

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université M<sup>ed</sup> Boudiaf de M'sila  
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté par

SAIDANI LYAMINE

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

En Génie Mécanique  
Option : Construction Mécanique

Sujet

ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT EN FATIGUE DES  
METAUX PAR FLEXION ROTATIVE

Devant le jury composé de :

Prof. BOUCHOUCHA Ali	Président	Université Mentouri, Constantine
Prof. MEZIANI Salim	Rapporteur	Université Mentouri, Constantine
Dr. BEGHIDJA Abdelhadi (MC)	Examineur	Université Mentouri, Constantine
Dr. FARCI Chaouki (MACC)	Examineur	Université M <sup>ed</sup> Boudiaf de M'sila

Soutenu le : / / 2007

## ملخص:

هذا العمل يتطرق لدراسة تجريبية لسلوك الإجهاد بالانحناء الدوراني لمعدن من الإنتاج الوطني. بإجراء العديد من التجارب على عدد من العينات المتماثلة بإجهادات دورية متماثلة أيضا ، نستنتج خصائص مقاومة الإجهاد لهذا المعدن و ذلك بمعرفة :

- مقاومة الإجهاد الحدية تحت إجهادات دورية محددة.
- التحمل الحدي.
- التمثيل البياني لسلوك المعدن عن طريق بعض الرسومات البيانية مثل : منحني وولر ، المنحنيات متكافئة احتمال الانكسار, الخ .

و عن طريق التقريبات الرياضية ، مع الأخذ بعين الاعتبار التشتت في النتائج التجريبية لنفس ظروف العمل ، نستعمل منحني وولر في تصاميم عمل موثوقة.

## الكلمات المفاتيح:

الإجهاد, الانحناء الدوراني, التحمل, مدة الحياة.

## Résumé

Ce travail concerne une étude expérimentale du comportement en fatigue par flexion rotative d'un acier de production nationale.

La limite de fatigue pour un cycle de contrainte (de forme donnée), ainsi que la limite d'endurance ont été déterminés, et la tenue en fatigue de cet acier a été caractérisée grâce à des essais exécutés sur un certain nombre d'éprouvettes (identiques) pour des cycles de contrainte (de la forme donnée). Le comportement de cet acier a été représenté graphiquement par la courbe de Wöhler les et les courbes d'équiprobabilité de rupture.

La dispersion expérimentale des résultats, observée lors des essais a été prise en considération par l'utilisation des approches mathématiques, pour rendre possible l'utilisation des courbes de Wöhler probabilisées dans un concept fiabiliste.

**Mots clés :** Fatigue, flexion rotative, endurance, durée de vie.

## Abstract

This work is related to an experimental study of the behaviour by rotating bending fatigue of a national production steel.

The fatigue limit for a cycle of stress (of a given form), as well as the endurance limit have been determined and the resistance to fatigue of this steel have been characterized, by means of the tests carried out on a certain number of test-tubes (identical) for cycles of stress. The behaviour of this steel was represented graphically by the Wöhler's curve and the curves of equal-probability of fracture.

The dispersion of experimental results observed during the tests was taken into account by the use of the mathematical approaches in order to make the use of Wöhler's probabilized curves possible for reliable designs.

**Key-Words:** Fatigue, rotating bending, endurance, life length.

# Table des matières

## Notations principales

<b>Introduction</b> .....	1
---------------------------	---

## Chapitre I

### Aperçu sur le phénomène de fatigue

I.1. Introduction .....	3
I.2. Fatigue et endurance .....	3
I.2.1. Définitions.....	3
I.2.2. Limite de fatigue.....	4
I.2.3. Limite d'endurance .....	4
I.2.4. Durée de vie.....	5
I.2.5. Contraintes appliquées.....	5
I.2.5.1. Contrainte nominale.....	5
I.2.5.2. Cycle de contrainte.....	5
I.2.5.3. Types de cycles de contrainte.....	6
I.3. Diagrammes représentatifs .....	6
I.3.1. Courbe de Wöhler.....	7
I.3.2. Courbes d'équiprobabilité de la rupture .....	8
I.3.3. Diagramme de Haigh.....	9
I.3.4. Diagramme de Goodman-Smith .....	11
I.3.5. Diagramme de Roš.....	11
I.3.6. Diagramme de Moore-Kommers-Jasper.....	12
I.4. Evolution physique et structurale.....	13
I. 4. 1. Evolution physique.....	13
I.4.1.1. Influence du niveau de contrainte.....	13
I.4.1.2. Influence du nombre de cycles.....	13
I.4.2. Evolution structurale.....	14
I.4.2.1. Modifications superficielles en cours de fatigue .....	14
I.4.2.2. Propagation des fissures.....	16

I.4.2.3. Modification interne.....	17
I.5. Fissuration par fatigue.....	17
I.5.1. Courbes de propagation des fissures.....	17
I.5.2. Expression de la vitesse de fissuration.....	18
I.5.3. Faciès des surfaces de rupture par fatigue.....	20
I.6. Facteurs d'influence.....	20
I.6.1. Facteurs métallurgiques.....	21
I.6.2. Facteurs géométriques.....	22
I.6.2.1. Influence de la dimension.....	22
I.6.2.2. Influence de l'entaille.....	22
I.6.3. Conditions de surfaces.....	23
I.6.3.1. Influence de la nature de la surface.....	23
I.6.3.2. Influence de la microgéométrie de la pièce.....	23
I.6.4. Conditions de sollicitation.....	24
I.6.4.1. Nature des efforts.....	24
I.6.4.2. Effet de surcharge et de sous charge.....	24
I.6.4.3. Influence des contraintes résiduelles.....	25
I.6.4.4. Influence de la fréquence.....	25
I.6.5. Influence de l'environnement.....	25
I.6.5.1. Influence de la température.....	25
I.6.5.2. Fatigue sous corrosion.....	26

## **Chapitre II**

### **Méthodes d'essai pour l'estimation de la limite d'endurance**

II.1. Introduction.....	27
II.2. Nature et aspect de la dispersion des résultats d'essais de fatigue.....	28
II.3. Méthodes d'estimation approchée.....	30
II.3.1. Méthode de reclassement des données .....	30
II.3.1.1. Principe .....	30
II.3.1.2. Condition d'exécution de la méthode.....	31
II.3.1.3. Valeur de la méthode.....	31

II.3.2. Méthode des K éprouvettes non-rompues.....	31
II.3.2.1. Condition d'exécution de la méthode.....	31
II.3.2.2. Validité de la méthode.....	32
II.4. Méthode d'estimation de la limite d'endurance à N cycles de précision moyenne ou de bonne qualité.....	33
II.4.1. Méthode des "Probits".....	33
II.4.1.1. Principe.....	33
II.4.1.2. Condition d'exécution de la méthode.....	33
II.4.1.3. Validité de la méthode.....	33
II.4.2. Méthode de l'escalier.....	34
II.4.2.1. Règle d'exécution de la méthode de l'escalier .....	34
II.4.2.2. Utilisation des résultats.....	35
II.4.2.3. Précision de $m$ et $s$ .....	37
II.4.2.4. Remarque sur l'application pratique de la méthode de l'escalier.....	38
II.4.3. Méthode d'itération.....	38
II.4.3.1. Principe.....	38
II.4.3.2. Condition d'exécution de la méthode.....	38
II.4.3.3. Validité de la méthode.....	39
II.5. Relations entre l'endurance et les caractéristiques mécaniques (cas des aciers).....	40
II.5.1. Estimation de $\sigma_D$ .....	40
II.6. Estimation de $s$ .....	41
II.7. Conclusion.....	41

## Chapitre III

### Choix de l'acier et dispositif d'essais

III.1. Domaine d'utilisation.....	43
III.2. Composition chimique de l'acier.....	43
III.2.1. Moyen de détection .....	43
III.2.2. Composition chimique .....	44
III.3. Caractéristiques mécaniques .....	44
III.3.1. Les essais de traction .....	44

III.3.2. Eprouvette .....	45
III.3.3. Résultats des essais .....	45
III.4. Machine d'essai de fatigue.....	48
III.4.1. Description de la machine .....	49
III.4.2. Instructions.....	50
III.5. Eprouvette d'essai.....	50
III.5.1. Forme.....	50
III.5.2. Dimensions.....	51
III.5.3. Usinage des éprouvettes.....	51
III.6. Contrainte maximale de flexion.....	52

## **Chapitre IV**

### **Résultats expérimentaux**

IV.1. Lot n° : 01.....	54
IV.2. Lot n° : 02.....	56
IV.3. Lot n° : 03.....	58
IV.4. Lot n° : 04.....	60
IV.5. Recherche de la durée de vie.....	62

## **Chapitre V**

### **Analyse probabiliste et fiabilité**

V.1. Fatigue et probabilités.....	65
V.1.1. Moyenne arithmétique.....	65
V.1.2. Ecart-type.....	65
V.1.3. Coefficient de variation.....	66
V.1.4. Nouveau concept de la courbe de Wöhler .....	66
V.1.5. Distribution statistique des variables aléatoires continues : contrainte et temps ....	67
V.1.6. Rappels succincts des caractéristiques d'une loi normale.....	67
V.1.6.1. Fonction densité de probabilité de la loi normale centrée réduite.....	67

V.1.6.2. Fonction de répartition.....	68
V.2. Tracé expérimental des courbes d'équiprobabilité.....	69
V.2.1. Notion de niveau de confiance.....	69
V.2.2. Conséquence de la prise en compte d'un niveau de confiance.....	70
V.3. Utilisation dans un contexte fiabiliste.....	73
V.3.1. Définition de la fiabilité.....	73
V.3.2. Fiabilité des courbes d'équiprobabilité de rupture.....	73
V.3.3. Utilisation des courbes d'équiprobabilité de rupture dans un concept fiabiliste.....	73
V.3.3.1. Fiabilité en temps pour un taux de travail donné.....	73
V.3.3.2. Fiabilité en taux de travail pour un temps donné.....	74
V.4. Exemple numérique.....	74
V.4.1. Calcul du nombre de cycles à rupture $N_R$ pour un effort et une probabilité de rupture donnée.....	74
V.4.2. Calcul de l'intervalle de confiance de la moyenne $m$ de la population.....	74
V.5. Analyse de défaillance .....	75
V.5.1. L'enquête préliminaire.....	76
V.5.2. Analyse morphologique de la pièce défaillante .....	76
V.5.3. Examen complémentaire en laboratoire.....	76
V.6. Etude micrographique et analyse morphologique.....	77

<b>Conclusion</b> .....	80
-------------------------	----

## Annexes

Annexe I.....	82
Annexe II.....	84
Annexe III.....	87
Annexe IV.....	88
Annexe V.....	98

<b>Bibliographie</b> .....	90
----------------------------	----

## Notations principales

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>
$E$	Module d'élasticité ou module d'Young
$\varepsilon$	Déformation
$F$	Force
$I$	Moment d'inertie
$K_f$	Facteur effectif de concentration de contrainte
$K_t$	Facteur théorique de concentration de contrainte
$M$	Moment de flexion
$\nu$	Coefficient de poisson
$N$	Nombre de cycles à rupture
$n$	Nombre de cycles
$q$	Facteur de sensibilité à l'entaille
$R_e$	Limite d'élasticité
$R_m$	Résistance à la traction
$R_\sigma$	Rapport de contrainte
$s$	Ecart-type empirique
$\sigma_{moy}$	Contrainte moyenne
$\sigma_a$	Amplitude de la contrainte alternée
$\sigma_{max}$	Contrainte maximale
$\sigma_{min}$	Contrainte minimale
$\sigma_D$	Limite de fatigue
$\sigma_{D(N)}$	Limite d'endurance à N cycles

## INTRODUCTION GENERALE

Toute pièce mécanique en fonctionnement normal est soumise à un certain nombre de sollicitations d'origines diverses, de valeurs maximales généralement connues mais variables dans le temps - modestes par rapport aux caractéristiques mécaniques du matériau utilisé. La répétition de ces efforts mène la pièce ou la structure à la rupture, ce qui est appelé phénomène de fatigue.

Le problème de la fatigue des structures est présent dans les domaines maritimes, aéronautiques, mécanique et bien d'autres encore. Les premières études systématiques de ce phénomène, furent effectuées en 1869 par l'ingénieur des chemins de fer bavarois A. Wöhler, dans le cadre de recherches sur la rupture des essieux de wagon. Il supposa que, comme dans un organisme vivant, la répétition de contraintes « fatiguait » le matériau en diminuant ses capacités de résistance. Cette idée ne correspond pas à la réalité physique, mais le terme est resté comme nom générique de ce phénomène. L'étude de la fatigue des matériaux fait l'objet, aujourd'hui encore, de nombreux travaux de recherche, pour les métaux essentiellement. Le problème physique de la fatigue est lié à la microgéométrie de la surface du matériau et à sa structure atomique même, et donc à sa composition chimique.

L'objet de cette étude est de déterminer le comportement des éprouvettes de métal (acier **XC48**) sous sollicitations de contraintes périodiques à amplitude constante, analogue à celles qui se produisent dans la pratique lors des sollicitations de service. Nous avons examiné plus particulièrement, les points suivants :

- la conformité du matériau aux normes de livraison, en faisant des essais mécaniques statiques et en déterminant sa composition chimique ;
- le comportement en fatigue de la nuance étudiée, en effectuant des essais dynamiques en flexion rotative par des méthodes différentes, afin de déterminer la limite d'endurance et son écart-type ;
- l'analyse statistique des résultats et le tracé des courbes de Wöhler probabilisées ;
- l'étude micrographique de quelques échantillons rompus.

Ce travail comporte cinq chapitres :

- le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique. Il rassemble les rappels de définitions, des diagrammes représentatifs de la fatigue, de l'endommagement par fatigue ainsi que les facteurs qui peuvent influencer sur l'endurance de la pièce ou de la structure ;
- le deuxième chapitre explique les méthodes d'essais utilisées pour l'estimation de la limite d'endurance et son écart-type avec quelques résultats expérimentaux bibliographiques ;
- le troisième chapitre parle de l'acier choisi pour cette étude, sa conformité aux normes de livraison, tels que sa composition chimique et ses caractéristiques mécaniques. Pour cela, des essais aux laboratoires ont été réalisés sur éprouvettes. Aussi, dans ce chapitre nous avons fait aussi une description du dispositif expérimental utilisé pour la réalisation de nos essais sur cette nuance d'acier ;
- le quatrième chapitre regroupe les résultats expérimentaux ;
- dans le dernier et cinquième chapitre, nous avons fait une analyse statistique des résultats obtenus et tracé les courbes de Wöhler probabilisées pour les utilisées dans un concept fiabiliste. Enfin nous avons fait une étude micrographique sur quelques faciès de rupture.

## CHAPITRE I

### APERÇU SUR LE PHENOMENE DE FATIGUE

#### I.1. Introduction

L'expérience industrielle montre que les ruptures de pièces de machines ou de structure en fonctionnement normal, sont le plus souvent dues à la fatigue. Celle-ci est particulièrement insidieuse du fait de son caractère progressif masqué. Ceci est d'autant plus grave que la fissuration par fatigue, conduit très souvent à une rupture brutale, provoquant un accident [1].

Afin de préciser les différents aspects de la fatigue des métaux, nous commencerons par étudier les résultats des essais effectués généralement sur des éprouvettes de petites dimensions, sollicitées dans des conditions simples, permettant de distinguer les différents domaines où la fatigue peut apparaître ou non. Nous décrirons ensuite les modifications des propriétés physiques et structurales qui accompagnent la répétition des cycles d'efforts et qui conduisent à la fissuration du métal. Enfin, nous énumérerons brièvement les principaux facteurs dont dépend l'endurance d'une pièce, qu'ils soient d'ordre métallurgique, géométrique, liés aux conditions de sollicitation, ou dépendants des conditions d'environnement [1].

#### I.2. Fatigue et endurance

##### I.2.1. Définitions

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux, consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces constituées avec ces matériaux [1].

Les contraintes seront définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle  $\sigma_{\max}$  par la valeur moyenne de la contrainte  $\sigma_m$  et par le rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximale  $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$  [1].

En générale, la fatigue se produit sans déformation plastique d'ensemble, mais avec une déformation plastique très localisée, d'abord autour des défauts à fond d'entaille ou en

surface, ensuite à l'extrémité de la fissure une fois que celle-ci s'est formée. Il en résulte que la mesure de cette déformation est extrêmement difficile.

Ainsi d'une façon très générale, il y aura fatigue toutes les fois que l'on est en présence d'efforts variables dans le temps. Ce qui est bien particulier à la fatigue et qui en fait le danger, c'est que la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles, souvent bien inférieures à la traction et même à la limite d'élasticité du métal, lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois [1].

### **I.2.2. 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 ou d'autres causes inhérentes à leur service même; on est donc conduit à utiliser une autre grandeur appelée limite d'endurance [2].

### **I.2.3. 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  $\sigma_D(N)$  [3].

Cette valeur peut être déterminée à l'aide de méthodes statistiques. Dans le cas des aciers, la censure est généralement de  $10^7$  cycles, mais on peut déterminer expérimentalement la limite d'endurance pour des censures différentes, suivant la nature du matériau ou de la pièce essayée. Ce sera par exemple  $10^7$  cycles pour un rail de chemin de fer,  $2 \cdot 10^6$  cycles pour une pièce soudée [2].

