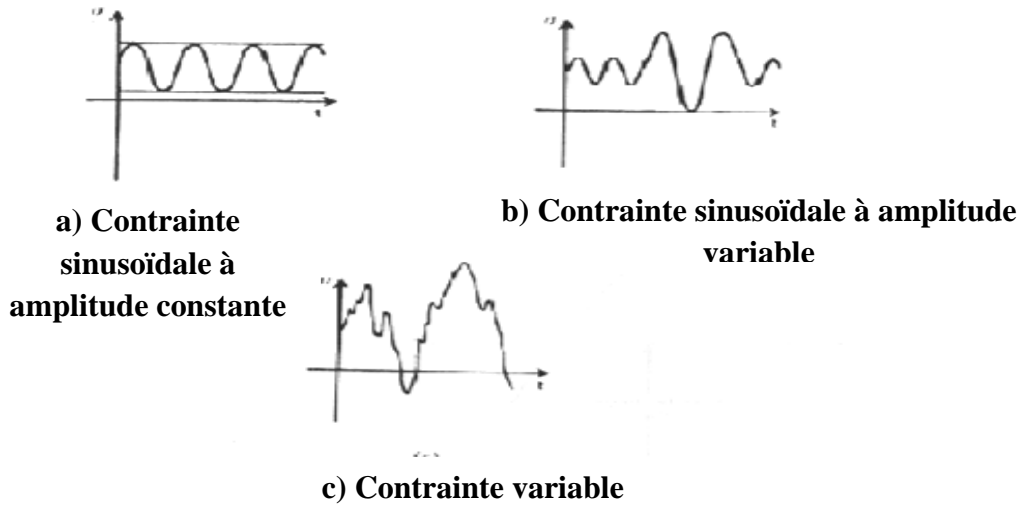


Figure II-3 : Différents types de sollicitations [7].

**II-4-1-Essais sous amplitude constante :** on distingue trois cas :

- 1) Sollicitations avec efforts statiques et variables de même nature et de même direction.  
On peut considérer dans ce cas, quelle que soit la nature des efforts agissant, trois sortes de sollicitation en fonction du temps : alternées, répétées, ondulées.

Contrainte alternée : Pour  $\sigma_m < \sigma_a$

Si  $\sigma_m = 0$  les efforts sont dit purement alternés.

Contrainte répétées : Pour  $\sigma_m = \sigma_a$

Contrainte ondulée : Pour  $\sigma_m > \sigma_a$

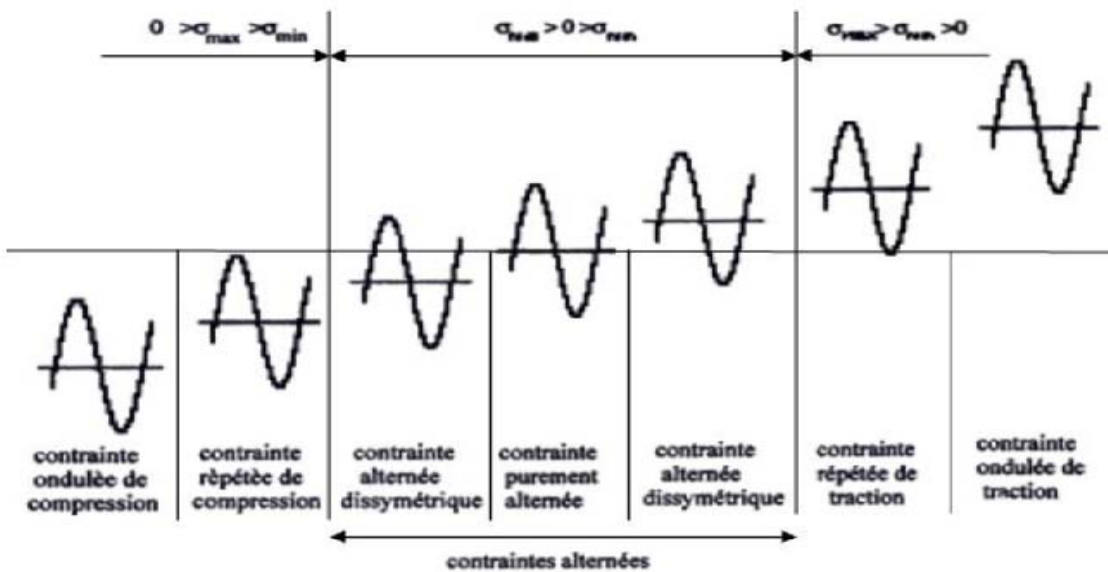


Figure II-4 : Type de cycle de contrainte [6].

- 2) Sollicitations avec efforts statiques et variables de nature différente.
- 3) Sollicitations avec efforts variable de nature différente.

#### **II-4-2-Essais à amplitude variable :**

Pour se rapprocher des conditions de la pratique, on a cherché à effectuer des essais sous amplitude variable. En effet, il est actuellement possible d'effectuer des essais avec variation aléatoire de l'amplitude (plusieurs spectres de charges peuvent être rencontrés) reproduisant la succession des contraintes rencontrées en service [10].

#### **II-5-Les éprouvettes d'essai :**

Le choix de l'éprouvette d'essai dépend de l'essai que l'on veut effectuer et la machine dont on dispose.

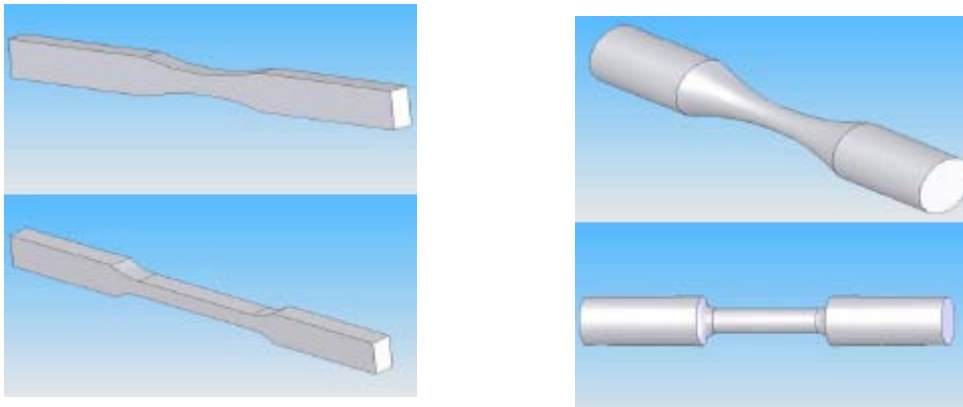
##### **II-5-1-Dimensions des éprouvettes :**

D'après les normes Françaises de produits Sidérurgiques [7], les dimensions des éprouvettes doivent être telles que :

- La contrainte maximale d'essai soit toujours supérieur à 25% de la capacité de la machine et que la contrainte minimale soit supérieure à 2.5% de la capacité.
- La fréquence propre de l'éprouvette soit le double au moins de la fréquence de la machine.
- Les rayons des congés de raccordement entre la partie utile, c'est-à-dire la partie soumise à l'essai, d'une éprouvette et les têtes d'amarrages doivent être choisis de manière à avoir un facteur de concentration de contrainte théorique inférieure à 1.05.
- Le diamètre de la partie soumise à l'essai doit être compris entre 5 et 10 mm, la longueur de la partie utile doit être supérieure à trois fois le diamètre dans cette zone.
- Les dimensions de têtes d'amarrages doivent être choisies de manière à ce que le rapport de la surface de la section des têtes d'amarrages à celle de la section de la partie utile, soit supérieur à 1.5.