#### **I.2.4. 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 [1].

#### **I.2.5. 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 [2].

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

##### **I.2.5.1. 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 relative au domaine élastique. Elle ne fait pas intervenir la concentration de contrainte due à des entailles, ou à d'autres causes [2].

La contrainte calculée est exprimée en newton par millimètre carré ( $\text{N/mm}^2$ ) ou en pascal ( $1\text{Pa} = 1 \text{N/mm}^2$ ).

##### **I.2.5.2. Cycle de contrainte**

C'est la plus petite partie de la fonction contrainte-temps qui se répète périodiquement. Il existe plusieurs termes et symboles pour décrire le cycle de contrainte, parmi lesquels on peut citer [2] :

- la contrainte maximale ( $\sigma_{\max}$ ) : valeur maximale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte ;
- la contrainte minimale ( $\sigma_{\min}$ ) : valeur minimale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte ;
- la contrainte moyenne ( $\sigma_m$ ) qui est définie par la valeur algébrique :  $\sigma_m = \frac{\sigma_{\min} + \sigma_{\max}}{2}$  ;
- l'amplitude de contrainte ( $\sigma_a$ ), appelée aussi contrainte alternée, définie par la valeur algébrique :  $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$  ;
- le rapport de contrainte ( $R_\sigma$ ), définie par le rapport algébrique :  $R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$  ;
- l'étendue de variation de la contrainte ( $2\sigma_a$ ) qui est la différence algébrique entre la contrainte maximale et la contrainte minimale du cycle de contrainte :  
 $2\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ .

### I.2.5.3. Types de cycles de contraintes

- contrainte purement alternée : contrainte qui varie entre des valeurs égales, dans le sens positif et négatif [2] ;
- contrainte alternée : contrainte qui évolue entre une valeur maximale positive et une valeur minimale négative dont les valeurs absolues sont différentes ( $0 < \sigma_m < \sigma_a$ ) ;
- contrainte répétée : contrainte qui varie entre la valeur 0 et une valeur maximale positive, ou entre 0 et une valeur minimale négative ( $\sigma_m = \sigma_a$ ) ;
- contrainte ondulée : contrainte qui varie entre les valeurs maximale et minimale qui sont de même signe ( $\sigma_m > \sigma_a$ ).

### I.3. Diagrammes représentatifs

Pour présenter de manière facilement utilisable les résultats d'essais de fatigue, il existe un assez grand nombre de méthodes ou arrangement possibles, des paramètres utilisés en fatigue :

- temps : sous la forme d'un nombre de cycles N [2] ;
- contraintes :
  - statiques ( $R_e, R_m$ ) ;
  - dynamiques ( $\sigma_m, \sigma_a, \sigma_{\max}, \sigma_{\min}, \sigma_D$ ) ;

Parmi toutes les méthodes existantes, nous développerons les plus utilisées et les plus riches en renseignements [2].

### I.3.1. Courbe de Wöhler

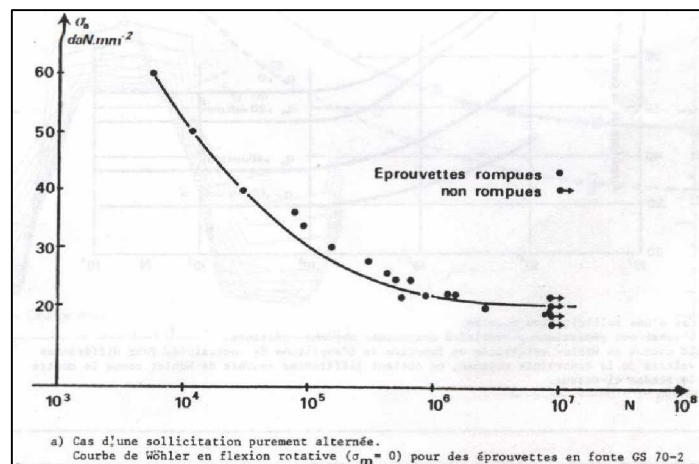
Cette courbe est appelée courbe SN (Stress-number of cycles) dans les pays anglo-saxons.

Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule qui permette de visualiser la tenue de la pièce où des matériaux dans tout le domaine de la fatigue.

Chaque pièce est soumise à des cycles d'efforts périodiques,  $N_R$  est le nombre de cycles au bout duquel la rupture se produit. Pour plus de commodité, ce nombre  $N_R$  est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique et la contrainte est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire [2].

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 (T, 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.1.



**Figure I.1.** Exemple de courbe de Wöhler [2]

Dans le cas des aciers, la courbe de Wöhler présente en général une asymptote horizontale correspondant à une contrainte dont la valeur est, par définition, la limite de fatigue.

En revanche, pour certains alliages d'aluminium, de cuivre, ou titane et dans le cas d'essais de fatigue sous corrosion, la courbe de Wöhler ne prend pas d'asymptote pour les grands nombres de cycles et il n'est pas sûr que la limite de fatigue existe.

Une courbe de Wöhler comprend trois domaines [2] :

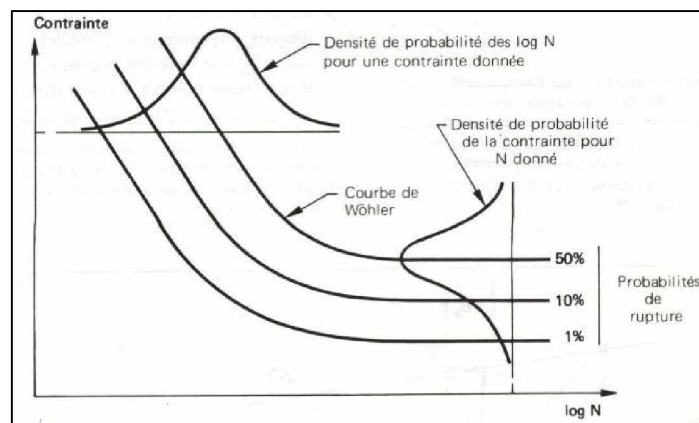
- le domaine de la fatigue oligocyclique où les ruptures, précédées d'une déformation plastique globale notable, surviennent après un petit nombre de cycles ( $N_R \leq 10^5$ ) ;
- le domaine d'endurance limitée ( $N_R \geq 10^5$  cycles) où les ruptures surviennent systématiquement après un nombre limité de cycles croissant, avec la décroissance de la contrainte.

Entre ces deux derniers domaines, la courbe de Wöhler présente un coude plus ou moins prononcé, compris entre  $10^6$  et  $10^7$  cycles. Pour certains alliages d'aluminium, ce coude est beaucoup moins net.

### I.3.2. Courbes 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 [3].

Les courbes d'équiprobabilité de rupture, dont la courbe de Wöhler constitue un cas particulier ( $p = 50\%$  de rupture), sont alors tracées en soustrayant à la valeur moyenne une certaine valeur, fonction de la probabilité de rupture recherchée, du nombre d'essais et du niveau de confiance accordé (figure I.2).



**Figure I.2.** Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques) [3]

### I.3.3. Diagramme de Haigh

Sur ce diagramme, l'amplitude de contrainte  $\sigma_a$  est portée en fonction de la contrainte moyenne à laquelle a été réalisé l'essai de fatigue (figure I.3) [2].

Deux points particuliers sont à considérer :

- le point A, qui représente la limite d'endurance  $\sigma_D$  en sollicitation purement alternée ( $\sigma_D = OA$ ) ;
- le point B, qui représente le comportement limite du matériau pour une contrainte alternée nulle. Ce point correspond donc, à la contrainte de rupture du matériau au cours d'un essai statique.

L'ensemble des limites d'endurance observées pour diverses valeurs de la contrainte moyenne, se placent alors sur une courbe AB ajustée en fonction des résultats d'essais. Le domaine limité par cette courbe AB et les deux axes de coordonnées, représentent le domaine de fonctionnement autorisé avec le matériau pour avoir une durée de vie supérieure ou égale aux nombres de cycles pour lequel a été déterminée la limite d'endurance [2].

Sur ce diagramme on utilise parfois des « rayons » qui représentent le rapport entre  $\sigma_a$  et  $\sigma_m$ . Ces rayons sont alors paramétrés en fonction des valeurs que prennent ce rapport.

Le diagramme de Haigh peut être ensuite limité par la droite représentant la limite d'élasticité du matériau.

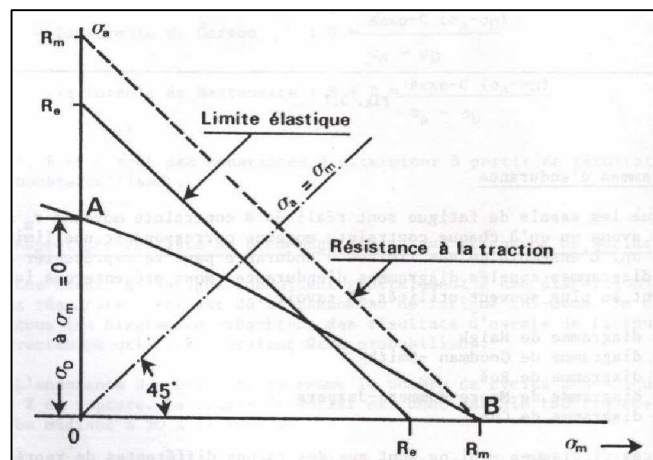


Figure I.3. Diagramme de Haigh [2]

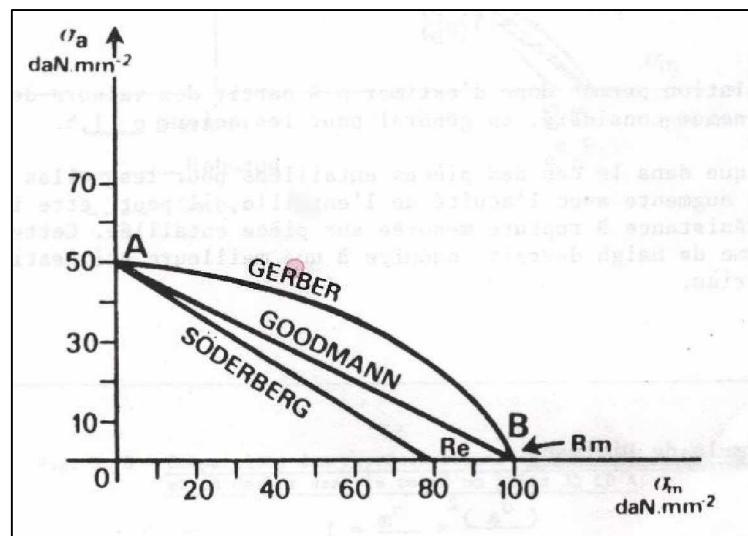
Plusieurs représentations de la courbe AB ont été proposées et qui permettent de construire un diagramme d'endurance approché, lorsqu'on ne connaît que la limite d'endurance en sollicitation purement alternée et les caractéristiques mécaniques statistiques ( $R_e$ ,  $R_m$ ) du matériau.

- Droite de Goodman :  $\sigma_a = \sigma_b \left( 1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \right)$ .

- Droite de Söderberg :  $\sigma_a = \sigma_b \left( 1 - \frac{\sigma_m}{R_e} \right)$ .

- Parabole de Gerber :  $\sigma_a = \sigma_b \left( 1 - \left( \frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 \right)$ .

La figure 1.4 montre que les droites de Goodman et Söderberg, pénalisent fortement la tenue en fatigue par rapport à la formule parabolique de Gerber. Cette dernière relation est intéressante dans le domaine  $\sigma_m > 0$ .



**Figure I.4.** Différentes représentations de la courbe AB [2]

D'autres relations paraboliques  $f(\sigma_a, \sigma_m)$  ont été proposées pour tenir compte de l'amélioration de la fatigue dans le domaine des compressions, telles que les relations de Bahuaud ou de Dietmann.

### I.3.4. Diagramme de Goodman-Smith

Sur ce diagramme les contraintes maximales  $\sigma_{\max}$  et minimales  $\sigma_{\min}$  sont représentés en fonction de la contrainte moyenne  $\sigma_m$  (figure I.5) [2].

Les points particuliers A et B précités, se retrouvent ainsi que les différentes formes de courbes pouvant les relier (droite de Goodman, parabole de Gerber ou toute autre courbe représentative d'une fonction ajustée aux résultats d'essais).

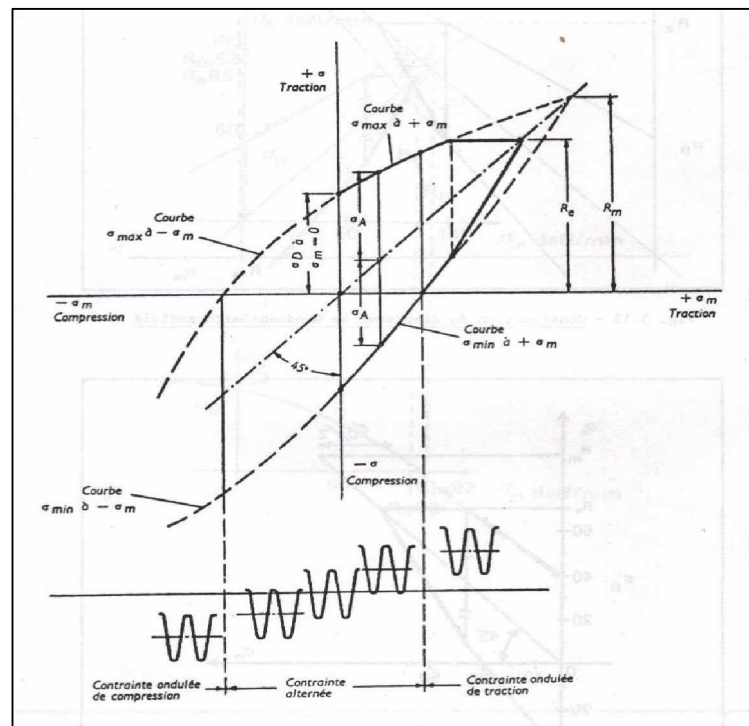


Figure I.5. Diagramme de Goodman-Smith (résultats théoriques) [2]

### I.3.5. Diagramme de Roß

Essentiellement utilisé dans les pays anglo-saxons, ce diagramme représente la contrainte maximale  $\sigma_{\max}$  en fonction de la contrainte minimale  $\sigma_{\min}$  (figure I.6). En plus des deux points particuliers A et B précités, il apparaît un autre point particulier C pour lequel  $\sigma_{\min} = 0$  [2].

Un certain nombre de valeurs particulières du rapport des contraintes  $R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$

( $R_\sigma = -\frac{1}{2}$  et  $R_\sigma = +\frac{1}{2}$ ) sont souvent indiquées sur ce diagramme.

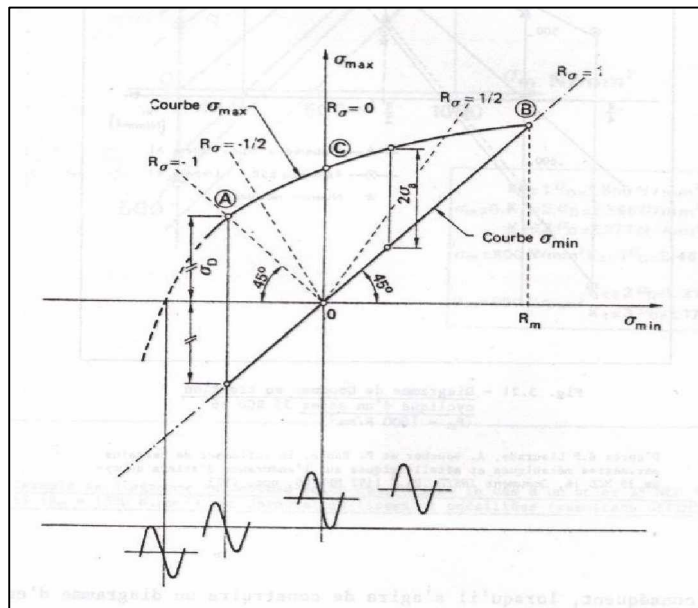


Figure I.6. Diagramme de Roš (résultats théoriques) [2]

### I.3.6. Diagramme de Moore-Kommers-Jasper

Ce diagramme représente la contrainte maximale  $\sigma_{\max}$  en fonction du rapport des contraintes  $R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$  (figure I.7).

Ce diagramme présente un grand intérêt pour la détermination de  $\sigma_{\max}$  lorsqu'on ne connaît pas la contrainte moyenne  $\sigma_m$  [2].

Il est construit à partir des points particuliers A, B et C précités.

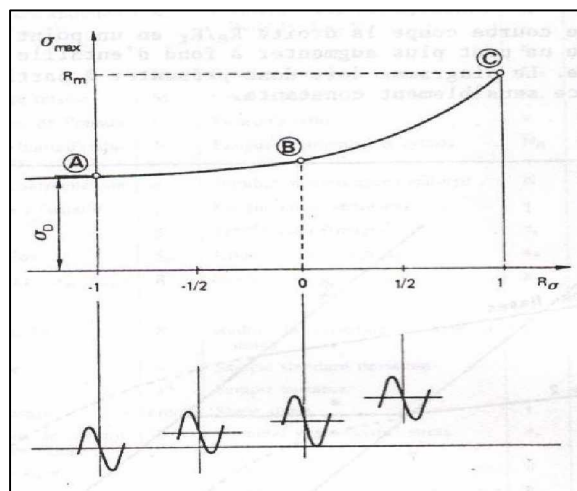


Figure I.7. Diagramme de Moore-Kommers et Jasper [2]

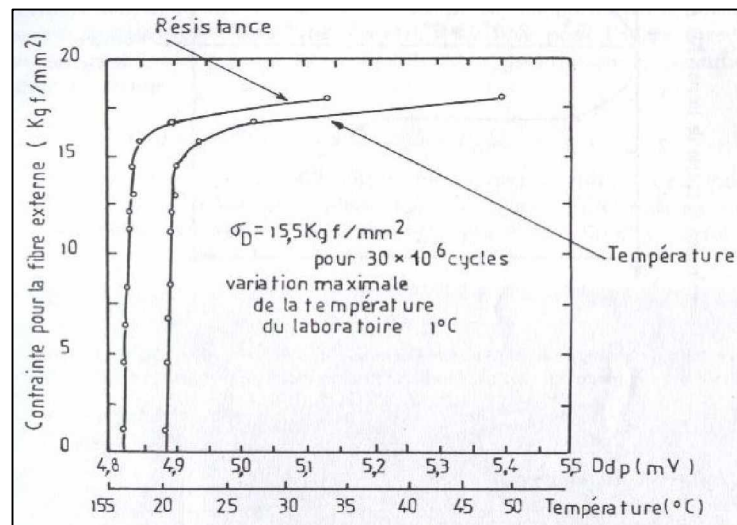
## I.4. Evolution physique et structurale

### I. 4. 1. Evolution physique

De nombreuses études sur la variation des propriétés physiques des métaux en cours de fatigue ont été faites : résistance électrique, perméabilité électrique, hystérésis mécanique, capacité d'amortissement, module d'élasticité, température, coefficient de dilatation, etc. Pratiquement, comme il s'agit de mesure globale [4] intéressant toute l'éprouvette, les résultats sont comparables.

#### I.4.1.1. Influence du niveau de contrainte

La figure I.8 montre l'évolution de la résistance électrique et de la température d'une éprouvette d'acier extra doux, essayée sous charge croissante. Au-dessus d'une certaine contrainte, qui correspond à la limite de fatigue de la courbe de Wöhler, il y a variation rapide des deux paramètres, qui se poursuit jusqu'à rupture de l'éprouvette.

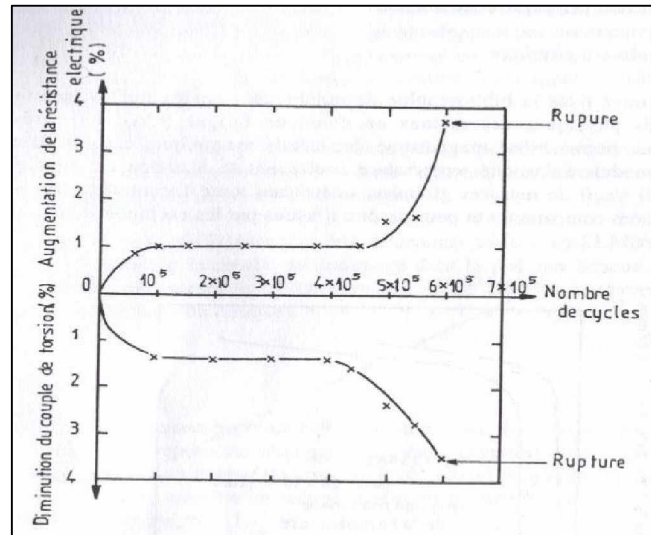


**Figure I.8.** Variation de la résistance électrique et la température d'une éprouvette, mesurées au cours d'un essai de flexion relative, sous charge croissante, d'un acier doux [1]

#### I.4.1.2. Influence du nombre de cycles

La figure I.9 montre l'évolution de la résistance électrique et couple de torsion d'une éprouvette essayée en torsion alternée, à une contrainte supérieure à la limite de fatigue. Ces deux propriétés varient très rapidement au début de l'essai ; elles passent ensuite par une

phase stationnaire, puis elles évoluent à nouveau très rapidement jusqu'à la rupture de l'éprouvette. De façon plus générale, selon la propriété physique que l'on mesure, la phase intermédiaire peut être stationnaire, comme sur la fatigue 1.9 ou évolutive, et ceci dans un sens ou dans l'autre. De plus, lorsque la contrainte augmente, l'étendue de cette phase diminue et elle tend à n'être qu'une simple transition entre les deux stades extrêmes.



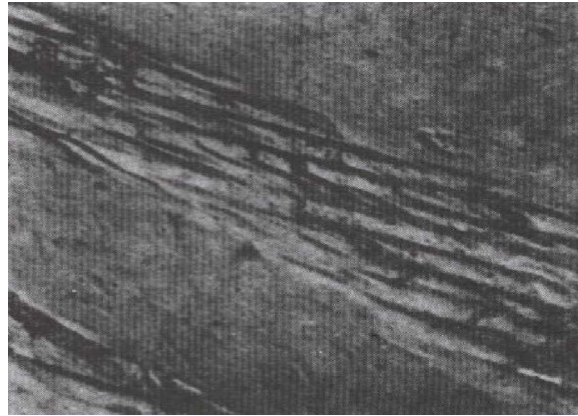
**Figure I.9.** Variation de la résistance électrique de l'éprouvette du couple de torsion exercé sur une éprouvette entaillée au cours d'un essai de fatigue en torsion alternée [1]

## I.4.2. Evolution structurale

Les possibilités de la microscopie électronique ont permis de faire des progrès considérables dans la connaissance des phénomènes liés à la fatigue des métaux. Ce fut d'abord la possibilité d'observer, par microfractographie électronique, sur réplique, les surfaces de rupture [1]. Puis, l'examen au microscope électronique par transmission de lames minces a permis de suivre l'arrangement des dislocations dans le métal. Enfin, l'apparition du microscope électronique à balayage, a offert de nouvelles facilités pour l'étude directe des surfaces, en particulier grâce à ses possibilités de grossissement continu et sa profondeur de champ.

### I.4.2.1. Modifications superficielles en cours de fatigue

Dès les premiers cycles de déformation, on observe au microscope optique la formation superficielles de bandes de glissement (figure 1.10). Cet aspect est assez général, quelque soit le métal, et ne se distingue guère de celui d'une déformation unidirectionnelle à son début.



**Figure I.10.** *Microscopie électronique de la surface d'une éprouvette d'acier doux après 125000 cycle de flexion alternée montrant la présence de nombreux glissements déviés dans la bande de déformation (X 16000) [1]*

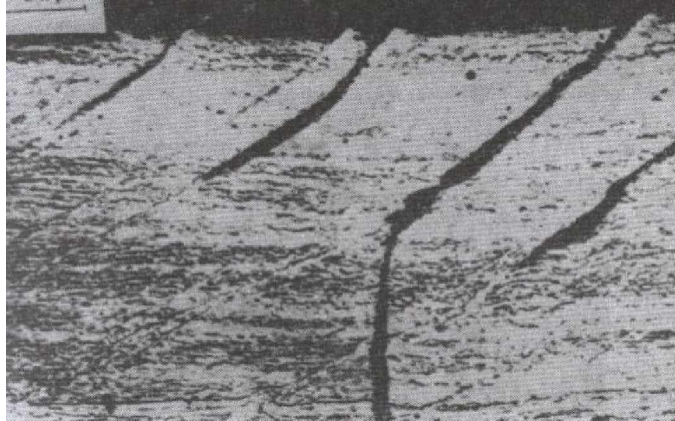
Les différences apparaissent si on poursuit la déformation par fatigue : on observe bien une certaine multiplication des bandes de glissement mais surtout leur renforcement et l'application de bandes persistantes, c'est-à-dire qui ne disparaissent pas par simple polissage ou par recuit.

Ces bandes persistantes sont caractéristiques de la fatigue et leur rôle est essentiel dans l'endommagement des métaux. En effet, au début de la déformation, les bandes de glissement qui sont apparues peuvent être limitées par polissage électrolytique ou par recuit pour augmenter la durée de vie de l'éprouvette par rapport à celle d'une éprouvette non traitée. Par contre, lorsque les bandes persistent après polissage ou recuit, il n'est plus possible d'augmenter ainsi la durée de vie de l'éprouvette (endommagement irréversible).

En pratique, toutes les pièces soumises à la fatigue contiennent des défauts, irrégularités de surface ou inclusion, qui provoquent des concentrations locales de contraintes, conduisant à la formation de microfissures. Le microrelief laissé par l'usinage des pièces, donne initialement des perturbations de la surface. La présence d'inclusions sous-cutanées, conduit à une concentration de contrainte locale très élevée qui peut amener la rupture rapide de la couche de métal entre l'inclusion et la surface formant une microfissure particulièrement dangereuse.

#### I.4.2.2. Propagation des fissures

On constate que, dans un premier stade (stade I), les microfissures formées, soit dans le prolongement d'une intrusion, soit dans le « creux », le long d'une ligne de glissement, selon le matériau, progressent en restant dans le plan de glissement initial où elle sont apparues (figure I.11).



**Figure I.11.** Coupe micrographique montrant les deux stades de propagation des fissures de fatigue initiées à la surface d'une éprouvette d'aluminium pur, écroui [1]

A une certaine profondeur, qui dépend surtout de la dimension des grains, on observe un changement de direction et lors du franchissement des joints, les fissures quittent le plan de la scission maximale pour le plan de la contrainte normale de tension maximale (stade II). Ceci est la conséquence du changement de régime des contraintes, car le rapport des contraintes de cisaillement aux contraintes de traction, diminue progressivement de la périphérie vers le centre, par suite de la présence de contraintes résiduelles superficielles. En effet, un faible niveau de contrainte favorise le développement du stade I, tandis que l'élévation de la contrainte moyenne favorise le stade II.

Le stade I qui est le stade de croissance de la fissure, s'étend au plus à travers quelques grains sous la surface et la vitesse de croissance correspondante est relativement faible (quelques Å par cycle), alors qu'elle peut atteindre  $1\mu\text{m}$  par cycle dans le stade II.

### **I.4.2.3. Modification interne [1]**

Si on observe en microscopie électronique par transmission, des lames minces prélevées dans des échantillons soumis à des sollicitations périodiques, on constate dès les premiers cycles une modification de la disposition des dislocations. On voit se former des amas de dislocations, constitués de dipôles et de multipôles de dislocations, comme cela se produit par déformation unidirectionnelle.

Pour des contraintes maximales peu élevées, on observe une disposition planaire de dislocations-coins alignées dans les plans de glissement. Si l'amplitude de la contrainte reste faible, de l'ordre de la limite d'endurance, cette disposition n'évolue pratiquement plus au cours des cycles ultérieurs - si ce n'est par la formation de boucles. Cette répartition assez homogène des dislocations dans le métal ne peut pas conduire, sinon très exceptionnellement, à la formation de microfissures.

Pour des contraintes plus élevées, il y a multiplication des dislocations au cours des premières dizaines de cycles. Simultanément, il y a rassemblement des dislocations en parois, formant des cellules plus ou moins bien dessinées.

Si l'on poursuit la déformation cyclique, les mouvements de va-et-vient conduisent à la formation de fragments de dislocation (petites boucles prismatiques, dipôles, etc.), qui se rassemblent dans les parois des cellules.

Pour les contraintes plus élevées, il y a formation de véritables cellules, beaucoup plus régulières que celles que l'on peut obtenir par déformation unidirectionnelle. Leur dimension décroît lorsque la contrainte augmente.

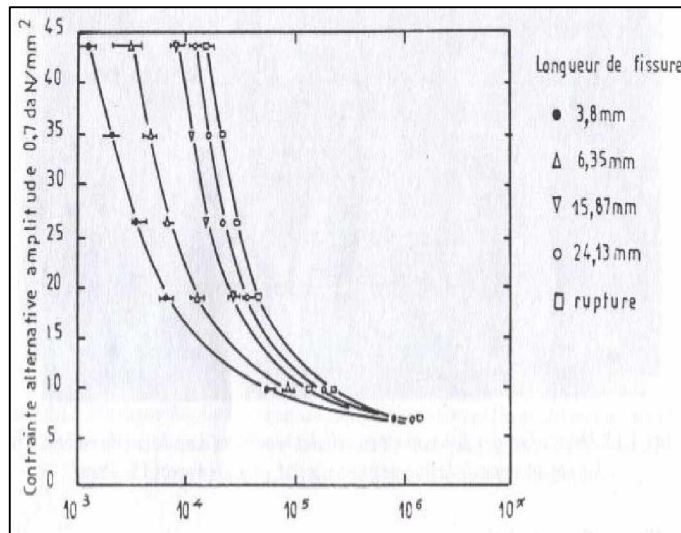
## **I.5. Fissuration par fatigue**

### **I.5.1. Courbes de propagation des fissures**

L'interprétation de la courbe de dommage, repose sur l'existence d'une taille critique de la fissure, qui dépend de la contrainte maximale des cycles [1], et au dessus de laquelle leur propagation serait irréversible (endommagement) et conduirait à la rupture. On a donc cherché à suivre la progression des fissures au cours de la fatigue.

On peut reporter les longueurs mesurées en fonction du nombre de cycle sous les différents niveaux de fissure (figure I.12). Ces courbes indiquent que l'importance relative des différentes étapes, amorçage et propagation, dépend de la contrainte maximale.

On peut également reporter la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle et tracer la courbe de fissuration de l'éprouvette ou de la pièce considérée, soumise à la contrainte périodique maximale  $\sigma$ .



**Figure I.12.** Courbe de fissuration donnant la longueur de la fissure selon le nombre de cycles et le niveau de contrainte [1]

Les différents stades observés correspondent à :

- un stade de croissance rapide des fissures, qui atteignent des longueurs de l'ordre de quelques microns en surface après quelques millions de cycles ;
- un stade de progression plus lente de la fissure en surface, dont la durée dépend de l'amplitude de la contrainte ;
- un stade de progression rapide, qui précède de peu la rupture finale brutale.

### 1.5.2. Expression de la vitesse de fissuration

A partir de la mesure des longueurs de fissures observées sur des éprouvettes en cours de fatigue, différentes formules ont été proposées pour la vitesse de propagation. Si  $a$  est la

longueur de la fissure,  $N$  le nombre de cycle et  $\sigma$  la contrainte maximale des cycles, on peut citer, chronologiquement :

1) Formule de Frost et Dugdale

$$\frac{da}{dN} = A\sigma^3$$

Où :  $A$  est une contrainte qui dépend du matériau et de la contrainte moyenne.

Cette formule est valable pour les fissures petites par rapport aux dimensions de l'éprouvette.

2) Formule de McEvelly et Illg :

$$\frac{da}{dN} = f(K_t, \sigma_n)$$

Où :  $K_t$  est le facteur de concentration de contrainte élastique théorique de Neuber et  $\sigma_n$  la contrainte normale dans la section fissurée.

3) Dans le domaine de la fatigue plastique oligocyclique, Boettner, Laird et McEvily ont proposée la formule :

$$\frac{da}{dN} = A(\varepsilon_t \sqrt{a})^n$$

Où :  $A$  est une contrainte,  $\varepsilon_t$  la déformation plastique totale par cycle et  $n$  a été trouvé voisin de 2 quelque soit le matériau.

4) La mécanique de la rupture permet d'étudier quantitativement les stades de propagation lente et de propagation brutale des fissures de fatigue mentionnées à l'occasion des courbes de fissuration. On a pu, en particulier, traiter de cette façon de nombreux cas pratiques où l'on a observé des fissurations préexistantes dans une structure.

Expérimentalement, de nombreux auteurs ont trouvé que la vitesse de fissuration pouvait s'écrire selon la relation de Paris :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Où :  $\Delta K$  est l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte  $K$  et  $C$  et  $m$  des constantes qui dépendent du matériau.

### I.5.3. Faciès des surfaces de rupture par fatigue

L'examen à l'œil ou à la loupe binoculaire, d'une cassure de fatigue montre l'existence de deux zones d'importance variable selon l'amplitude des contraintes, la zone de rupture par fatigue, lisse, soyeuse et la zone de rupture finale brutale, à relief marqué. Sur la première, on peut voir des lignes d'arrêt dont la courbure permet de remonter au point d'amorçage, ou foyer de la cassure [5].

Ces lignes d'arrêt démontrent le caractère progressif de la fissuration. Elles correspondent, le plus souvent, aux arrêts de fonctionnement de la machine dont fait partie la pièce considérée. C'est pourquoi, sur la cassure d'une éprouvette essayée sans interruption jusqu'à rupture, comme c'est généralement le cas des essais de laboratoire, ces lignes n'apparaissent pas.

A très fort grossissement (microfractographie électrique), on observe également un faciès caractéristique, formé de stries parallèles. Mais cette fois, aussi bien sur les pièces rompues en service que sur les éprouvettes d'essai. Ces stries peuvent être très sinueuses comme dans le cas du fer (CC) et des aciers doux, où elles sont festonnées par la présence d'alignements d'inclusions ou de carbures. Elles peuvent également être très rectilignes, par exemple dans les métaux CFC (figure I.13).

### I.6. Facteurs d'influence

On peut, soit par l'analyse de résultats bibliographiques, soit (et c'est préférable) à partir d'essais dynamiques réels, connaître la limite d'endurance d'un matériau dans des conditions bien précises (forme de l'éprouvette ou de la pièce, condition d'essai...). Mais au stade de fabrication ou en cours d'utilisation, d'autres facteurs vont intervenir qui, finalement, auront une influence primordiale, bénéfique ou néfaste, sur la tenue en service du produit fini [3].