### II-5-2-Forme des éprouvettes :

Les éprouvettes utilisées pour les essais de fatigue sont très diverses tant du point de vue forme que dimensions. On peut différencier deux types principaux : les éprouvettes de révolution de section circulaire et les éprouvettes prismatiques à section rectangulaire.



a) section rectangulaire

b) section circulaire

Figure II-5 : Formes des éprouvettes des essais de fatigue [7].

### II-5-3-Usinage des éprouvettes :

Lorsqu'il s'agit de déterminer les caractéristiques fondamentales d'un métal en fatigue, il est nécessaire de réduire le plus possible l'influence de l'état de surface de l'éprouvette sur le processus de fatigue qui conduira à la rupture.

L'usinage doit se faire par la préparation d'une ébauche avec une surépaisseur de 0.5mm, puis par des passes de finition de plus en plus fines, pour terminer avec une profondeur de passe de 0.025 mm. Enfin, la surface de l'éprouvette est polie longitudinalement avec des toiles et des papiers abrasifs de plus en plus fins, pour terminer avec un papier au carbone-silicone. Il faut obtenir ainsi une finesse de surface de 0.025 mm [11].

### II-6-Présentation pratique des résultats :

Pour la commodité de la représentation des résultats de l'essai de fatigue, il existe plusieurs méthodes. Les paramètres utilisés en fatigue sont :

- Temps : sous forme de nombre de cycle N.
- Contraintes : statiques ( $R_e$ ,  $R_m$ ) ;  
dynamique ( $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_a$ ,  $\sigma_D$ ).



Ces représentations sont faites sous la forme de courbes de Wöhler, de courbes d'équiprobabilité de rupture et de diagrammes d'endurance.

### II-6-1-Courbe de Wöhler :

Cette courbe est appelée courbe SN (Stress-number of cycles) dans les pays anglo-saxons.

### II-6-2-Tracé de la courbe de Wöhler :

Pour tracer une telle courbe, on réalise généralement des essais à contrainte moyenne constante et on fait varier l'amplitude du cycle de contrainte appliquée. Ainsi, à chaque pièce essayée correspond donc un point du plan ( $\sigma$ , N) et à partir d'un certain nombre d'essais à contraintes généralement décroissantes, on peut tracer une courbe qui à l'allure donnée sur la figure I-6.

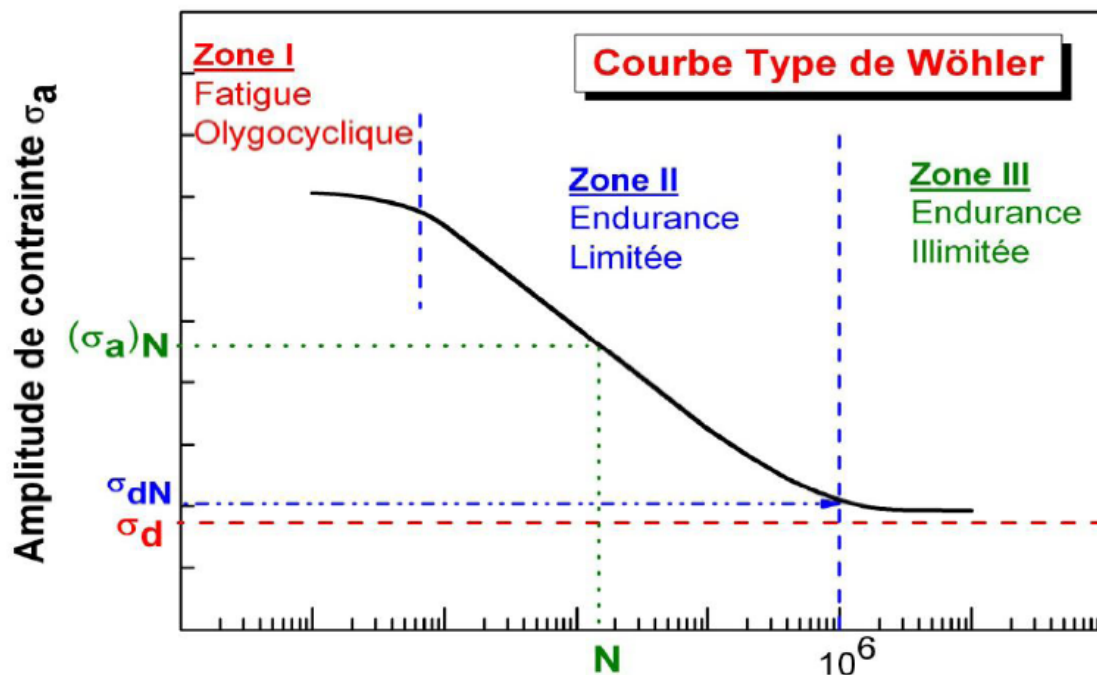


Figure II-6 : Courbe de Wöhler [6].

Une courbe de Wöhler comprend trois domaines :

- 1) Domaine de la fatigue oligocyclique ou les ruptures surviennent après un petit nombre de cycle ( $N \leq 10^{+4}$  cycles) avec déformation plastique importante.
- 2) Domaine d'endurance limitée ( $N > 10^{+4}$ ), ou les ruptures surviennent systématiquement après un nombre de cycle croissant avec la décroissance de la contrainte.

- 3) Domaine d'endurance illimitée ou les ruptures ne se produisent pas avant un nombre de cycle supérieur à la durée de vie envisagée.

### II-6-3-Courbe d'équiprobabilité de rupture :

La courbe de Wöhler est une courbe moyenne. Son utilisation peut s'avérer délicate du fait que les valeurs relevées indiquent seulement que la pièce a autant de chances de se rompre que de ne pas se rompre [8].

La courbe de Wöhler constitue un cas particulier ( $p = 50\%$  de rupture) dans la courbe d'équiprobabilité de rupture.

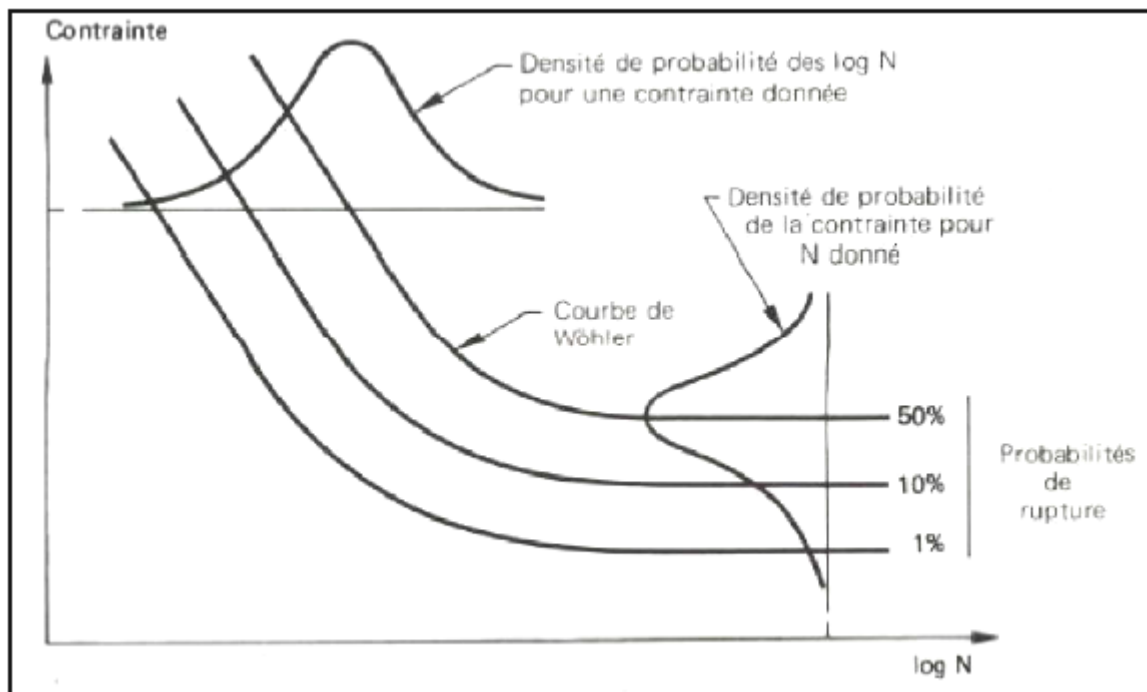


Figure II-7 : Courbe d'équiprobabilité de rupture (résultat théorique).

### II-6-4-Diagrammes d'endurance :

La limite d'endurance  $\sigma_D$  est aussi modifiée par la superposition d'une contrainte moyenne  $\sigma_m$  non nulle. Certains auteurs ont cherché à représenter l'ensemble de ces limites d'endurance sur différents diagrammes qui ont pris le nom de diagrammes d'endurance. Les diagrammes les plus utilisés sont :

**II-6-4-1-Diagramme de Haigh :**

Sur ce diagramme, l'amplitude de contrainte  $\sigma_a$  est portée en fonction de la contrainte moyenne  $\sigma_m$  à laquelle a été réalisé l'essai de fatigue.

**II-6-4-2-Diagramme de Goodman-Smith:**

Sur ce diagramme les contraintes maximale  $\sigma_{\max}$  et minimale  $\sigma_{\min}$  sont représentées en fonction de la contrainte moyenne  $\sigma_m$ .

**II-6-4-3-Diagramme de Roš :**

Essentiellement utilisé dans les pays anglo-saxons, ce diagramme représente la contrainte maximale  $\sigma_{\max}$  en fonction de la contrainte minimale  $\sigma_{\min}$ .

**II-6-4-4-Diagramme de Moore-Kommers-Jasper :**

Ce diagramme représente la contrainte maximale  $\sigma_{\max}$  en fonction du rapport des contraintes

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

**II-7-Estimation des caractéristiques de résistance et d'endurance en fatigue :****II-7-1-Nature et aspect de la dispersion des résultats des essais de fatigue :**

Le tracé de la courbe de Wöhler et de la limite d'endurance montre que les points figuratifs sont plus ou moins dispersés par rapport à la courbe présumée. Les causes de la dispersion sont multiples et dues, entre autre :

- Aux tolérances d'usinage et de montage des éprouvettes ;
- Aux défauts de centrage des éprouvettes par rapport à l'axe de sollicitation ;
- A l'état de surface et notamment aux rayures d'usinage, à la présence de contraintes superficielles résiduelles dues à l'usinage ou à des traitements mécaniques ou thermiques antérieurs ;
- Aux variations des paramètres pendant l'essai, température de l'éprouvette, échauffement local par suite des efforts alternés, corrosion atmosphérique ;
- A la dispersion des caractéristiques mécaniques d'un point à l'autre du métal due au manque d'homogénéité et à la présence des défauts (inclusion...) [10].

**II-7-2-Méthodes d'estimation de l'endurance à N cycles :**

La limite d'endurance peut être déterminée par une méthode statistique qui indiquera la moyenne et la dispersion de la distribution. Nous citons ici les principales méthodes statistiques :

- Méthode des probits ;
- Méthode en escalier (stair – case) ;
- Méthode d'approximations successives ou d'itération.

**II-7-2-1-Méthode de l'escalier :**

Les inconvénients de la méthode des « Probits » ont conduit à rechercher d'autres méthodes d'application plus aisées et, si possible plus économiques.

Dixon et Mood [13] ont proposé la méthode dite de « l'escalier ». Elle simplifie beaucoup la recherche des niveaux de contraintes d'essai, qui s'effectue automatiquement, et laisse à l'utilisateur une grande latitude quant au choix du nombre d'essai qui peut être beaucoup plus faible qu'avec la méthode des probits. Si la méthode est exécutable avec un faible nombre d'essais, il ne faut toutefois pas perdre de vue que la précision (justesse et fidélité) du résultat obtenu en dépendra fortement.

**II-7-2-2-Comparaison des différentes méthodes :**

La précision d'une estimation statistique est généralement définie, soit par l'écart type de cette estimation, soit par sa variance (carré de l'écart type).

Pour obtenir des estimations ayant même variance (même précision), il faut [11] :

- 100 éprouvettes par la méthode des probits.
- 80 éprouvettes par la méthode en escalier.
- 64 éprouvettes par la méthode d'itération.

Par contre, il ne faut pas oublier que la méthode des probits permet d'estimer convenablement la dispersion, que la méthode en escalier le permet moins bien, mais que la méthode d'itération ne le permet pas.

**II-7-2-3-Choix entre ces méthodes :**

Le choix entre ces méthodes dépendra principalement du nombre d'éprouvettes disponibles [11].

**II-8-Influence de divers facteurs sur la fatigue :**

Nombreux sont les facteurs qui peuvent influencer le phénomène de la fatigue, on peut citer :

**II-8-1-Facteurs d'ordres métallurgiques :**

On peut ranger dans cette catégorie tous les facteurs liés à la nature du métal qui constitue la pièce (composition chimique et structure cristallographique), à son élaboration et sa mise en forme (inclusions, défauts, fibrage), ainsi qu'aux traitements thermiques (structure métallographique et caractéristiques mécaniques) subis par la pièce.

**II-8-2-Facteurs d'ordres géométriques et mécaniques :****II-8-2-1-Influence de la fréquence :**

Dans les phénomènes de fatigue, la variation périodique de la contrainte produit une variation périodique de la déformation qui est, suivant le cas un allongement, un raccourcissement, une flèche ou un angle de torsion.

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

**II-8-2-2-Effets de la surcharge et de la sous charge :**

Une surcharge temporaire peut conduire à dépasser localement la charge de rupture du matériau et produire un endommagement irréversible sous forme d'une fissure.

Celle-ci pourra se propager ensuite, sous l'effet de la concentration de contrainte qu'elle provoque à son extrémité, même une sous contrainte moyenne qui autrement ne conduirait pas à rupture : c'est l'effet de surcharge (overstressing), d'autant plus grand à craindre que le matériau est plus sensible à l'effet d'entaille.

Inversement, si l'on soumet le matériau à des contraintes périodiques inférieures à sa limite d'endurance, on peut avoir localement des microdéformations plastiques, qui relâcheront les concentrations de contraintes et écrouiront le matériau, le rendant apte à supporter des contraintes plus élevées : c'est l'effet de sous-charge (understressing) qui, pour les matériaux les plus adaptables, permet de relever la limite d'endurance de façon sensible.

**II-8-2-3-Effet d'entaille :**

Ces faits connus s'expliquent par l'augmentation de la contrainte au fond de l'entaille (concentration de contrainte).

De façon plus générale, un changement de section entraîné par la présence d'une entaille, d'un filetage, d'un congé, d'un trou, etc. conduit à modifier la distribution uniforme des contraintes et à faire apparaître localement des concentrations de contrainte.

Il faut ensuite connaître la sensibilité à l'effet d'entaille du matériau considéré, que l'on représente par :

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (\text{II-2})$$

Où le coefficient dynamique  $K_f$  est le rapport des limites d'endurances sur éprouvettes lisses et sur éprouvettes entaillées. Ce coefficient est toujours inférieur à  $K_t$  pour les aciers à très haute limite d'élasticité.