**Figure 1.13.** *Stries observées sur la surface de rupture d'une éprouvette de nickel technique rompue par fatigue après 212000 cycles (X 10000) [1]*

Ces facteurs sont très nombreux et on peut les ranger dans les catégories qui se suivent :

#### **1.6.1. Facteurs 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) subit par la pièce.

C'est de ces facteurs que vont dépendre, d'une part, les possibilités de déformation sous efforts cycliques, ainsi que la possibilité d'accommodation du métal et sa sensibilité à l'effet d'entaille. Celles-ci peuvent être liée, en première approximation, aux caractéristiques mécaniques, tandis que la présence de défauts internes (inclusion), introduit des possibilités de concentrations locales de contraintes qui vont diminuer l'endurance de la pièce.

Les observations faites sur les pièces rompues par fatigue, montrent que les inclusions, lorsqu'elles sont assez grosses, sont toujours à l'origine des fissures. De plus celles-ci cheminent au sein du métal d'une inclusion à une autre, mettant ainsi en évidence leur rôle lors de la propagation de ces fissures. Plus généralement, la résistance à la fatigue dépend de la qualité, de la taille, la nature de la répartition des inclusions, ainsi que de leur forme par rapport à la direction des efforts.

L'influence des inclusions est attribuée à la concentration locale de contrainte qu'elles provoquent, par leur manque de plasticité et qui peut conduire à la formation de microfissures. En conséquence, les métaux doivent être d'autant plus propres que l'on cherche une résistance et une endurance plus élevées.

### **I.6.2. Facteurs géométriques**

L'influence de ces facteurs intervient par la dimension des pièces (effet d'échelle) et surtout par leur forme (effet d'entaille).

#### **I.6.2.1. Influence de la dimension**

On constate, toujours expérimentalement que, toutes choses égales par ailleurs, la limite d'endurance est d'autant plus basse que l'éprouvette utilisée est de grandes dimensions. Par convention, on appelle  $K_e$  la valeur du rapport de l'endurance d'une éprouvette cylindrique de diamètre  $d$  à l'endurance d'une éprouvette de diamètre avoisinant de 6mm (diamètre des éprouvettes d'essai le plus fréquemment utilisées) [3].

#### **I.6.2.2. Influence de l'entaille**

On peut déterminer à priori, dans un certain nombre de cas, le coefficient de concentration de contrainte théorique élastique  $k_t$  correspondant à une de ces formes, lorsqu'elles figurent dans les tables calculées pour les différents mode de sollicitations, mais pour des déformations élastiques. On peut aussi le déterminer expérimentalement par des méthodes d'extensométrie (photoélasticité, jauges à résistance...).

Il faut ensuite connaître la sensibilité à l'effet d'entaille du matériau considéré, que l'on représente par :  $q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1}$

où le coefficient expérimental  $K_f$  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. Il en résulte qu'une augmentation de résistance statique [1] n'entraîne pas nécessairement une augmentation de résistance à la fatigue en présence d'entaille.

### **I.6.3. Conditions de surfaces**

Toujours de façon expérimentale [3], on constate que, l'état de surface (caractérisé par sa rugosité) à une influence importante sur la limite d'endurance : une éprouvette présentant un état de surface fin est plus endurante que la même éprouvette avec un état de surface grossier.

Les fissures de fatigue prennent le plus souvent naissance dans les couches superficielles [1]. Il convient donc, pour améliorer l'endurance des pièces, de relever dans la mesure du possible, celles des couches superficielles ; on peut y arriver en jouant soit sur la nature du métal, soit sur la résistance des couches superficielles, par des traitements de durcissement et le développement de précontraintes de signe défavorable.

#### **I.6.3.1. Influence de la nature de la surface**

En premier lieu, il convient de s'opposer à un adoucissement de la surface des pièces par rapport au métal du cœur. Dans le cas des aciers, cet adoucissement est le plus souvent, la conséquence d'une décarburation, se produisant lors d'un traitement thermique effectué en atmosphère oxydante. Il en résulte une baisse de l'endurance de la couche superficielle, dont la limite est alors celle d'un acier à bas carbone. Cet abaissement permettra la formation de fissures qui se propageront dans toute la pièce pour des contraintes inférieures à la limite d'endurance du métal non décarburé, non entaillé.

En second lieu, on peut élever la résistance des couches superficielles, donc leur endurance, par exemple par une cimentation.

De façon plus générale, tous les procédés de durcissement superficiels sont utilisables pour améliorer l'endurance des pièces, mais leur action est inséparable de celles des précontraintes développées dans les pièces, par ces procédés.

#### **I.6.3.2. Influence de la microgéométrie de la pièce**

Les irrégularités de surface se comportent comme des micro-entailles qui provoquent des concentrations de contraintes dans les couches superficielles les plus chargées. L'expérience a montré que ces concentrations peuvent atteindre un niveau suffisant pour amorcer la fissuration par fatigue et diminuer sensiblement la durée de vie de la pièce.

En pratique, on ne peut pas réparer le degré de fini obtenu du procédé d'usinage employé, donc des contraintes résiduelles laissées dans le métal par ces divers procédés. On peut cependant dire que plus la microgéométrie de la surface est fine, meilleure est l'endurance. Il faut cependant tendre vers le meilleur état de fini tout en ne créant pas des contraintes résiduelles défavorables.

En général, le polissage mécanique est plus favorable que le polissage électrolytique qui donne un meilleur état de surface mais pas de précontrainte favorable et qui laisse par fois des microfissures.

#### **I.6.4. Conditions de sollicitation**

##### **I.6.4.1. Nature des efforts**

Pour une même éprouvette, essayée sous une même amplitude de la contrainte périodique, à la même fréquence et à la même température, la répartition et, par suite, les gradients des contraintes à travers la section la plus chargée, seront différents selon la nature des efforts appliqués. Pour des efforts axiaux, traction ou compression, les contraintes sont uniformes dans la section, tandis qu'en flexion ou en torsion elles sont maximales en surface et nulles au centre sur la fibre neutre [4]. Ces différences de gradient, qui entraînent des variations importantes dans le volume de métal déformé, conduisent à des différences de limite d'endurance  $\sigma_D$  qui décroît de la flexion (plane ou rotative) à la traction-compression puis à la torsion.

##### **I.6.4.2. Effet de surcharge et de 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 [1], 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 (10 à 20 %).

#### **I.6.4.3. Influence des contraintes résiduelles**

Aux contraintes appliquées se superpose l'effet des contraintes résiduelles, qu'elles soient à l'échelle microscopique, par exemple entre grains voisins, ou à l'échelle macroscopique de la pièce, par suite des usinages ou des traitements thermiques.

Toute contrainte résiduelle stable ayant un sens opposé à la contrainte de travail aura une influence bénéfique sur la limite d'endurance. Dans le cas où cette contrainte résiduelle peut être quantifiée, sa valeur sera donc ajoutée algébriquement à la contrainte moyenne  $\sigma_m$  de travail correspondante si elle sont dans le même plan, et géométriquement si elles sont dans des plans différents, (traction et flexion/torsion). Dans le cas où elle ne peut être estimée, mais où il existe de bonnes raisons de croire qu'elle se soustrait à la contrainte de travail, sa non prise en compte ira dans le sens de la sécurité [3].

#### **I.6.4.4. Influence de la fréquence**

Par suite de l'existence de frottement intérieur, il y a retard de la déformation sur la contrainte. Dans le cas de contraintes périodiques, on voit apparaître alors un cycle d'hystérésis de la déformation en fonction de la contrainte dont l'inclinaison varie avec la fréquence des cycles. Si cette fréquence augmente, la déformation plastique maximale atteinte par une même amplitude de contrainte diminue et, par suite, l'endurance se trouve augmentée, tout au moins tant que cette augmentation de fréquence n'entraîne pas un échauffement de l'éprouvette. Inversement [4], si la fréquence diminue, il en sera de même de l'endurance, principalement à cause de l'environnement.

### **I.6.5. Influence de l'environnement**

#### **I.6.5.1. Influence de la température**

La limite d'élasticité et la résistance à la traction diminuant lorsque la température s'élève, il en sera de même de la limite d'endurance qui leur est proportionnelle ; par contre,

l'augmentation des possibilités d'écoulement avec l'élévation de température diminue la sensibilité à l'effet d'entaille. Ceci tant que n'apparaissent pas des phénomènes durcissant au cours même de l'essai de fatigue (comme le vieillissement dynamique sous contrainte) qui, alors, élèvent les caractéristiques mécaniques, pour calculer l'effet de l'élévation de température sur la limite d'endurance, à partir des courbes de variation de résistance à la traction ou de dureté à chaud, il est nécessaire de tenir compte des vitesses de déformation dont dépendent la position et l'amplitude des phénomènes durcissant qui peuvent se produire.

### **I.6.5.2. Fatigue sous corrosion**

Lorsqu'une pièce est soumise à un environnement agressif, son comportement en fatigue est modifié. L'action du milieu intervient sur le temps d'amorçage d'une fissure et sur la vitesse de propagation de celle-ci [6].

La réduction du temps d'amorçage est liée soit aux piqûres de corrosion, soit à la dissolution des couches métalliques de surface. Dans ce dernier cas, les différents mécanismes possibles sont les suivants :

- réduction de l'énergie de surface favorisant la formation des marches de glissement,
- dissolution des obstacles de surface aux empilements de dislocations,
- attaque électrochimique des régions déformées plastiquement,
- attaque électrochimique jusqu'à rupture d'un film protecteur en surface.

Un environnement gazeux peut avoir également une influence importante sur la limite d'endurance, c'est le cas en particulier de l'acier dans l'air humide. On attribue généralement ce phénomène à une fragilisation par l'hydrogène produit par la dissociation de la vapeur d'eau près des sites d'amorçage.

Signalant seulement que, pour supprimer la fissuration en milieu corrosif, de nombreux moyens ont été essayés ; par exemple, l'emploi d'un acier inattaquable dans le milieu considéré, l'exécution d'un revêtement protecteur, une modification de la composition superficielle (phosphatation, nitruration, cémentation), l'usage des inhibiteurs de corrosion, le développement de précontraintes superficielles de compression (grenailage), etc.

## CHAPITRE II

### METHODES D'ESSAI POUR L'ESTIMATION DE LA LIMITE D'ENDURANCE

#### II.1. Introduction

La dispersion des résultats des essais de fatigue est acceptée aujourd'hui, à la fois comme un fait d'expérience et comme un fait physique. Attribuée autrefois, selon un mode de pensée déterministe, aux seules imperfections des conditions d'essai et supposée, par voie de conséquence, réductible, on la considère maintenant comme un des aspects physiques du phénomène. De plus, d'un point de vue pratique, il est souvent impossible ou trop coûteux de supprimer totalement certaines causes d'erreurs expérimentales même si, en théorie, elles peuvent l'être. L'action simultanée de ces deux sortes de causes se traduit alors par une dispersion des résultats d'essais dont l'ordre de grandeur est rarement négligeable par rapport aux quantités à mesurer mais, au contraire, le plus souvent important et quelquefois, considérable.

La figure II.1 donne un exemple de la dispersion observée au cours d'essais sur éprouvettes en acier.

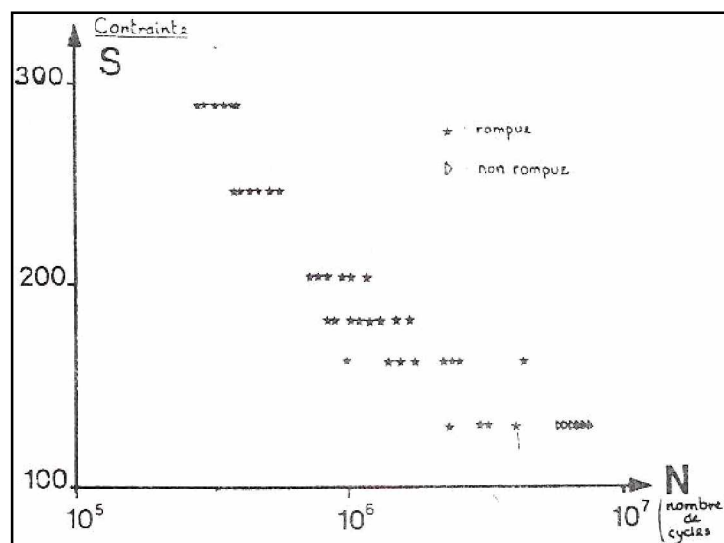


Figure II.1. Présentation des résultats d'essais sur un diagramme de Wöhler ( $S$ -log  $N$ ) [1]

C'est pourquoi, la détermination expérimentale des caractéristiques de fatigue nécessite d'utiliser des méthodes statistiques qui permettent d'estimer, soit la résistance à la fatigue à N cycles et l'écart-type correspondant, soit de tracer la courbe qui relie l'amplitude de la contrainte cyclique au nombre de cycles à rupture.

La résistance à la fatigue est conditionnée par de nombreux facteurs, en particulier, les conditions d'application des sollicitations cycliques peuvent modifier sensiblement la résistance à la fatigue d'une pièce ou d'une structure.

Par ailleurs, de nombreuses études montrent que l'endurance d'un matériau est liée à sa résistance et à sa ductilité.

C'est pourquoi, dans le cas des aciers, plusieurs auteurs ont proposé une estimation grossière de la limite d'endurance en corrélant celle-ci aux caractéristiques mesurées au cours d'un essai de traction.

Ce texte a pour but, d'une part, de présenter les principales méthodes statistiques qui peuvent être utilisées pour caractériser le comportement en fatigue sous chargement simple d'un matériau à partir de résultats d'essai, d'autre part, de préciser l'influence des conditions des sollicitations cycliques.

## **II.2. Nature et aspect de la dispersion des résultats d'essais de fatigue**

L'aspect de la dispersion observée résulte directement de sa nature et de ses causes physiques que l'on peut logiquement répartir en trois classes :

- 1) internes au matériau ;
- 2) dues ou liées à la préparation des éprouvettes ou des pièces ;
- 3) extérieures à l'éprouvette.

La nature et le mode d'action des causes des catégories 2) et 3) apparaissent avec le plus d'évidence. Les opérations de mise en forme par tournage, fraisage, rectification, par exemple, qui tombent dans la seconde catégorie ont une influence bien connue sur l'endurance des pièces, de même que les traitements thermiques qu'il n'est jamais possible de reproduire de façon rigoureusement identique sur toutes les éprouvettes d'une même série.

Les causes de dispersion extérieures aux pièces comprennent notamment les incertitudes de montage dans les machines d'essais et de réglage de la charge appliquée, de la fréquence des cycles, ...etc, même l'influence de l'environnement peut ne pas être négligeable.

Les causes de dispersion dont le mécanisme d'action est le mal connu sont celles de la première catégorie: inclusions, hétérogénéité de structure, ...etc.

Elles ne sont d'ailleurs pas indépendantes de celle de la catégorie 2) car les opérations de préparation peuvent modifier le matériau et son hétérogénéité (les traitements thermiques notamment). Enfin, le mécanisme même de l'endommagement fait interagir les diverses causes de dispersion entre elles.

L'expérience a montré que le résultat de ces actions combinées se traduit généralement par une forme caractéristique des réponses à la contrainte.

Un nombre de cycles de sollicitation  $N$ , ayant été fixé (figure II.2.a) et l'évènement observé étant la rupture ou la non-rupture de l'éprouvette avant ce nombre de cycles, on appelle courbe de réponse à la contrainte la courbe représentative de la probabilité de cet évènement en fonction de l'amplitude de cycles.

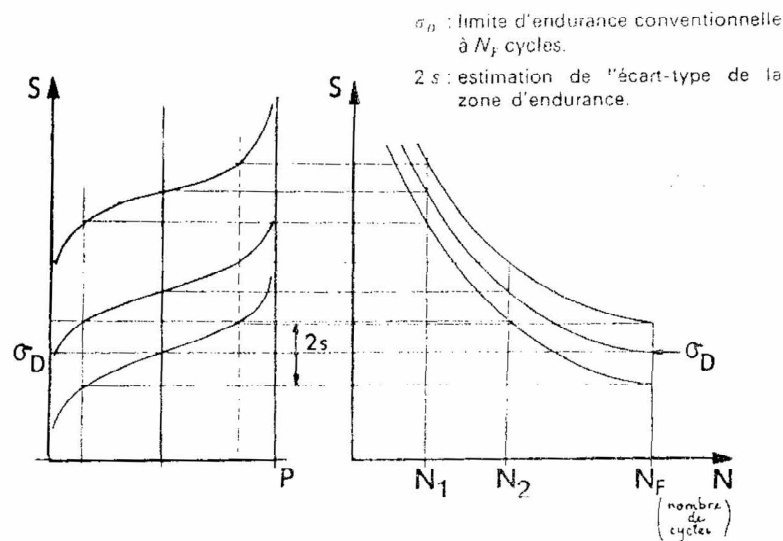
On a pu montrer par diverses méthodes que ses courbes sont des sigmoïdes normales représentables par la fonction:

$$P(S) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^s \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (1)$$

Dans laquelle,  $\mu$  représente l'amplitude de contrainte pour laquelle la probabilité de rupture est égale à 0,5 et  $\sigma$  le paramètre caractéristique de dispersion ou contrainte.