Le facteur  $q$  peut varier de 0 à 1, lorsque  $q=0$  le matériau n'est pas sensible à l'effet de l'entaille ; lorsque  $q=1$  l'effet obtenu est égal à l'effet théorique.

#### **II-8-2-4-Effet d'échelle :**

L'effet d'échelle doit être pris en considération pour permettre de comparer non seulement l'endurance des pièces de machines et celle des éprouvettes, qui sont généralement de petites dimensions, mais aussi l'endurance des éprouvettes de sections différentes et de même forme. A niveau de contrainte égale deux pièces de même géométrie mais de dimensions différentes n'auront pas la même tenue en fatigue : plus les dimensions d'une pièce croissent, plus sa résistance à la fatigue diminue. Cette observation s'explique principalement par le volume de matière sollicité : plus celui-ci est grand, plus la probabilité d'avoir des défauts métallurgiques est grande [11].

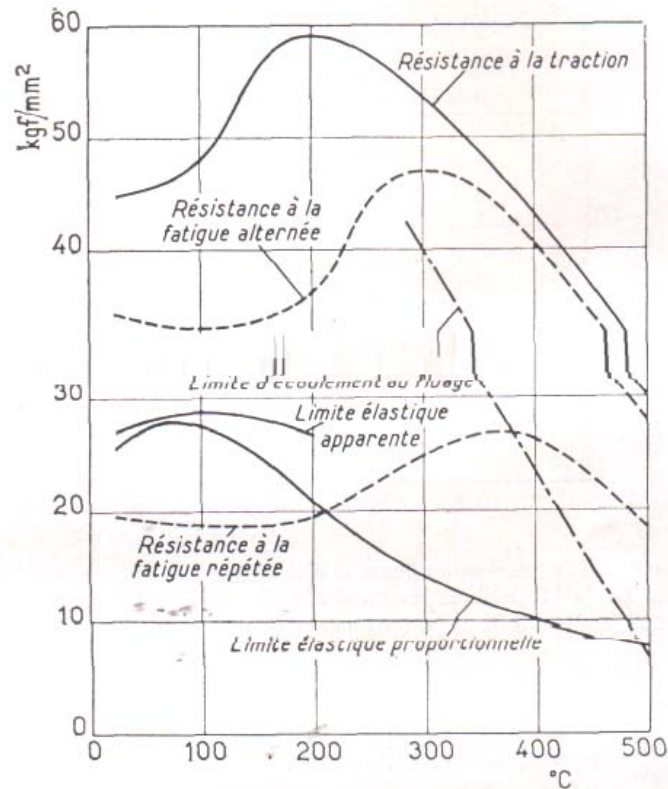
#### **II-8-2-5-Effet de l'état de surface :**

Il est établi depuis longtemps que les pièces usinées d'une manière grossière se rompent par fatigue plus vite que des pièces polies soigneusement.

#### **II-8-3-Influence de l'environnement :**

##### **II-8-3-1-Influence de la température :**

Lorsque la température diminue, la résistance à la traction augmente et la limite d'élasticité augmente plus rapidement. Il en est de même de la limite d'endurance.



**Figure II-8 : Variation des propriétés mécaniques avec la température d'essai, acier doux à 0,17 % C [11].**

### II-8-3-2-Influence de la corrosion :

Dès 1917 Haigh [11] a fait des essais comparatifs de résistance à la fatigue sur éprouvettes préalablement attaquées ou non par la corrosion, ou corrodées au cours même de l'essai de fatigue. Il résulte de ces expériences que la diminution de résistance à la fatigue par corrosion avant l'essai est en général faible, tandis que l'influence de la corrosion exercée durant l'essai de fatigue est considérable.

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

- Les efforts de fatigue s'exercent sur les pièces préalablement corrodées ;
- La fatigue et la corrosion agissent simultanément (fatigue sous corrosion).

### Conclusion :

Nous avons vu que la fatigue est un phénomène d'endommagement cyclique. Plusieurs paramètres peuvent influencer la tenue en fatigue. L'effet d'entaille étudié induit une modification du champ de contrainte et par conséquent réduit la durée de vie de la pièce.

## **Chapitre III :**

### ***Résultats et interprétations***



**Introduction :**

Le but de cette étude en premier lieu est de quantifier l'endommagement causé par la fatigue en flexion rotative sous entailles par essai de traction. Pour cela, nous avons utilisé des éprouvettes avec deux entailles parallèles avec différentes distance entre elles. Une série d'éprouvettes a été réalisée. Toutes les éprouvettes (sauf celles de référence) ont subi le même niveau de chargement en flexion rotative dont la vitesse de rotation est de 2760 tr/min jusqu'à un nombre de cycle imposé de 50000 cycles.

En second lieu, l'objectif est d'étudier la relation entre la distance entre entailles et la rigidité flexionnelle de l'éprouvette durant l'essai en flexion rotative. Pour cela, on mesure la flèche de l'éprouvette à des intervalles de temps réguliers.

**III-1-Matériau d'essai :****III-1-1-Propriétés :**

Acier mi-dur de haute qualité pouvant être utilisé à l'état recuit, ou à l'état trempé superficiellement.

**III-1-2-Emplois types :**

Pièces de qualité employées en mécanique générale, telles que : vérins, pistons, axes, pignons d'engrenage, paliers, etc.

**III-1-3-Etat d'emploi :**

L'acier XC48 est souvent utilisé à l'état recuit. Bien entendu, on peut le traiter par trempe et revenu dans le cas de pièces de petites dimensions.

**III-1-4-Composition chimique :**

**Tableau III-1 : Composition chimique de l'acier XC48 [12].**

<i>Élément</i>	<b>C (%)</b>	<b>Mn (%)</b>	<b>Si (%)</b>	<b>P (%)</b>	<b>S (%)</b>
<i>Composition en %</i>	<b>0,45 – 0,51</b>	<b>0,5 – 0,8</b>	<b>0,15 – 0,35</b>	<b>0,03</b>	<b>0,035</b>

## III-1-5- Caractéristiques mécaniques :

Tableau III-2 : Caractéristiques mécaniques de l'acier XC48.

<i>Propriétés mécaniques</i>	Limite élastique	Limite de rupture	Allongement à la rupture
<i>Symbole</i>	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	A %
<i>XC48</i>	375	660	15

## III-2-Eprouvettes d'essai :

## III-2-1-Forme et dimensions :

Les éprouvettes utilisées sont de forme cylindrique de longueur 120mm, avec un diamètre de 12mm aux extrémités adapté pour les pinces de fixation sur la machine. Une partie utile au milieu de longueur 60mm et de diamètre 8mm  $\pm 0.06$ , raccordée aux extrémités de l'éprouvette avec des congés de raccordement pour y minimiser la concentration de contrainte. L'éprouvette comporte deux entailles parallèles de distance variable dans les limites de la partie utile de  $X=1.5\text{mm}$  jusqu'à  $X=20\text{mm}$ .