Diverses méthodes utilisées pour traiter les résultats d'essais de fatigue ont pour but d'estimer les paramètres  $\mu$  et  $\sigma$  d'une courbe de réponse à la contrainte, pour un nombre de cycle donné.

L'estimation  $\sigma_D$  de la limite d'endurance conventionnelle et  $s$  de l'écart-type de la zone d'endurance en est un cas particulier (figure II.2.a) [1].



**Figure II.2a.** Tracé des 3 courbes de réponse à la contrainte

**Figure II.2b.** Tracé des courbes d'isoprobabilité ( $p = 0.16$  ;  $p = 0.5$  ;  $p = 0.84$ ) sur un diagramme de Wöhler [1]

### II.3. Méthodes d'estimation approchée

#### II.3.1. Méthode de reclassement des données

##### II.3.1.1. Principe

Les essais sont effectués à des contraintes régulièrement espacées, allant des ruptures quasi-certaines aux non ruptures quasi-certaines [2].

On utilise à chaque niveau d'essai le même nombre d'éprouvettes, une ou deux en général.

On ne retient des résultats expérimentaux, que le caractère "rompue" ou "non rompue". Les données sont ensuite reclassées, en attribuant aux niveaux supérieurs les éprouvettes rompues et aux niveaux inférieurs les éprouvettes non rompues.

On prend alors comme limite d'endurance estimée, la contrainte qui sépare les éprouvettes reclassées en deux groupes : les "rompues" et les "non rompues".

### II.3.1.2. Condition d'exécution de la méthode

Les niveaux de charge choisis doivent encadrer la limite d'endurance présumée et le pas d'échelonnement des charges doit être de l'ordre de grandeur de l'écart-type supposée.

### II.3.1.3. Valeur de la méthode

La méthode de reclassement des données n'est qu'une méthode de dégrossissage. Elle nécessite un nombre déjà important d'éprouvette : si on utilise deux éprouvettes par niveau, avec 7 ou 8 niveaux, cela conduit à une quinzaine d'éprouvettes. Pour cette raison, cette méthode n'est pas ou peu utilisée, car pour un tel nombre d'éprouvettes d'autres méthodes donnent des résultats beaucoup plus précis.

## II.3.2. Méthode des K éprouvettes non-rompues [2]

Cette méthode consiste à rechercher par paliers de contraintes successifs décroissants en progression arithmétique, un niveau auquel K éprouvettes, donnent K non rompues.

### II.3.2.1. Condition d'exécution de la méthode

On choisit un niveau de départ  $\sigma_i$  situé sensiblement au-dessus de la limite d'endurance présumée, et on effectue les essais un par un, en choisissant le niveau de contrainte de la manière suivante :

- si le dernier de ces  $n_i$  essais a donné lieu à une rupture, c'est au niveau  $\sigma_{i+1}$  que sera effectué l'essai suivant ( $\sigma_{i+1}$  est le niveau de contrainte immédiatement inférieur au niveau  $\sigma_i$ ).
- si les  $n_i$  essais effectués au niveau  $\sigma_i$  ne présente que les non ruptures, l'essai suivant est réalisé au même niveau  $\sigma_i$  à condition que  $n_i < K$ , K étant choisi par avance. Si  $n_i = K$ , les essais sont arrêtés et la limite d'endurance recherchée est ce dernier niveau d'essai pour lequel on a obtenu K non ruptures.

Généralement, on prend  $K=3$ , d'où le nom de la méthode dite des "3 éprouvettes".

On trouvera ci-dessous un exemple de la méthode pour  $K=3$  éprouvettes.

### II.3.2.2. Validité de la méthode

Cette méthode reste, elle aussi, une méthode de dégrossissage. Le nombre de niveaux et le nombre d'éprouvettes sont tels que la méthode perd de son intérêt. Comme dans la plupart des méthodes présentées ici, le pas choisi pour l'échelonnement des chartes doit être approximativement de l'ordre de l'écart-type. Alors pour  $K=3$  les calculs statistiques montrent qu'il faut en moyenne huit éprouvettes pour réaliser complètement la procédure.

Ordre du niveau d'essai	Niveau de contrainte alternée $\pm \sigma_{ai}$	Résultats obtenus (dans leur ordre d'apparition)
1	36	1 éprouvette rompue
2	34	1 éprouvette rompue
3	32	1 éprouvette non rompue 1 éprouvette rompue
4	30	1 éprouvette non rompue 1 éprouvette rompue
5	28	3 éprouvettes non rompues

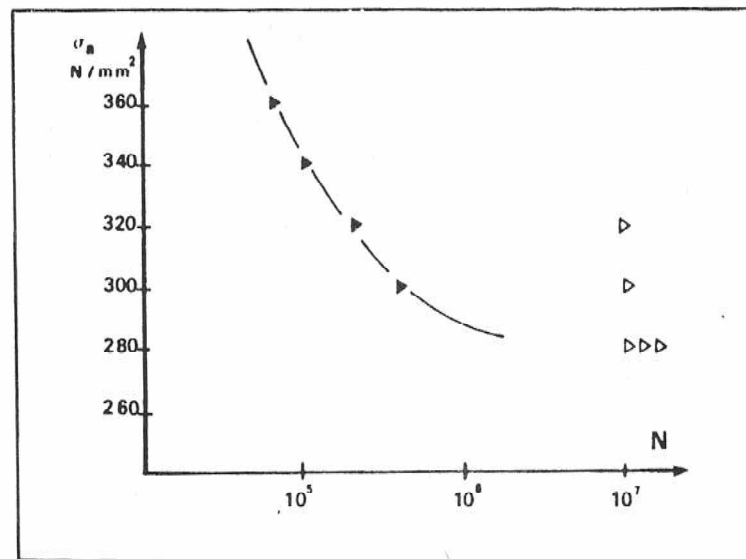


Figure II.3. Méthode des  $K$  éprouvettes non-rompues [2]

## **II.4. Méthode d'estimation de la limite d'endurance à N cycles de précision moyenne ou de bonne qualité**

### **II.4.1. Méthode des "Probits"**

#### **II.4.1.1. Principe**

Pour un nombre de cycles maximal N, choisi à l'avance, on effectue des essais par niveaux et on détermine la proportion P d'éprouvettes rompues avant le nombre de cycle N, choisi à chaque niveau de contrainte.

La variation de P est portée en fonction de la contrainte d'essai sur un graphique à échelle galtonienne [2], de manière à tenir une droite de Henry pour le nombre de cycles N considéré. Cette droite permet de déterminer le niveau de contrainte pour lequel on obtient 50 % d'éprouvettes non rompues, c'est-à-dire la limite d'endurance recherchée. La droite de Henry permet également de déterminer l'écart-type de la zone d'endurance. Entre les niveaux de contrainte correspondant à 16% et 84% de rupture, la théorie précise, en effet, qu'il y a un écart de 2 fois l'écart-type.

#### **II.4.1.2. Condition d'exécution de la méthode**

On choisit des niveaux de contraintes régulièrement espacés d'un pas correspondant à l'écart-type présumé. Les niveaux doivent encadrer la limite d'endurance supposée.

La méthode nécessite l'essai d'au moins 80 éprouvettes (de préférence plus), réparties par tirage au sort sur 4 ou 5 niveaux.

#### **II.4.1.3. Validité de la méthode [2]**

C'est la méthode qui conduit à la meilleure précision de la limite d'endurance, mais aussi de l'écart type.

Malheureusement, le nombre élevé d'éprouvettes nécessaires, la rend trop coûteuse et elle n'est pratiquement jamais utilisée pour cette raison.

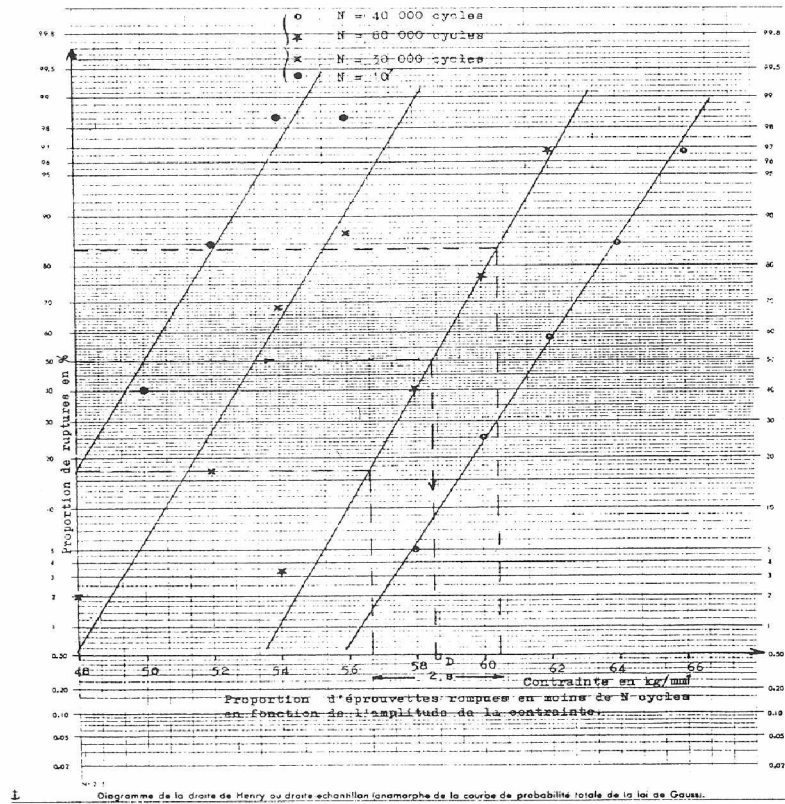


Figure 2.4. Droite de Henry [2]

### II.4.2. 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 [1].

Dixon et Mood 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.4.2.1. Règle d'exécution de la méthode de l'escalier

Comme pour la méthode des Probits, on fixe une durée maximale d'essai  $N$  et l'on définit un échelonnement d'amplitude de contrainte en progression arithmétique dont le pas soit de l'ordre de grandeur de l'écart-type  $\sigma$  de la courbe de réponse.

Le premier essai sera effectué au niveau de cet échelonnement jugé à priori, le plus voisin de la médiane  $\mu$  cherchée. A partir du second essai, le niveau d'amplitude de la contrainte est ainsi choisi :

- si l'essai précédent s'est traduit par une non-rupture, choisir, pour le nouvel essai à effectuer, le palier de contrainte de l'échelonnement adopté immédiatement supérieur à celui utilisé lors du dernier essai ;
- si l'essai précédent s'est traduit par une rupture, choisir, à l'inverse, le palier immédiatement inférieur.

En d'autres termes,  $d$  désignant le pas de l'échelonnement des contraintes et  $S_i$  la valeur adoptée pour le  $i$ -ième essai, on prendra :

$S_{i+1} = S_i + d$  si la  $i$ -ième éprouvette essayée ne s'est pas rompue.

$S_{i+1} = S_i - d$  si cette  $i$ -ième éprouvette s'est rompue.

Les essais se poursuivent selon cette règle, les uns à la suite des autres, jusqu'à épuisement des  $n$  éprouvettes que l'on décidé d'y consacrer.

La figure II.5 donne un exemple d'une série de tels essais.

#### II.4.2.2. Utilisation des résultats

Les résultats d'essais obtenus par cette méthode permettent d'estimer la résistance médiane à la fatigue au nombre de cycles fixé et, en principe, l'écart type. Les calculs à effectuer sont simples [1]. On détermine d'abord le type d'évènement qui s'est produit le moins fréquemment au cours de la série d'essai : rupture ou non-rupture. Les résultats de ce type suffisent, en effet, au calcul et sont retenus de préférence aux autres, le fait que les résultats d'un type donné (les ruptures par exemple) soient plus nombreux que les autres étant souvent dû au choix d'un niveau de départ éloigné de la valeur à estimer. La séquence débute alors par une suite ininterrompue de résultats de même type dont l'inclusion entraînerait une erreur systématique.

On compte le nombre  $N_i$  des réalisations de cet évènement à chaque niveau d'essai puis on numérote ces niveaux en attribuant la valeur  $i = 0$  au plus faible de ceux auxquels il a été

observé au moins une fois.  $i$  désignant le numéro du niveau d'essai, il faut alors calculer les quantités :

$$N = \sum_i N_i, \quad A = \sum_i i \cdot N_i \quad \text{et} \quad B = \sum_i i^2 \cdot N_i$$

Le tableau de la figure II.5 montre comment effectuer le calcul de ces quantités dans un cas où les résultats retenus se rapportent aux ruptures.

L'estimation  $m$  de  $\mu$  est obtenue par la formule suivante :

$$m = S_0 + d \left( \frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

Dans laquelle :

$S_0$  : niveau d'indice 0 tel que défini plus haut (le plus faible des niveaux utilisés auquel on a obtenu au moins résultat du type retenu) ;

$d$  : espacement des niveaux.

Avec :

+1/2 si le calcul est basé sur les contraintes d'essai des éprouvettes non rompues.

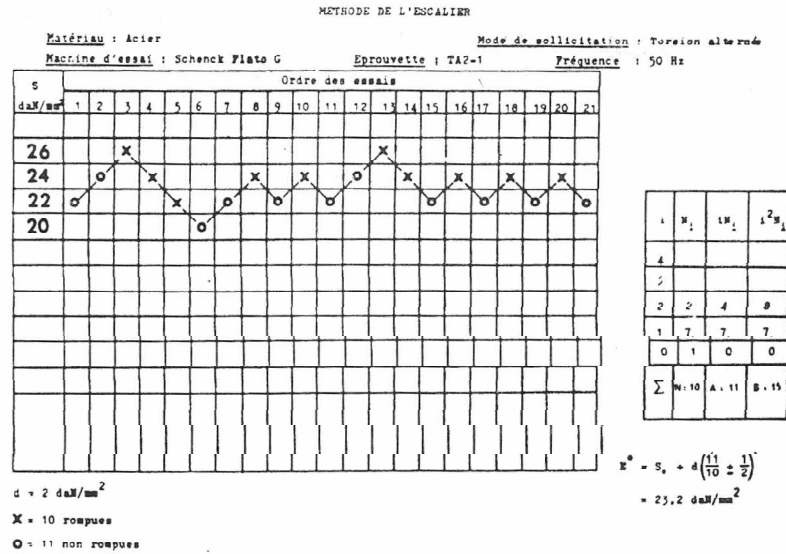
-1/2 s'il est basé sur les contraintes d'essai des éprouvettes rompues.

La méthode de l'escalier permet aussi d'obtenir une estimation  $s$  de l'écart-type  $\sigma$  de la courbe de réponse à la contrainte :

$$S = 1,62d \left( \frac{NB - A^2}{N^2} + 0,029 \right) \quad (3)$$

Selon Dixon et Mood la formule (3) ne peut être utilisée qu'à condition que :

$$\frac{NB - A^2}{N^2} > 0,3 \quad (4)$$



En fait, l'estimation, par la méthode de l'escalier, de l'écart-type de la courbe de réponse à la contrainte ne doit être considéré qu'avec beaucoup de prudence si le nombre d'essai n'est pas au moins égal à 50. L'estimation de cet écart-type n'est, en fait, pas meilleure, à nombre d'essai égal, que celle qu'on obtiendrait par la méthode des Probits.

### II.4.2.3. Précision de m et s

L'estimation m de  $\mu$  est distribuée normalement avec un biais négligeable et un écart-type :

$$\sigma_m = \frac{G}{\sqrt{N}} \tag{5}$$

Où : G est un facteur dépendant du rapport  $d/\sigma$  :

$$G = 1 + \frac{d}{8\sigma} \tag{6}$$

L'estimation s de  $\sigma$  représente un biais important, fonction de  $d/\sigma$ . La dispersion de s est également fonction de  $d/\sigma$ . Pour  $d = \sigma$ , où elle est voisine de son minimum, la précision de l'estimation de l'écart-type  $\sigma$  est sensiblement équivalente à celle d'une estimation basée sur des données quantitatives dont le degrés de liberté serait N/3,5.

#### II.4.2.4. Remarque sur l'application pratique de la méthode de l'escalier

Dans le paragraphe "règle d'exécution de la méthode de l'escalier", on a simplement indiqué que l'espacement  $d$  devait être de l'ordre de grandeur de  $\sigma$ . En pratique, l'estimation  $m$  de  $\mu$  reste satisfaisante tant que :

$$\frac{1}{2} < \frac{d}{\sigma} < 2$$

L'estimation  $m$  de  $\sigma$ , déjà peu satisfaisante dans les conditions optimales ( $1 < d/\sigma < 1,5$ ), se détériore rapidement si l'en s'éloigne.

#### II.4.3. Méthode d'itération

##### II.4.3.1. Principe

La méthode d'itération consiste à s'approcher par approximation successive de la limite de fatigue recherchée [2].

On tend par convergence vers la limite d'endurance  $\sigma_D$  à l'aide d'une formule de récurrence de la forme :

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \frac{2,5 * S}{i+1} (0,5 - p_i)$$

Dans laquelle :

$\sigma_i, \sigma_{i+1}$  : contraintes à appliquer successivement lors de l'essai ;

$S$  : écart-type supposé au départ de l'essai ;

$P_i$  : proportion de ruptures observées à ce niveau de charge.

##### II.4.3.2. Condition d'exécution de la méthode

Le choix du niveau de départ est, ici, très important. Si le premier niveau est très éloigné de la limite d'endurance recherchée. La méthode peut ne pas converger assez vite pour atteindre la valeur recherchée, le pas de l'échelonnement des charges successives étant ici

décroissant par le principe même de la méthode. Le niveau de départ doit donc être aussi proche que possible de la limite d'endurance présumée.

Pour éviter les aléas, il est souhaitable d'essayer plusieurs éprouvettes (2 ou 3) à chaque niveau, de manière à calculer pour chaque niveau d'essai une proportion de ruptures  $P_i$  plus "sûre" que dans le cas d'une seule éprouvette.

Une autre amélioration de cette méthode consiste à accélérer sa convergence en ne changeant la valeur du pas, qui sépare les deux derniers niveaux d'essai, que lorsqu'on observe un changement de résultat (passage de non ruptures successives à une rupture ou réciproquement). Dans ce cas, on n'essaie qu'une éprouvette par niveau et on n'utilise la formule de récurrence pour calculer le nouveau pas qu'à chaque changement de réponse. La figure 2.6 donne un exemple.

N° d'ordre	Force max. (en N)	Nombre de cycles
1	700	5 000 000
2	750	855 300
3	718	355 500
4	687	908 200
5	656	5 000 000
6	677	1 060 700
7	661	275 600
8	645	572 700
9	630	5 x 10 <sup>6</sup>
10	642	480 000
11	632	663 000
12	622	5 000 000
13	631	1 924 000
14	621	391 800
15	615	456 200
16	607	391 400
17	599	5 000 000

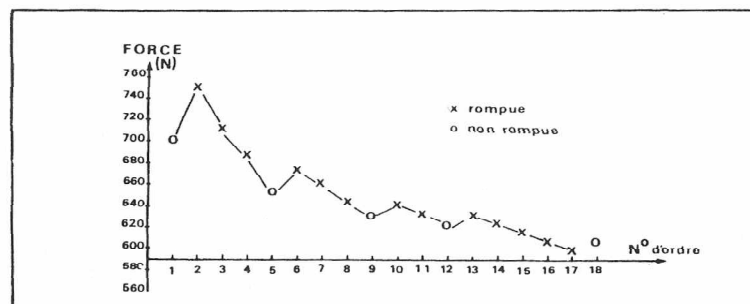


Figure II.6. Méthode d'itération [2]

### II.4.3.3. Validité de la méthode

Cette méthode nécessite 10 à 15 éprouvettes suivant le déroulement des essais. Il importe également d'avoir une bonne idée de la valeur de la limite d'endurance estimée, pour

situé correctement le niveau de d'écart. Il importe également que l'estimation à priori de l'écart-type s utilisé dans la formule de récurrence ne soit pas trop éloignée de la réalité. Ces précautions nécessaires rendent donc la méthode difficile d'utilisation, bien quelle conduise à un degré de précision acceptable dès que l'on utilise 12 à 15 éprouvettes et que la convergence s'effectue normalement.

Dans tout les cas, il faudra utiliser cette méthode avec plusieurs essais par niveau ou employer la méthode accélérée.

## II.5. Relations entre l'endurance et les caractéristiques mécaniques (cas des aciers)

### II.5.1. Estimation de $\sigma_D$ [1]

De nombreux auteurs ont cherché à relier la limite d'endurance aux propriétés mécaniques et en particulier à la résistance à la rupture,  $R_m$  (en MPa), à la limite d'élasticité,  $R_{e0.2}$  (en MPa), à l'allongement,  $A$  (en%), et à la striction  $Z$  (en %).

De nombreuses formules ont été proposées ( $\sigma_D$  en MPa) :

- Mailander  $\sigma_D = (0.49 \pm 20\%) R_m$   
 $\sigma_D = (0.65 \pm 30\%) Re$
- Strinbeck  $\sigma_D = (0.285 \pm 20\%) R_m + Re$
- Rogers  $\sigma_D = 0.4Re + 0.25R_m$
- Houdremont et Mailander  $\sigma_D = 0.25(Re + R_m) + 50$
- Junger  $\sigma_D = 0.2 (Re + R_m + Z)$
- Lequis, Buckholtz et Scholtz  $\sigma_D = 0.175 (Re + R_m - A\% + 50)$
- Fry, Kessner et Ottel  $\sigma_D = \alpha R_m + \beta Re$

Les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  ne sont pas constants,  $\alpha$  est proportionnel à  $R_m$ , Tandis que  $\beta$  est inversement proportionnel à  $R_m$ .

- Heywood  $\sigma_D = \frac{R_m}{2}$

$$\sigma_D = 150 + 0.43R_e$$

- Brand  $\sigma_D = 0.32R_m + 121$

Toutes ces formules ne sont applicables qu'aux cas précis pour lesquels les expériences ont été faites. En effet, les caractéristiques d'endurance dépendent de nombreux paramètres tels que la structure métallurgique, la fréquence des cycles ou la dimension des éprouvettes.

## II.6. Estimation de $s$

Les valeurs de l'écart-type,  $s$ , de la zone d'endurance obtenues au cours de l'étude précédente, sont assez dispersées [1]. Cette variation est due notamment à la méthode de dépouillement utilisée.

Les résultats montrent cependant une augmentation moyenne de  $s$  lorsque  $R_m$  croît : on peut admettre comme valeur indicative  $s = 0,02 R_m$ .

## II.7. Conclusion

La dispersion des résultats d'essai de fatigue, liée, soit à la nature du matériau, soit aux conditions expérimentales, nécessite l'utilisation de méthodes d'analyses statistiques appropriées, lors du dépouillement des résultats d'essais.

Pour estimer la résistance à la fatigue à  $N$  cycles et son écart-type, plusieurs méthodes sont proposées [1]:

- la méthode de reclassement des données ;
- la méthode des  $K$  éprouvettes non rompues.
- la méthode dite des probits ;
- la méthode de l'escalier ;
- la méthode d'itération.

Ces méthodes requièrent un nombre d'éprouvettes minimal et des conditions de mise en œuvre différentes qui permettent d'obtenir une précision des estimations variables.

Dans le cas des aciers, une estimation grossière de la limite d'endurance à partir d'un simple essai de traction est souvent nécessaire. Différentes relations empiriques sont proposées.

Le meilleur accord entre valeurs expérimentales et valeurs calculées est obtenu en reliant la limite d'endurance à la résistance à la traction et à l'allongement à rupture.

## CHAPITRE III

### CHOIX DE L'ACIER & DISPOSITIF D'ESSAIS

Au moment de la conception d'une pièce, il est important de tester des échantillons du métal que l'on souhaite utiliser pour connaître ses propriétés. Afin de vérifier si le matériau de la pièce est conforme, on en prélève des échantillons pour leur faire subir des essais mécaniques.

Pour déterminer le comportement d'un type d'acier sous le phénomène de fatigue, nous avons choisi l'acier **XC48** de 20 mm de diamètre qui présente les meilleures dimensions pour l'usinage des éprouvettes.

Type d'acier : barre ronde de Ø20 mm.

#### III.1. Domaine d'utilisation

L'**XC48** est un acier d'amélioration, livré normalement sans traitement thermique, facilement usinable et orienté vers la production des pièces de construction pour outillage à plastique, moules de soufflage et toutes sortes d'outils à main à l'état trempé (marteaux, fourches, couteaux, scies, tournevis, ...etc.) [8].

#### III.2. Composition chimique de l'acier

##### III.2.1. Moyen de détection

La détection de la composition chimique de l'acier choisi est faite dans le laboratoire de physique de **BCR** à moyen d'un spectromètre de type : **SPECTRO**, modèle : **SPECTROLAB L/M**, à moyenne de deux étincelles sur 02 lopins de 20 mm de diamètre.

### III.2.2. Composition chimique

Les composants de l'acier choisi en % sont :

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0.43	0.22	0.72	0.010	0.022	0.07	0.01	0.05
Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn
0.0035	0.01	0.12	<0.00	0.0092	<0.00	0.02	0.006
As	Ca	Ce	Se	B	N	Fe	
0.006	0.0019	0.002	<0.0015	0.0020	0.0054	98.30	

Ces résultats sont conformes aux normes de livraison [8].

### III.3. Caractéristiques mécaniques

Pour satisfaire l'étude du phénomène de fatigue sur l'acier retenu, quelques données de traction étaient nécessaires.

#### III.3.1. Les essais de traction

Ils ont été réalisés au laboratoire de métrologie d'*Anabib* de *Bordj Bou Arréridj* sur une machine d'essai de matériaux, modèle : **ZWICK**, type : 1478, qui fonctionne dans les conditions suivantes :

\* Conditions relatives au secteur :

Tension : 220V courant alternatif, monophasé avec prise de terre de protection ou 380 V courant triphasé avec fil neutre et prise de terre de protection.

Variations de tension :  $\leq \pm 10 \%$ .

Chute momentanées de tension < 20 ms.

Fréquence : 50 Hz  $\pm 1\%$ .

Terre de protection : résistance de mise à la terre  $\leq 5 \Omega$

\* Condition relatives à la température

Etendue admise pour la :

- Température ambiante : +18° à 28°c suivant DIN 50 014.
- Humidité de l'air : < 90 %.

\* Conditions relatives à l'environnement :

Le lieu d'installation est peu poussiéreux et à l'abri de toute humidité (eau, huile), il faut éviter les chocs et les vibrations ; le cas échéant, il faut installer des plaques d'amortissement, des amortisseurs de vibrations ou semblables.

Ces essais ont été faits sur trois (03) éprouvettes.

### III.3.2. Eprouvette

Les éprouvettes sont normalisées et ont les dimensions représentées dans la figure III.1.

### III.3.3. Résultats des essais

A% : Allongement après rupture en %. C'est le pourcentage d'allongement après rupture par rapport à la section initiale.

$$A \% = \frac{L - L_0}{L_0} * 100$$

$$A_{(1)} \% = 18,20 \%$$

$$A_{(2)} \% = 18,76 \%$$

$$A_{(3)} \% = 18,50 \%$$

Z% : Coefficient de striction après rupture en %.

C'est le pourcentage de réduction de la section après rupture par rapport à la section initiale.

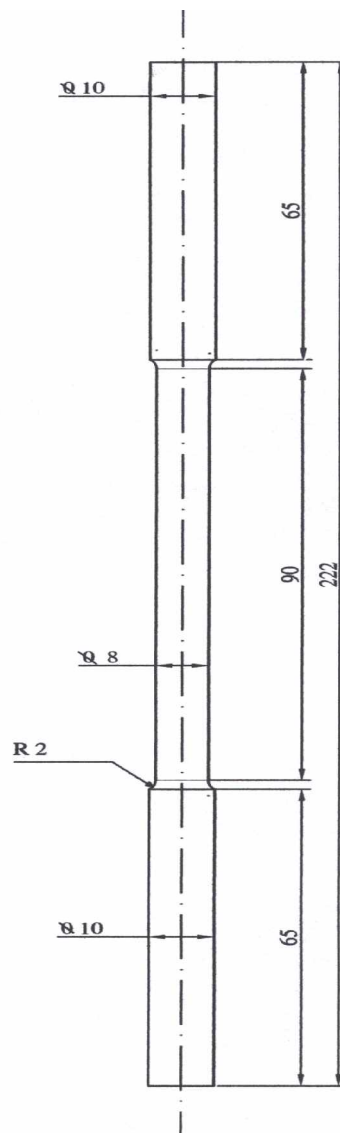
$$Z \% = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100.$$

$$Z_{(1)} \% = 30,04 \%$$

$$Z_{(2)} \% = 26,76 \%$$

$$Z_{(3)} \% = 27,51 \%$$

$R_e$  : Limite élastique.



**Figure III.1.** Eprouvette d'essai de traction

L'effort de traction est tel que tout dépassement de cet effort de traction a pour effet de provoquer des déformations résiduelles irréversibles dans la matière qui l'a subi.

$$R_{e(1)} = 450 \text{ N/mm}^2.$$

$$R_{e(2)} = 428,5 \text{ N/mm}^2.$$

$$R_{e(3)} = 449,7 \text{ N/mm}^2.$$

$R_m$  : Résistance à la rupture (Résistance mécanique).

Effort de traction à partir duquel la matière se brise en deux parties.

$$R_{m(1)} = 676,3 \text{ N/mm}^2.$$

$$R_{m(2)} = 673,4 \text{ N/mm}^2.$$

$$R_{m(3)} = 670,5 \text{ N/mm}^2.$$

$E$  : Module d'Young (Module d'élasticité).

D'après la loi de Hook :  $\sigma = E \cdot \varepsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

où :  $\sigma$  ; la contrainte appliquée et  $\varepsilon$  ; la déformation apparaît.

$$E_{(1)} = 20454,5 \text{ N/mm}^2.$$

$$E_{(2)} = 20404,7 \text{ N/mm}^2.$$

$$E_{(3)} = 20441,3 \text{ N/mm}^2.$$

$\nu$  : Coefficient de poisson.

$$\nu = 0.2$$

La dureté HV (mesurée dans le laboratoire de **BCR** par un duromètre modèle : **FRANK**).

$$Hv_{30} = 191$$

Et voici quelques caractéristiques du traitement thermique concernant cet acier :

- Température de recuit d'adoucissement entre 680° et 710° durant 2 à 5 heures avec refroidissement dans le four.
- Température de trempe entre 800° et 830° avec refroidissement dans l'eau.
- Température de revenu entre 100° et 300° durant 1heure et 2heures pour 1mm, avec refroidissement dans l'air calmé.

Les résultats des essais de traction sont représentés dans des courbes de traction (**voir annexe I**).

#### III.4. Machine d'essai de fatigue

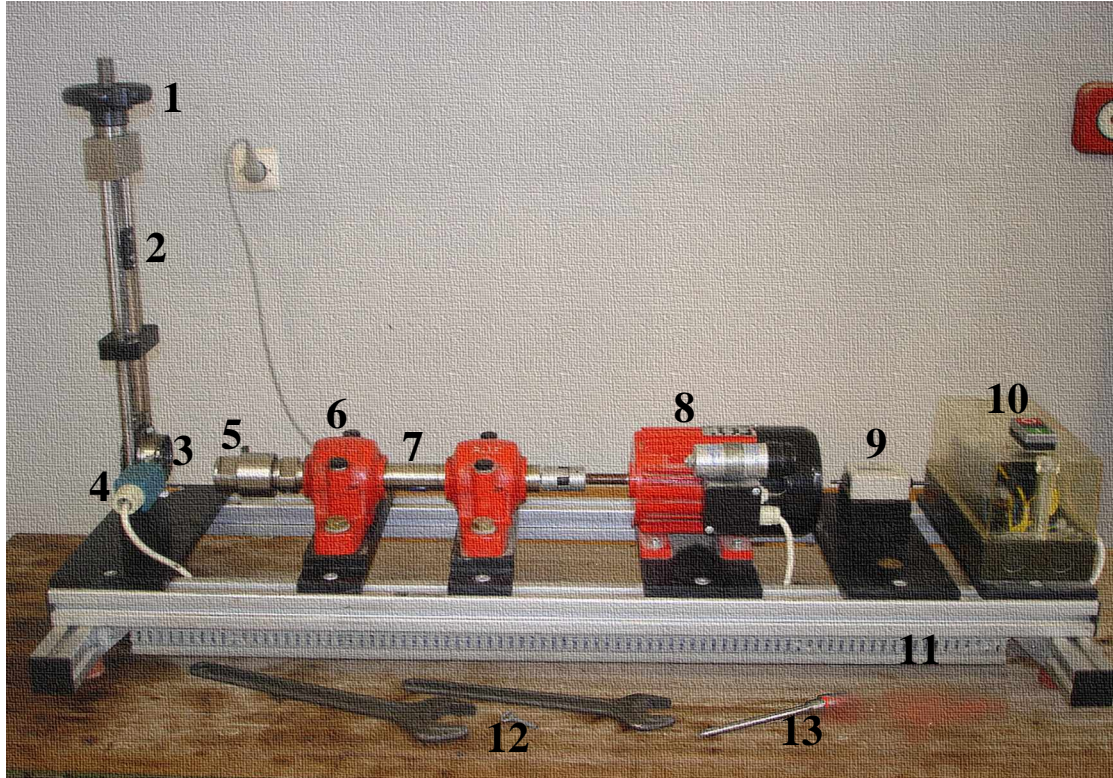
On distingue plusieurs machines d'essai de fatigue ; selon le mode de sollicitation (flexion plane, flexion rotative, torsion, traction compression, etc.), et selon les facteurs d'influence (température, fatigue sous corrosion, etc.).

Le laboratoire de la résistance des matériaux (RDM) du département de génie mécanique de l'université de M'sila contient une machine d'essai de fatigue en flexion rotative modèle : **GUNT**, de type : **WP 140**, qui à les caractéristiques suivantes :

- courant alternatif : 220 V
- fréquence : 50 Hz
- charge maximale : 500 N
- échelle de graduation : 5 N
- environnement : air ambiant
- température : ambiante

### III.4.1. Description de la machine

La figure III.2 montre la machine d'essai de fatigue en flexion rotative *WP 140*.