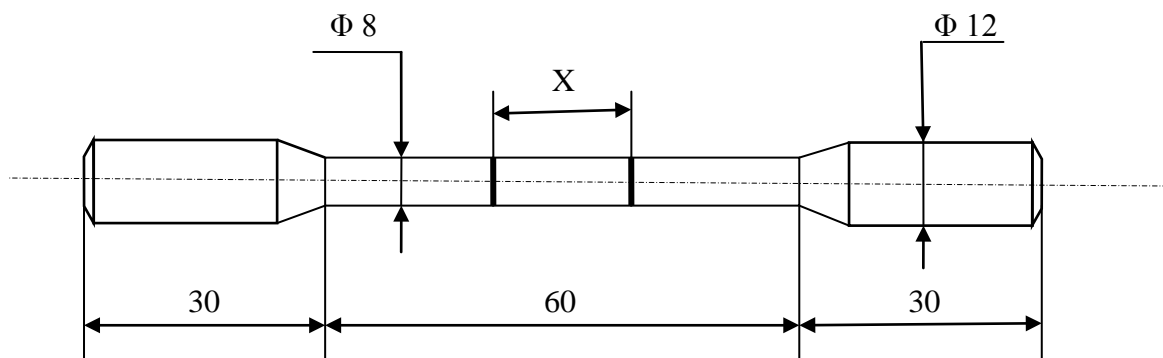


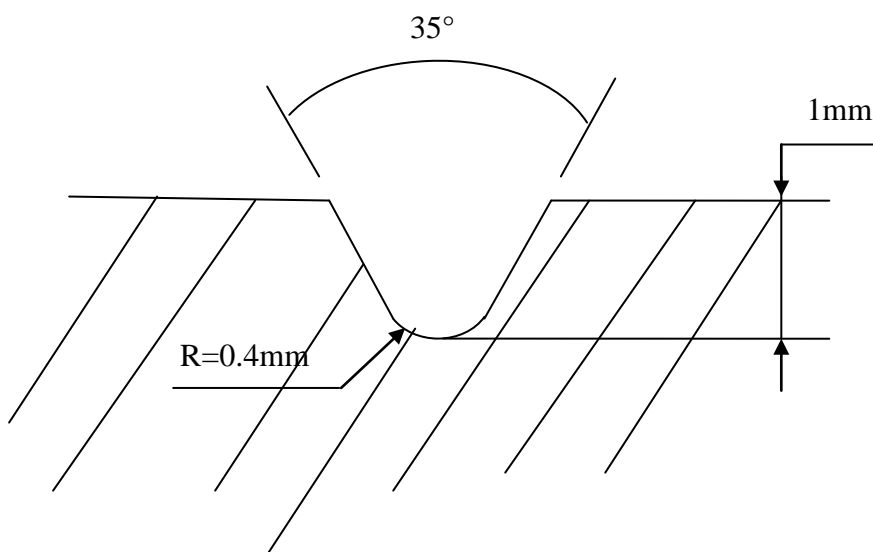
Figure III-1 : Eprouvette avec double entailles parallèles.

La distance entre deux entailles (X) est le paramètre qui varie d'une éprouvette à l'autre. Les entailles sont à égale distance du milieu de l'éprouvette (Voir la photo III-1).



**Photo III-1 : Variation de la distance X entre entailles.**

L'entaille en « V » est réalisée par un outil à pastille de rayon 0.4mm et d'angle d'ouverture de 35°. La profondeur de l'entaille est fixée à 1mm. Par conséquent, l'entaille prend la forme suivante :



**Figure III-2 : Forme de l'entaille.**

**III-2-2-Usinage des éprouvettes :**

Les éprouvettes ont été réalisées par un tour à commande numérique au sein de l'atelier de l'entreprise USI-PRECIS. L'usinage a été fait en tournage à partir de barreaux étirés de diamètre 14mm et il est passé par deux opérations élémentaires : ébauche et finition.

**III-3-Machines d'essais utilisées :****III-3-1-Machine de flexion rotative :**

La première étape des essais qui consiste à solliciter les éprouvettes en fatigue est réalisée sur une machine de flexion rotative, type « SCHENCK » disponible au niveau du laboratoire de métallurgie de département de génie mécanique.



**Photo III-2 : Machine de flexion rotative SCHENCK.**

## III-3-1-1-Description de la machine :

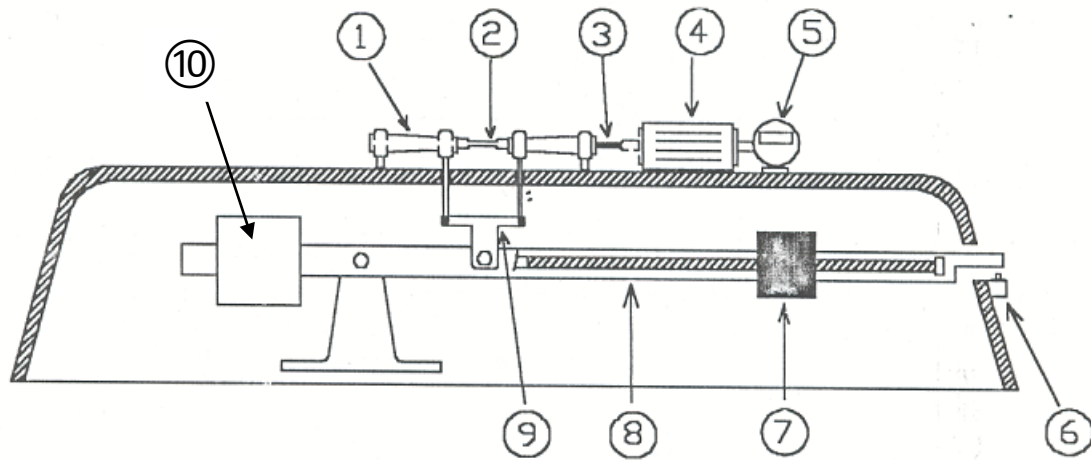


Figure III-3 : Schéma de la machine de flexion rotative [5].

La machine est constituée de deux parties principales :

La partie tournante :

- (1) Deux fourreaux à l'intérieur desquels est montée une pince qui sert à serrer l'éprouvette.
- (2) Eprouvette.
- (3) Accouplement élastique.
- (4) Moteur électrique.
- (5) Compte-tours.

La partie de chargement :

- (6) Coupe circuit qui permet de mesurer le nombre de cycle à rupture.
- (7) Masse coulissante.
- (8) Levier.
- (9) Chape, relie les fourreaux au levier de manière à transmettre à la partie tournante l'effort produit par la masse coulissante.
- (10) Contre poids.

### III-3-1-2-Mode de sollicitation de l'éprouvette :

La sollicitation sur la machine de flexion rotative est modélisée par une flexion à quatre points d'une poutre. De cette manière, l'éprouvette est soumise à un moment fléchissant constant sur tout le long de sa partie utile.

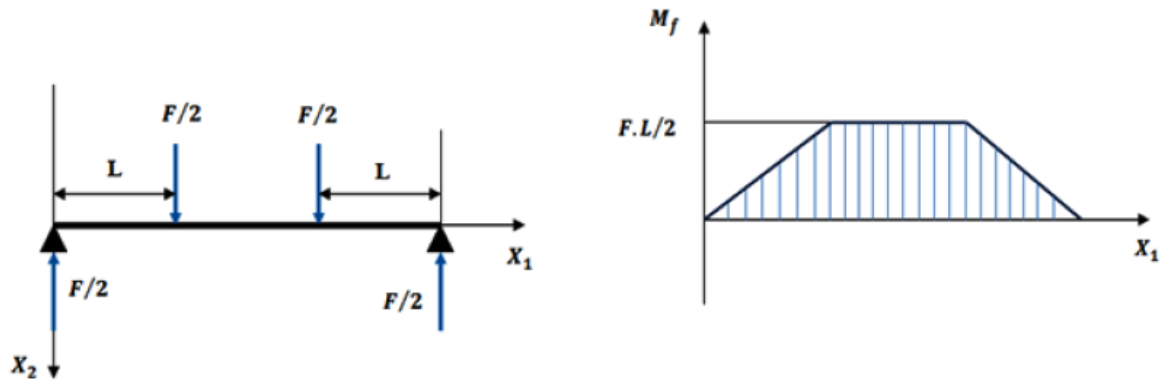


Figure III-4 : Mode de sollicitation sur l'éprouvette [6].