**Figure III.2.** La machine d'essai de fatigue *GUNT WP 140*

- 1 Volant
- 2 Chariot transversal gradué
- 3 Roulement
- 4 Fin de course
- 5 Mandrin
- 6 Palier lisse
- 7 Arbre de transmission
- 8 Moteur électrique
- 9 Compteur
- 10 Tableau de commande
- 11 Châssis
- 12 Clés
- 13 Eprouvette

### III.4.2. Instructions

- A. Connecter la machine d'essai de fatigue à l'alimentation électrique.
- B. Tourner le volant dans le chariot transversal jusqu'au numéro "0" apparaît dans l'échelle des charges.
- C. Soit sûr que l'axe du roulement et celui de l'arbre de transmission sont en alignement.
- D. Insérer l'éprouvette désirée (le tableau III. 1. donne les dimensions des éprouvettes appartiennent à cette machine).
  - Premièrement, desserrer le mandrin de l'arbre de transmission.
  - Puis, faire introduire la partie cylindrique de l'éprouvette à travers le trou du mandrin.
  - Après, insérer l'extrémité cylindrique de l'éprouvette dans la bague intérieure du roulement, et en fin, insérer l'extrémité conique de l'éprouvette dans le cône dans l'arbre de transmission on serrant bien le mandrin.
- E. Utiliser la clé pour retourner le compteur à "0" (le "0" de la dernière colonne du compteur peut retourner on tournant l'arbre de transmission à la main).
- F. Charger l'extrémité libre de l'éprouvette (sur le roulement) par la charge désirée on tournant le volant.
- G. Allumer la machine.
- H. A la rupture, la fin de course arrête automatiquement la machine, changer l'éprouvette rompue et recommencer les essais.

### III.5. Eprouvette d'essai

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

#### III.5.1. Forme

On distingue les éprouvettes parallélépipédiques d'épaisseur constante et à section soit constante, soit variable, des éprouvettes axisymétriques à section circulaire, soit cylindriques à section constante, soit toroïdales à section variable.

Dans tous les cas, on distingue les éprouvettes lisses des éprouvettes entaillées.

### III.5.2. Dimensions

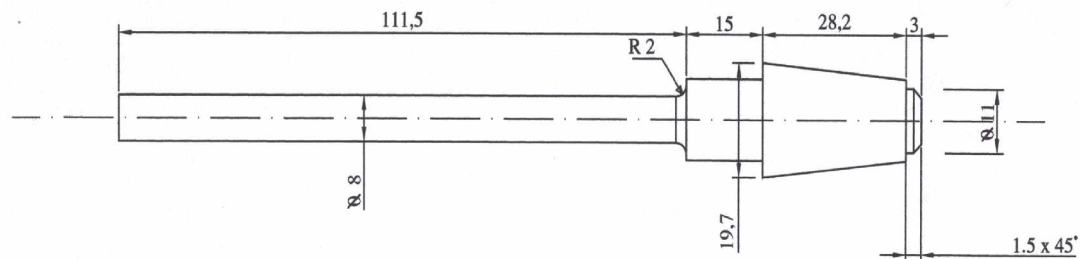
Elles dépendent de la capacité de la machine (charge d'essai maximale : 25% de la capacité de la machine) et de ces caractéristiques (fréquence propre de l'éprouvette supérieure à deux fois la fréquence d'essai).

Le tableau III.1 représente les types d'éprouvettes qui appartiennent à la machine d'essai de fatigue WP 140.

**Tableau III.1.** *Caractéristiques des éprouvettes de la machine WP 140*

Eprouvette n°	Rayon R (mm)	Rugosité de la surface $R_t$ ( $\mu_m$ )
1	0.5	4
3	2	4
4	2	25

Dans ce travail nous avons choisi l'éprouvette 3 qui à les dimensions données sur la figure III.3 :



**Figure III.3.** *Eprouvette d'essai de fatigue n° 3*

### III.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.

Pour cette raison, l'état de surface des éprouvettes devra être particulièrement soigné et répétitif pour le même lot d'éprouvette. On aura alors intérêt à privilégier les types d'éprouvettes et les modes d'usinage qui assurent le maximum de régularité et de répétitivité

de l'état de surface et qui n'introduisent que des contraintes résiduelles et un écrouissage superficiel négligeable.

La finition des éprouvettes par polissage manuel, même longitudinal, doit donc être évitée chaque fois que cela est possible [9]. On utilisera de préférence des éprouvettes cylindriques à profil toroïdal dont la finition sera obtenue par rectification dans le sens longitudinal.

Un contrôle de la rugosité superficielle après usinage est conseillé. Dans le cas de lots à grand nombre d'éprouvettes, le prélèvement des éprouvettes à contrôler devra être effectué de manière statistique de façon à avoir une valeur moyenne de rugosité représentative du lot et une indication de la dispersion des mesures.

Dans cette présente étude nous avons usiné nos éprouvettes dans les ateliers de fabrication d'*Anabib* par un tour numérique (CNC) modèle : *emcoturn*, type : **340-TC**, utilisant un programme convenable (**voir annexe : II**). L'usinage des éprouvettes a été effectué dans les mêmes conditions d'environnement dans le but d'avoir des éprouvettes identiques.

### III.6. Contrainte maximale de flexion

La contrainte maximale de flexion  $\sigma$  sur la fibre externe se calcule par la formule de Navier [9] :

$$\sigma = \frac{M_f}{M_I}$$

avec :  $M_f$ : moment fléchissant par rapport à la section considérée.

$$M_f = F * L$$

F : la charge appliquée

L : longueur du bras de levier

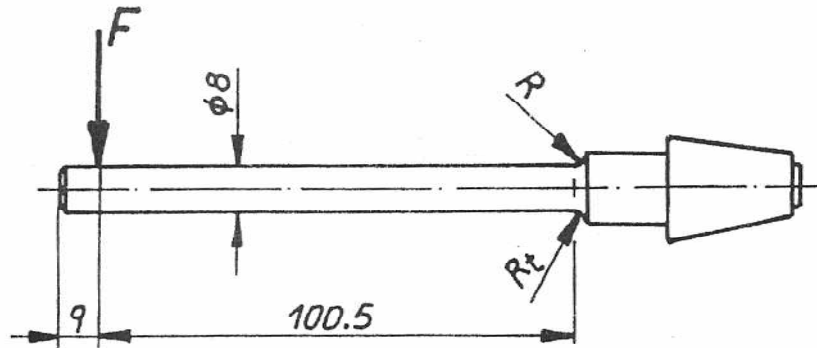
et :

$$M_I = I / v$$

I : moment d'inertie de la section par rapport à l'axe neutre,

$v$  : distance de la fibre externe à la fibre neutre.

La figure III.4 montre le point d'application de la charge  $F$  sur l'éprouvette 3.



**Figure III.4.** Point d'application de la charge  $F$

$$\sigma = \frac{M_f}{M_I}$$

$$M_f = F * L$$

$$M_I = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

$$\Rightarrow \sigma = F * L / \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

$$= F * 100.5 / \frac{\pi \cdot 8^3}{32}$$

$$\sigma \approx 2 \cdot F \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

## CHAPITRE IV

### RESULTATS EXPERIMENTAUX

Pour déterminer la tenue à la fatigue de l'acier retenu, telle que la limite d'endurance et son écart-type, on a utilisé quatre lots d'éprouvettes, de 71 éprouvettes au total, par des méthodes différentes.

#### IV.1. Lot n° : 01

Ce lot est effectué par la méthode de reclassement des données. Nous avons utilisé 8 éprouvettes sur 8 niveaux différents, espacés de 20 N/mm<sup>2</sup>.

##### *Méthode de reclassement des données*

- Û Matériau : Acier **XC48**
- Û Machine d'essai : **WP 140**
- Û Mode de sollicitation : flexion rotative (3000 tr/mn)
- Û Epreuve : **3**
- Û Essai dans l'air

Epreuve	Contrainte (N/mm <sup>2</sup> )	Nombre de cycles	Résultat à 10 <sup>6</sup>
01	370	36647	x
02	350	52698	x
03	330	105516	x
04	310	354651	x
05	290	776715	x
06	270	3.10 <sup>6</sup>	o
07	250	>3.10 <sup>6</sup>	o
08	230	>3.10 <sup>6</sup>	o

x : éprouvette rompue

o : éprouvette non rompue

$$\sigma_D = \frac{290+270}{2} = 280 \text{ N/mm}^2$$

La limite d'endurance obtenue par cette méthode est : 280 N/mm<sup>2</sup>.

On voit qu'on a utilisé un faible nombre d'éprouvettes, cette méthode est très grossière, puisqu'elle donne, en effet, des valeurs de la limite d'endurance qui peuvent varier. Cette méthode simplifiée ne peut donc être que comme méthode de dégrossissage.

Lorsqu'on utilise cette méthode avec un plus grand nombre d'éprouvettes, la précision obtenue est bien meilleure.

Cette valeur de la limite d'endurance (280 N/mm<sup>2</sup>) obtenue lors de la première série des essais sera utilisée comme une charge du premier niveau dans les séries des essais suivantes.

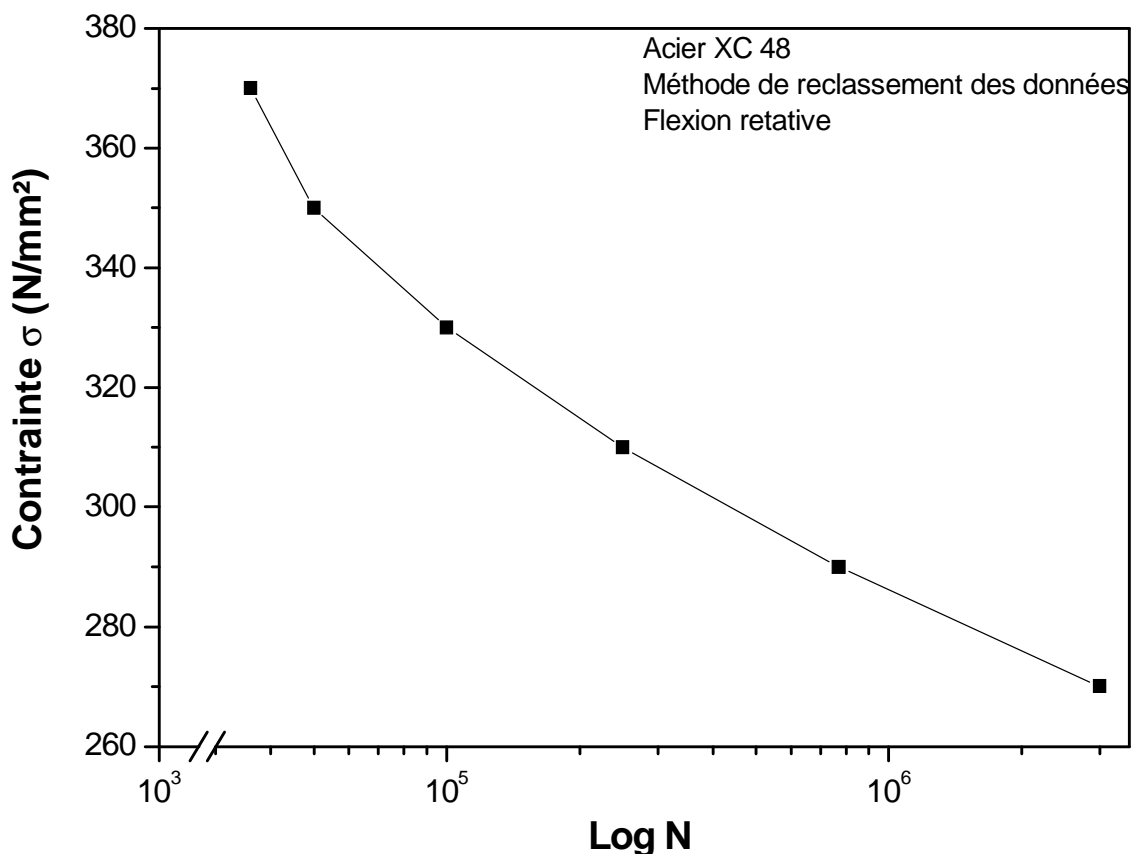


Figure IV.1. Tracé de la courbe de Wöhler du lot n°01 à l'échelle logarithmique

Pour les lots suivants on a utilisé la méthode de l'escalier avec 21 éprouvettes pour chaque lot.

**IV.2. Lot n° : 02**

*Méthode de l'escalier*

- ü Matériau : Acier **XC48**
- ü Machine d'essai : **WP 140**
- ü Mode de sollicitation : flexion rotative (3000 tr/mn)
- ü Epreuve : **3**
- ü Essai dans l'air

Contrainte (MPa)	Ordre des essais																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
320			x																		
300		o		x		x		x					x		x						
280	o				o		o		x		x		o		o		x		x		o
260										o		o						o		o	

d = 20 MPa.

x = 10

o = 11

Le calcul est basé sur les éprouvettes rompues.

$\sigma_i$ (MPa)	i	$N_i$	$i.N_i$	$i^2.N_i$
320	2	1	2	4
300	1	5	5	5
280	0	4	0	0
260				
	$\Sigma$	N=10	A=7	B=9

L'estimation  $m$  de  $\mu$  :

$$\begin{aligned} m &= S_0 + d \left( \frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right) \\ &= 280 + 20 \left( \frac{7}{10} - \frac{1}{2} \right) \\ m &= 284 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

L'estimation  $s$  de l'écart-type  $\sigma$  de la courbe de réponse à la contrainte :

$$\begin{aligned} S &= 1,62d \left( \frac{NB - A^2}{N^2} + 0,029 \right) \\ &= 1,62 * 20 \left( \frac{90 - 49}{100} + 0,029 \right) \\ S &= 14,22 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

On a :  $\frac{NB - A^2}{N^2} = 0,41 > 0,3$

Donc l'équation (2) peut être utilisée.

### Précision de $m$ et $S$

L'estimation  $m$  de  $\mu$  est distribuée avec un biais négligeable et un écart-type :

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{G}{\sqrt{N}} \\ G &= 1 + \frac{d}{8\sigma} \\ G &= 1,17 \\ \Rightarrow \sigma_m &= 0,37 \end{aligned}$$

On a :  $\frac{1}{2} < \frac{d}{\sigma} = 1.4 < 2$

Donc l'estimation  $m$  de  $\mu$  est satisfaisante.

Et on a aussi :  $1 < \frac{d}{\sigma} = 1.4 < 1.5$

Donc l'estimation  $s$  de  $\sigma$  est aussi satisfaisante.

**IV.3. Lot n° : 03**

*Méthode de l'escalier*

- ü Matériau : Acier **XC48**
- ü Machine d'essai : **WP 140**
- ü Mode de sollicitation : flexion rotative (3000 tr/mn)
- ü Eprouvette : **3**
- ü Essai dans l'air

Contrainte (MPa)	Ordre des essais																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
320					x												x				
300		x		o		x				x				x		o		x			
280	o		o				x		o		x		o		o				x		o
260								o				o									o

$d = 20$  MPa.

$x = 10$

$o = 11$

Le calcul est basé sur les éprouvettes rompues.

$\sigma_i$ (MPa)	i	$N_i$	$i.N_i$	$i^2.N_i$
320				
300	2	1	2	4
280	1	6	6	6
260	0	3	0	0
	$\Sigma$	N=10	A=8	B=10

L'estimation  $m$  de  $\mu$  :

$$m = S_0 + d \left( \frac{A}{N} + \frac{1}{2} \right)$$

$$= 260 + 20 \left( \frac{8}{10} + \frac{1}{2} \right)$$

$$m = 286 \text{ N/mm}^2$$

L'estimation  $s$  de l'écart-type  $\sigma$  de la courbe de réponse à la contrainte :

$$S = 1,62d \left( \frac{NB - A^2}{N^2} + 0,029 \right)$$

$$= 1,62 * 20 \left( \frac{100 - 64}{100} + 0,029 \right)$$

$$S = 12,6 \text{ N/mm}^2$$

On a :  $\frac{NB - A^2}{N^2} = 0,36 > 0,3$

Donc l'équation (2) peut être utilisée.

### Précision de $m$ et $S$

L'estimation  $m$  de  $\mu$  est distribuée avec un biais négligeable et un écart-type :

$$\sigma_m = \frac{G}{\sqrt{N}}$$

$$G = 1 + \frac{d}{8\sigma}$$

$$G = 1.198$$

$$\Rightarrow \sigma_m = 0.38$$

On a :  $\frac{1}{2} < \frac{d}{\sigma} = 1.58 < 2$

Donc l'estimation  $m$  de  $\mu$  est satisfaisante.

Et on a aussi :  $1 < \frac{d}{\sigma} = 1.58 > 1.5$

Donc l'estimation  $s$  de  $\sigma$  est peu satisfaisante.

**IV.4. Lot n° : 04**

*Méthode de l'escalier*

- ü Matériau : Acier **XC48**
- ü Machine d'essai : **WP 14**
- ü Mode de sollicitation : flexion rotative (3000 tr/mn)
- ü Eprouvette : **3**
- ü Essai dans l'air

Contrainte (MPa)	Ordre des essais																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
320									x											x	
300				x		x		o		x		x		x				o		x	
280	x		o		o		o				o		o		x		o				o
260		o														o					

$$d = 20 \text{ MPa.}$$

$$x = 10$$

$$o = 11$$

Le calcul est basé sur les éprouvettes rompues.