La contrainte est obtenue par flexion plane. L'amplitude est constante. La fatigue est engendrée par la rotation de la pièce. Ainsi, toutes les fibres sauf la fibre neutre, sont successivement tendues puis comprimées. La contrainte sur chaque fibre varie ainsi en fonction du temps suivant une loi sinusoïdale avec une valeur moyenne nulle. Chaque révolution correspond à une période ou à un cycle de fatigue.

Pour les fibres externes qui sont les plus sollicitées, l'amplitude de la contrainte induite par la flexion est maximale.

### III-3-2-Machine de traction utilisée :

L'essai le plus répandu est l'essai de traction simple ou l'éprouvette (la partie utile de l'éprouvette) est soumise à un champ de contrainte uniaxial uniforme.

Afin de quantifier l'endommagement en fatigue par essai de traction, qui est l'objet de cette étude, nous avons utilisé une machine de traction d'une capacité de 600kN disponible au niveau du laboratoire de la société AMTUMET – REGHAIA.



**Photo III-3 : Machine de traction monotone utilisée.**

**III-4-Résultats d'essais :**

Nous avons dans un premier temps effectué des essais de traction sur des éprouvettes entaillées non endommagées par fatigue. Celles-ci ont servi comme référence pour l'endommagement. Dans une seconde étape, nous avons procédé à endommager les éprouvettes par fatigue, à 2760tr/min. Ces dernières ont subi par la suite l'essai de rupture par traction. Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau suivant :

**Tableau III-3 : Résultats de l'essai de traction des éprouvettes.**

X (mm)	numéro de l'éprouvette	Essai de fatigue		Essai de traction	
		contrainte appliquée (Mpa)	cycles imposés	Charge de rupture $F_r$ (kN)	Taux d'endommagement D(%)
1,5	1(référence)	-	-	34,5	35
	2	180	50000	22,5	
2,5	1(référence)	-	-	23,7	17
	2	180	50000	24,5	
	3	≠	≠	15	
5	1(référence)	-	-	23,7	16
	2	180	50000	19,5	
	3	≠	≠	20,7	
7,5	1(référence)	-	-	34,5	18
	2	180	50000	33,7	
	3	≠	≠	23,3	
10	1(référence)	-	-	31	29
	2	180	50000	24,7	
	3	≠	≠	19,5	
12,5	1(référence)	-	-	33	34
	2	180	50000	23,3	
	3	≠	≠	20,3	
15	1(référence)	-	-	34,5	39
	2	180	50000	21	
17,5	1(référence)	-	-	35,5	49
	2	180	50000	18	
20	1(référence)	-	-	37,5	32
	2	180	50000	25,5	



Pour des éprouvettes avec une seule entaille au milieu, nous avons obtenu les résultats suivants :

**Tableau III-4 : Résultats de l'essai de traction pour éprouvettes avec une seule entaille au milieu.**

X (mm)	numéro de l'éprouvette	Essai de fatigue		Essai de traction	
		contrainte appliquée (Mpa)	cycles imposés	Charge de rupture $F_r$ (kN)	Taux d'endommagement D(%)
0	1(référence)	-	-	37,7	45
	2	180	50000	22,5	
	3	≠	≠	19,5	

Avec :

$$D\% = \left(1 - \frac{F_r}{F_{r0}}\right) * 100 \quad (\text{III-1})$$

Où  $F_{r0}$  est la charge de rupture de l'éprouvette de référence (non endommagée).

**Remarque :**

Dans le cas où il y a deux éprouvettes qui ont subi la fatigue, nous prenons la valeur moyenne :

$$F_r = \frac{F_{r2} + F_{r3}}{2} \quad (\text{III-2})$$

Tel que  $F_{r2}$  est la charge de rupture de l'éprouvette numéro 2 et  $F_{r3}$  est celle de l'éprouvette numéro 3.

Les figures suivantes montrent la chute de la charge de rupture d'une éprouvette de référence (éprouvette non endommagée) par rapport à celles endommagées par fatigue pour différentes distances entre entailles. Toutes les courbes présentent la même allure :

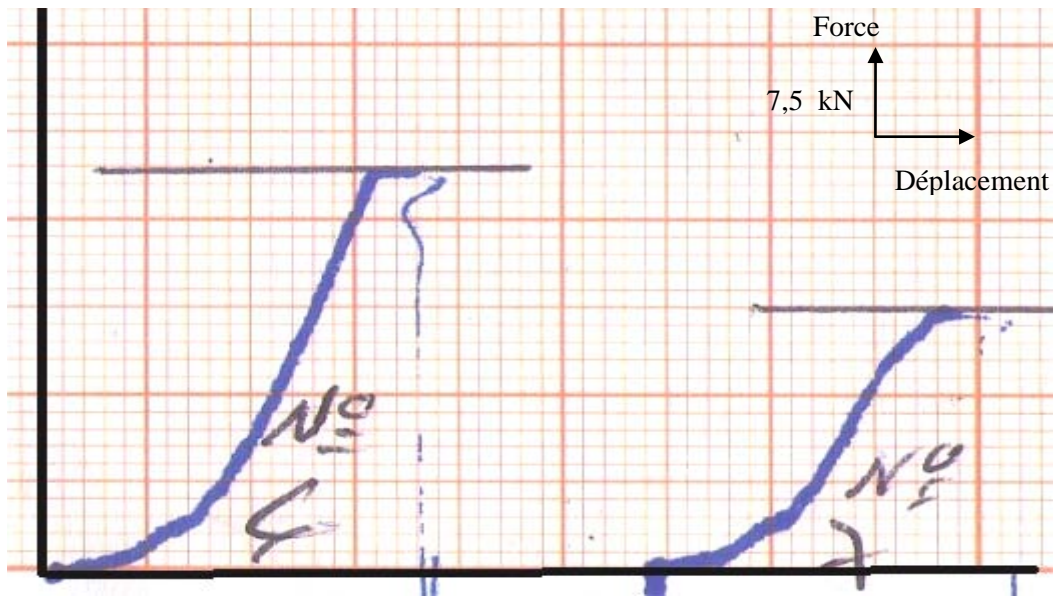


Figure III-5 : Courbes de traction d'une éprouvette de référence (n6) et celle endommagée (n7) pour une distance entre entailles  $X=1.5\text{mm}$ .



Figure III-6 : Courbes de traction d'une éprouvette de référence (n14) et celles endommagées (n15 et 16) pour une distance entre entailles  $X=7.5\text{mm}$ .

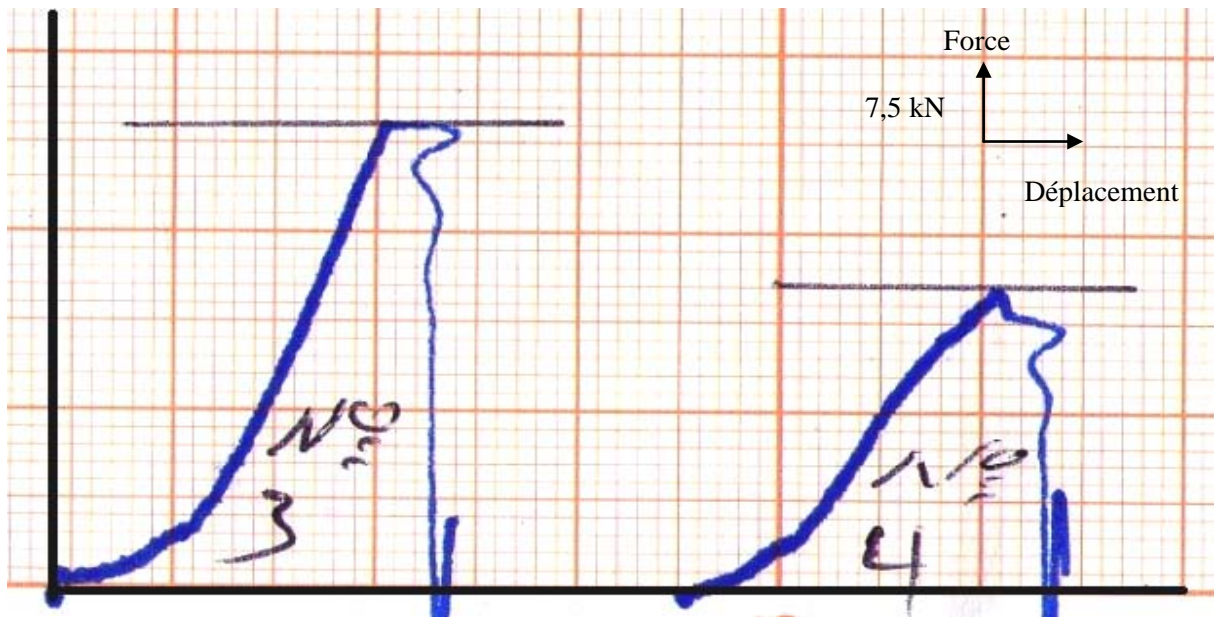


Figure III-7 : Courbes de traction d'une éprouvette de référence (n3) et celle endommagée (n4) pour une distance entre entailles  $X=20\text{mm}$ .

#### III-4-1- Représentation et interprétation des résultats :

La représentation des valeurs du taux d'endommagement  $D$  en fonction de la distance entre entailles a donné le graphe suivant :

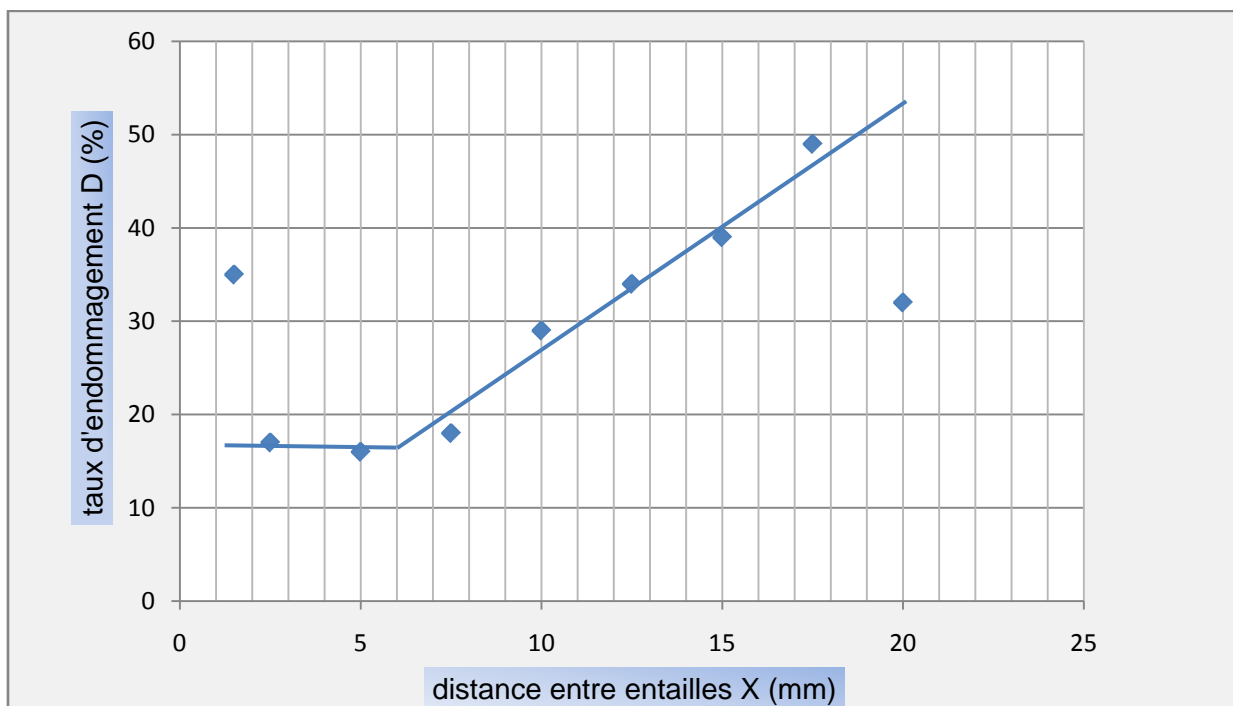


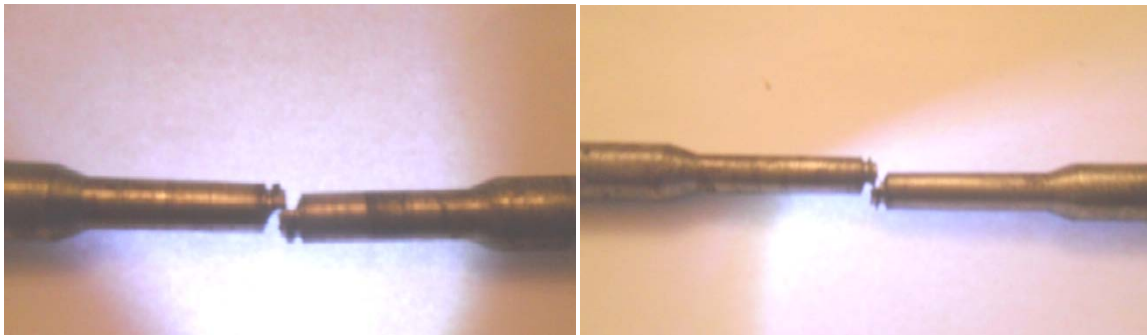
Figure III-8 : Variation du taux d'endommagement  $D$  en fonction de la distance entre entailles  $X$  de l'acier XC48.

Le graphe présente deux zones :

Zone I : le taux d'endommagement est constant et égal à 17%. Cette zone correspond aux distances entre entailles de  $X=1.5\text{mm}$ ,  $2.5\text{mm}$ , et  $5\text{mm}$ . Lors de l'essai de traction les faciès de rupture de la majorité des éprouvettes de cette zone ont présenté un phénomène d'interaction entre les deux entailles parallèles, c'est à dire que la rupture s'est faite partiellement dans les plans des deux entailles et dans un plan incliné reliant toutes les deux, contrairement à la deuxième zone dont la rupture des éprouvettes est survenue suivant une surface pratiquement plane.

Zone II : le taux d'endommagement est proportionnelle à la distance entre entailles pour une valeur de 18% à  $X=7.5\text{mm}$  remontant jusqu'à 49% pour  $X=17.5\text{mm}$ .

Les photos suivantes présentent la nature de rupture et l'aspect des faciès de rupture des éprouvettes des deux zones :



(B) Photo III-4

(A) Photo III-5



(C) Photo III-6

**Aspect d'interaction entre entailles lors de la rupture des éprouvettes**

(A)  $X=1.5\text{mm}$ ; (B)  $X=2.5\text{mm}$ ; (C)  $X=5\text{mm}$ .



**Photo III-7 : Faciès de rupture d'éprouvette endommagée de  $X=17.5\text{mm}$ .**

Sur la surface de rupture (Photo III-7), nous distinguons deux zones d'aspects différents : la première d'une 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 représentant la zone de rupture finale obtenue après l'essai de traction.

#### **III-4-2-Mesure de la flèche :**

La flèche a été mesurée sur trois éprouvette de  $X=2.5\text{mm}$ ,  $10\text{mm}$ , et finalement  $20\text{mm}$ . Le nombre de cycle imposé en fatigue est de 50000. Nous avons effectué les mesures de la flèche toutes les quatre minutes. Les résultats obtenus sont dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-5 : Evolution de la flèche en fonction du nombre de cycle, X=2.5mm, 10mm, et 20mm.

		flèches ( $\times 10^{-2}$ mm)		
contrainte imposée (MPa)	nombre de cycles	X=2,5mm	X=10mm	X=20mm
180	0	10	15	17
	11040	12	17	21,5
	22080	14	18	25
	33120	15,5	20	29
	44160	18	21	31

Ces résultats nous ont permis de tracer le graphe suivant :

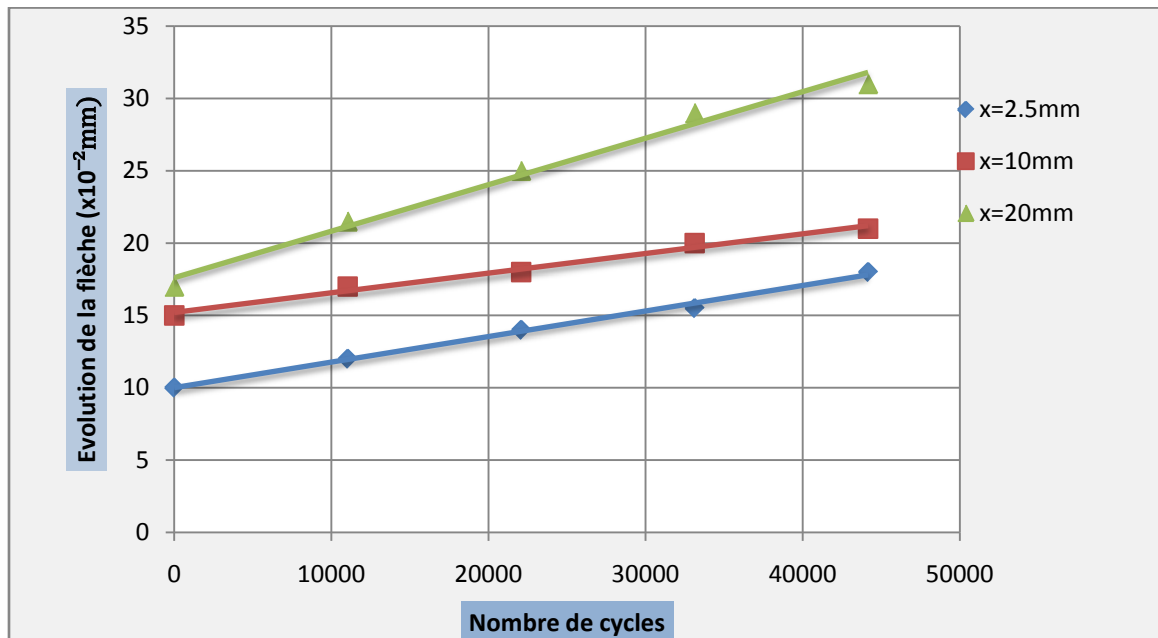


Figure III-9 : Variation de la flèche en fonction du nombre de cycle pour X=2.5mm, 10mm, 20mm.

Le graphe montre que la flèche est linéairement proportionnelle au nombre de cycle pour les trois distance entre entailles choisies. La flèche augmente avec le nombre de cycle.

Nous remarquons que la flèche correspondant à  $X=20\text{mm}$  est nettement supérieure à celle de  $10\text{mm}$ , et celle de  $10\text{mm}$  est supérieure à celle de  $2.5\text{mm}$ .

La flèche mesure la rigidité flexionnelle. L'augmentation de la flèche au cours du temps est un indicateur de l'endommagement de l'éprouvette.

#### **Conclusion :**

Les résultats de cette étude ont montrés que la flèche évolue proportionnellement avec la durée de vie. Elle est plus importante si la distance entre entaille augmente.

Ce résultat est en corrélation avec la variation du taux d'endommagement (D) mesuré par la chute de résistance à la traction en fonction de la distance entre entaille (X). Ce dernier est constant dans une première tranche jusqu'à  $X=7.5\text{mm}$ . Mais à partir de cette valeur, la variation devient proportionnelle, c.-à-d. plus X augmente plus le taux d'endommagement augmente.

## **Conclusion générale**



Les travaux présentés dans ce mémoire sont consacrés à l'étude du phénomène de l'endommagement par fatigue en flexion rotative. Cette étude a été réalisée sur des éprouvettes cylindriques avec double entailles parallèles en acier XC48, avec une distance entre entaille (X) variable de 1.5mm jusqu'à 20mm.

La quantification de l'endommagement des éprouvettes a été faite à l'aide de l'essai de traction et le paramètre choisi est la chute de la résistance ultime.

L'ensemble de ce travail nous amène à faire les conclusions suivantes :

Le taux d'endommagement est constant, puis proportionnel à la distance entre entailles à partir d'une valeur de 7.5mm.

Dans une partie complémentaire nous avons mesuré la flèche pour des distances entre entaille de 2.5mm, 10mm, et 20mm. Les résultats viennent renforcer l'idée faite sur le lien entre la distance entre entaille et le taux d'endommagement et montrent que la perte de rigidité flexionnelle est proportionnelle au nombre de cycle et elle est de plus en plus importante si X augmente.

# **Bibliographie**

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. Montheillet et F. Moussy. Physique et mécanique de l'endommagement. Les éditions de physique, 1986.
- [2] Gilbert Hénaff et Franck Morel. Matériaux, structures fatigue des structures « endurance, critères de dimensionnement, propagation des fissures, rupture ». Ellipses, 2005.
- [3] Dominique François. Endommagements et rupture de matériaux. Les éditions de physique, 2004.
- [4] SOULTAN Malloum. « Approche du bruit magnétomécanique, application au suivi de la fatigue en flexion rotative ». Thèse[En ligne] : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.
- [5] Madame DOUMI née ADAMOU Nawal Siham. «Quantification de l'endommagement en fatigue sous corrosion sous entaille par essais de traction ». Thèse de magister USTHB, 2006.
- [6] IBRAHIMI Abdelhamid. « Essais de fatigue par flexion rotative sur éprouvettes avec double-entailles parallèles ». PFE/ ENP, 2009.
- [7] SAIFI Amina. « Conception et réalisation d'un système de fixation d'éprouvette pour la machine de flexion rotative et validation expérimentale ». PFE/ENP, 2008.
- [8] SAIDANI Lyamine. « Etude expérimentale du comportement en fatigue des métaux par flexion rotative ». Thèse de magister Université de M'sila, 2007.
- [9] SOFIANE Mokrane. « Etude et conception d'un système de fixation pour la machine de flexion rotative application avec Solidworks ». PFE/ ENP, 2007.
- [10] Claude Bathias et Jean-Paul Bailon. Maloine S.A. La fatigue des matériaux et des structures. Editeur Paris et Les Presses de l'Université de Montréal Québec, 1980.
- [11] R. Cazaud. La fatigue des matériaux et des structures. DUNOD. Paris, 1969.
- [12] NF A 35.552 de juillet 1986.
- [13] A.Elouaer, Z.Aboura, R.Ayad, H.Sabhi et M.L Benzeggagh. « Suivi de l'endommagement en fatigue des composites à base de fibres végétales ». Comptes Rendus des JNC 16-Toulouse (France), 2009.