$\sigma_i$ (MPa)	I	$N_i$	$i.N_i$	$I^2.N_i$
320	2	2	4	8
300	1	6	6	6
280	0	2	0	0
260				
	$\Sigma$	N=10	A=10	B=14

L'estimation  $m$  de  $\mu$  :

$$m = S_0 + d \left( \frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right)$$

$$= 280 + 20 \left( \frac{10}{10} - \frac{1}{2} \right)$$

$$m = 290 \text{ N/mm}^2$$

L'estimation  $s$  de l'écart-type  $\sigma$  de la courbe de réponse à la contrainte :

$$S = 1,62d \left( \frac{NB - A^2}{N^2} + 0,029 \right)$$

$$= 1,62 * 20 \left( \frac{140 - 100}{100} + 0,029 \right)$$

$$S = 13,89 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{On a : } \frac{NB - A^2}{N^2} = 0,4 > 0,3$$

Donc l'équation (2) peut être utilisée.

### Précision de $m$ et $S$

L'estimation  $m$  de  $\mu$  est distribuée avec un biais négligeable et un écart-type :

$$\sigma_m = \frac{G}{\sqrt{N}}$$

$$G = 1 + \frac{d}{8\sigma}$$

$$G = 1.1799$$

$$\Rightarrow \sigma_m = 0.01799$$

On a :  $\frac{1}{2} < \frac{d}{\sigma} = 1.43 < 2$

Donc l'estimation  $m$  de  $\mu$  est satisfaisante.

et on a aussi :  $1 < \frac{d}{\sigma} = 1.43 < 1.5$

Donc l'estimation  $s$  de  $\sigma$  est satisfaisante.

### IV.5. Recherche de la durée de vie

L'allure générale du diagramme (S, N) est donnée par les résultats des essais de la méthode de reclassement des données et la courbe de Wöhler est représentée sur la figure IV.1.

Pour ajuster cette courbe, on utilise l'équation de Stromeier. Cette équation est nettement plus réaliste que celle de Wöhler et s'écrit sous la forme :

$$\text{Log } N = a - b \text{Log } (\sigma - \sigma_D)$$

Avec :

a et b : deux constantes inconnues ;

$\sigma_D$  : limite d'endurance estimée à  $10^6$  cycles ;

$N$  : nombre de cycles à rupture ;

$\sigma$  : amplitude de la contrainte appliquée.

L'estimation de a et b se d'après les résultats expérimentaux. Pour cela, on peut appliquer la méthode des moindres carrées.

La forme linéaire de l'équation de Stromeyer est :

$$\text{Log } N = a - b \text{Log } (\sigma - \sigma_D)$$

$$Y = A + BX$$

Avec :

$$Y = \text{Log } N \text{ et } X = \text{Log } (\sigma - \sigma_D) \text{ à condition que : } \sigma - \sigma_D > 0.$$

Pour chaque valeur de  $\text{Log } N_i$  et de  $\sigma_i - \sigma_D$ , on a :

$$Y_i = A + BX_i$$

La résolution du système linéaire à deux équations :

$$B \sum_{i=1}^n x_i^2 + A \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i = 0$$

$$B \sum_{i=1}^n x_i + n.A - \sum_{i=1}^n y_i = 0$$

Nous permet de déterminer A et B.

Il reste à déterminer les quantités :

$$\sum_{i=1}^n x_i^2, \sum_{i=1}^n x_i, \sum_{i=1}^n x_i y_i \text{ et } \sum_{i=1}^n y_i$$

Le tableau IV.1 montre comment effectuer le calcul de ces quantités :

**Tableau IV.1.** Calcul des quantités :  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $x_i \cdot y_i$  et  $x_i^2$

N°éprouvette	$\sigma_i - \sigma_D$	$\text{Log } \sigma_i - \sigma_D$ $x_i$	Nombre de cycles N	$\text{Log } N_i = y_i$	$x_i \cdot y_i$	$x_i^2$
01	90	1.9542	36647	4.5640	8.9189	3.8188
02	70	1.8450	52698	4.7217	8.7115	3.4040
03	50	1.6989	105516	5.0233	8.5340	2.8862
04	30	1.4771	354651	5.5498	8.1976	2.1818
05	10	1	776715	5.8902	5.8902	1

On a :

$$n = 5 ; \sum_{i=1}^5 x_i = 7.9752 ; \sum_{i=1}^5 y_i = 25.7490 ; \sum_{i=1}^5 x_i \cdot y_i = 40.5223 ; \sum_{i=1}^5 x_i^2 = 13.2910$$

Le système d'équation devient alors :

$$13.2910 B + 7.9752 A - 40.5223 = 0$$

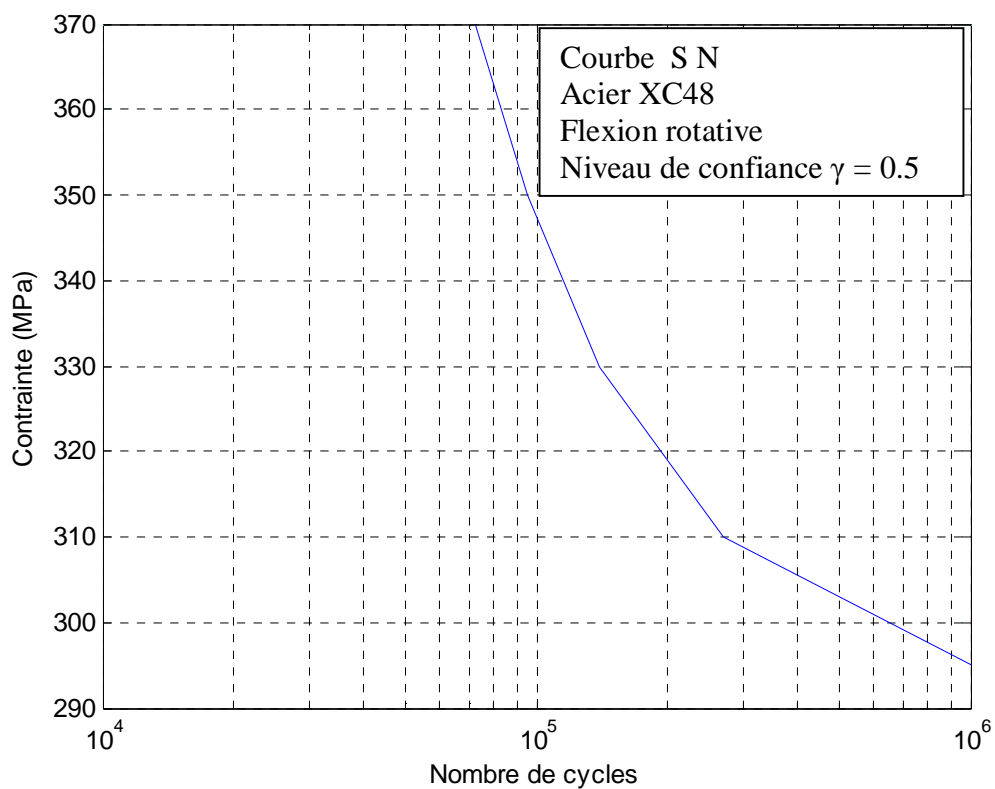
$$7.9752 B + 5 A - 25.7490 = 0$$

La résolution de ce système nous donne les résultats suivants :

$$B = -0.9555 \quad \text{et} \quad A = 6.6734$$

La fonction de lissage devient alors :

$$\text{Log } N = 6.6734 - 0.9555 \text{ Log } (\sigma - 290)$$



**Figure IV.2.** *Tracé de la courbe de Wöhler ajustée*

## CHAPITRE V

### ANALYSE PROBABILISTE & FIABILITE

La dispersion expérimentale observée lors des essais de fatigue, et ceci, quel que soit les précautions prises, est un fait constaté depuis que les essais de fatigue existent [3].

Notre but, est de voir comment peut-on utiliser les courbes de Wöhler probabilisées dans un concept fiabiliste?

#### V.1. Fatigue et probabilités

Parmi toutes les caractéristiques d'une distribution de variables aléatoires qui existent, nous en conserverons trois : la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation.

##### V.1.1. Moyenne arithmétique

C'est ce qu'on appelle une caractéristique de tendance central ; elle est définie par :

$$m = \frac{1}{n} \sum_i x_i$$

$n$  : est le nombre d'observation de la population.

*Nota* : pour un échantillon de population, la moyenne s'écrit  $\bar{x}$ .

Pour notre cas (pour les lots 2, 3 et 4) la population est les niveaux de charge et on a vu que les essais ont été effectuées sur quatre niveaux de charge (260, 280, 300 et 320 MPa) la moyenne sera :

$$m = 290 \text{ MPa}$$

##### V.1.2. Ecart-type

La dispersion, ou l'étalement des observations de la population est généralement caractérisée par l'écart-type vrai ; celui-ci est défini comme la racine carrée de la variance,

c'est-à-dire la racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre chaque

observation et leur moyenne arithmétique :  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - m)^2}{n}}$

*Nota* : les essais étant réalisés à partir d'un échantillonnage exhaustif dans une population de moyenne  $m$  et d'écart-type  $\sigma$  inconnus, il est très généralement calculé l'écart-type empirique  $s$  tel que :

$$s = \sqrt{\frac{n \sum_i x_i^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}}$$

Donc pour notre cas :  $s = 25.81$

### V.1.3. Coefficient de variation

Le coefficient de variation, nombre sans dimension, est défini comme étant le pourcentage du rapport de l'écart-type par la moyenne, soit pour un échantillon exhaustif d'une population :

$$v\% = 100 \frac{s}{x}$$

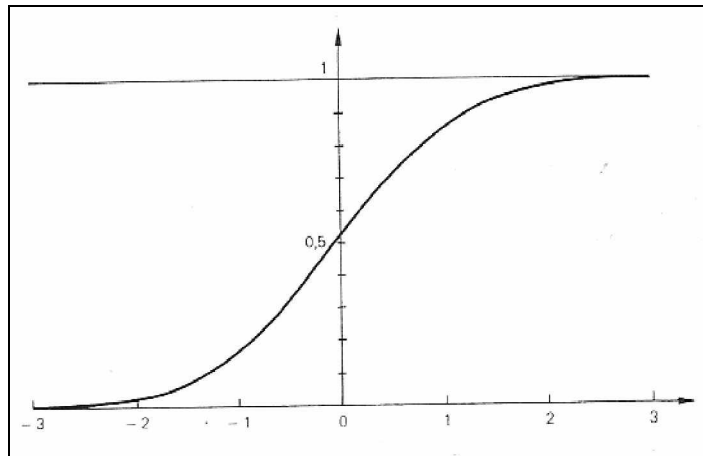
Donc pour ce présent travail :  $v\% = 8.90$

### V.1.4. Nouveau concept de la courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler étant tracée « au mieux » entre un certain nombre de points expérimentaux. Elle ne représente plus, dans un concept probabiliste, que la frontière séparant le domaine où la probabilité de rupture est inférieure à 50% à gauche de la courbe, du domaine où la probabilité de rupture est supérieure à 50% à droite de la courbe.

Pour le concepteur qui réalise des pièces devant avoir le moins possible de « chances » de se rompre, le domaine à utiliser est, bien évidemment, celui de gauche.

Il est donc nécessaire de quantifier ce domaine en probabilités de rupture et donc d'utiliser les lois de probabilités.



**Figure V.1.** Concept probabiliste de la courbe de Wöhler [3]

### V.1.5. Distribution statistique des variables aléatoires continues : contrainte et temps

Il est couramment admis, et cela est vérifié par l'expérience que :

1° la distribution de la contrainte suit la loi normale ou loi de *Laplace-Gauss* pour un nombre de cycles donné, ce qui en particulier, est valable pour la limite de fatigue ;

2° la distribution du nombre de cycles à rupture suit la loi log-normale pour une contrainte donnée, autrement dit que les logarithmes des nombres de cycle à rupture suivent la loi normale [3].

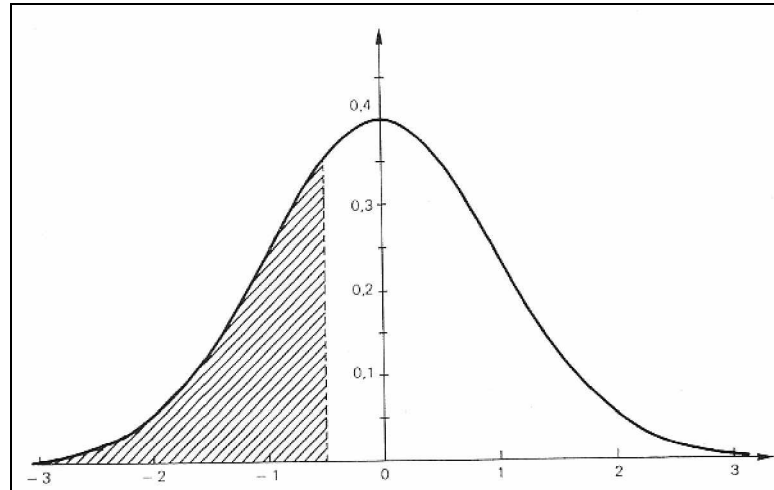
Avant d'aller plus loin, il est nécessaire de définir ce qu'est une loi normale.

### V.1.6. Rappels succincts des caractéristiques d'une loi normale

#### V.1.6.1. Fonction densité de probabilité de la loi normale centrée réduite

Si une variable aléatoire suit une loi normale, cette loi est entièrement définie par la moyenne  $m$  et l'écart-type  $\sigma$  de la population. La loi s'écrit alors  $N(m, \sigma)$ .

Si on note  $x$ , la réalisation de l'événement, il est toujours possible d'introduire la variable aléatoire  $u = \frac{x - m}{\sigma}$ . Cette opération permet d'utiliser les propriétés de la loi normale centrée réduite qui s'écrit  $N(0, 1)$  est  $F(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}}$  et se présente sous la forme de la courbe en cloche symétrique représentée ci-dessus.



**Figure V.2.** Densité de probabilité de la loi  $N(0, 1)$  [3]

### V.1.6.2. Fonction de répartition

La fonction intégrale ou fonction de répartition s'écrit [3] :

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(u) du$$

Elle traduit la probabilité qu'a la variable  $Z$  représentant la population totale d'être inférieure à une certaine valeur  $x$ . Son allure est représentée dans la figure V.3.

En termes de défaillance, donc on utilisant le temps comme variable aléatoire et ceci sur un plan général, quelle que soit la loi suivie par cette variable aléatoire, la fonction de répartition  $F(t) = \int_0^t f(u).du$  exprime la probabilité qu'a l'événement de se produire avant l'instant  $t$ .

Cette fonction est tabulée

## V.2. Tracé expérimental des courbes d'équiprobabilité

### V.2.1. Notion de niveau de confiance

Il est couramment admis, et vérifié pratiquement par l'expérience que :

- la distribution de l'effort est normale pour un nombre de cycle donné.
- la distribution du logarithme des nombres de cycles ( $\log N$ ) est normale pour un effort donné [2].

Ces deux propriétés sont extrêmement précieuses, car connaissant la moyenne  $m$  et l'écart-type  $\sigma$  de la population entièrement expérimentée, il est possible de déterminer le pourcentage de rupture au-delà d'un certain nombre d'écart-types à partir de la moyenne [3], en se référant aux tables de la loi normale centrée réduite, donc d'effectuer l'opération :

$$m - \mu\sigma$$

Exemple :

$m - 1\sigma$  correspond à 15.87% de ruptures

$m - 1.28\sigma$  >> 10.00% >>

$m - 2.33\sigma$  >> 1.00% >>

$m - 3.09\sigma$  >> 0.10% >>

Mais les essais sont réalisés à partir d'un échantillonnage exhaustif dans une population de moyenne  $m$  et écart-type  $\sigma$  inconnus.

Les résultats obtenus sont donc uniquement valables pour un niveau de confiance  $\gamma = 0.5$  en remplaçant  $m$  par la moyenne  $\bar{x}$  de l'échantillon et  $\sigma$  par l'écart-type empirique  $s$  de cette échantillon.

Vouloir ajuster les courbes d'équiprobabilité de rupture représentatives de la population à partir de cet échantillon revient alors à introduire un niveau de confiance supérieur à 0.5.

### V.2.2. Conséquence de la prise en compte d'un niveau de confiance

Une telle opération va :

- diminuer la contrainte admissible pour une probabilité de rupture donnée, ce qui revient à effectuer :

$$\bar{x} - k s \text{ au lieu de } m - \mu\sigma \text{ avec } k > \mu$$

- déterminer l'intervalle de confiance contenant la vraie valeur de la moyenne  $m$ .

Le problème revient donc à :

- déterminer un nombre  $k$  tel que la probabilité de la variable aléatoire  $\bar{x} - ks$  de ne pas dépasser  $m - ks$ , soit exactement  $\gamma$  ; ces nombres  $k = f(p, n, \gamma)$  sont donnés au tableau **(voir annexe : III)**
- accepter un risque  $1-\gamma$  que l'intervalle de confiance ne contienne pas les vraies valeurs de la moyenne  $m$  à partir de risques limites  $\beta_1 = \frac{1-\gamma}{2}$  et  $\beta_2 = \frac{1+\gamma}{2}$ . Ces limites sont tabulées à partir de la loi de Student-Fischer **(voir annexe : IV)** et de déterminer  $t_\beta$  en fonction du nombre de degrés de liberté  $\nu = n-1$ . L'intervalle de confiance de la moyenne  $m$  a alors comme limites :

$$\bar{x} + t_{\beta_1} \frac{s}{\sqrt{n}} \text{ et } \bar{x} + t_{\beta_2} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

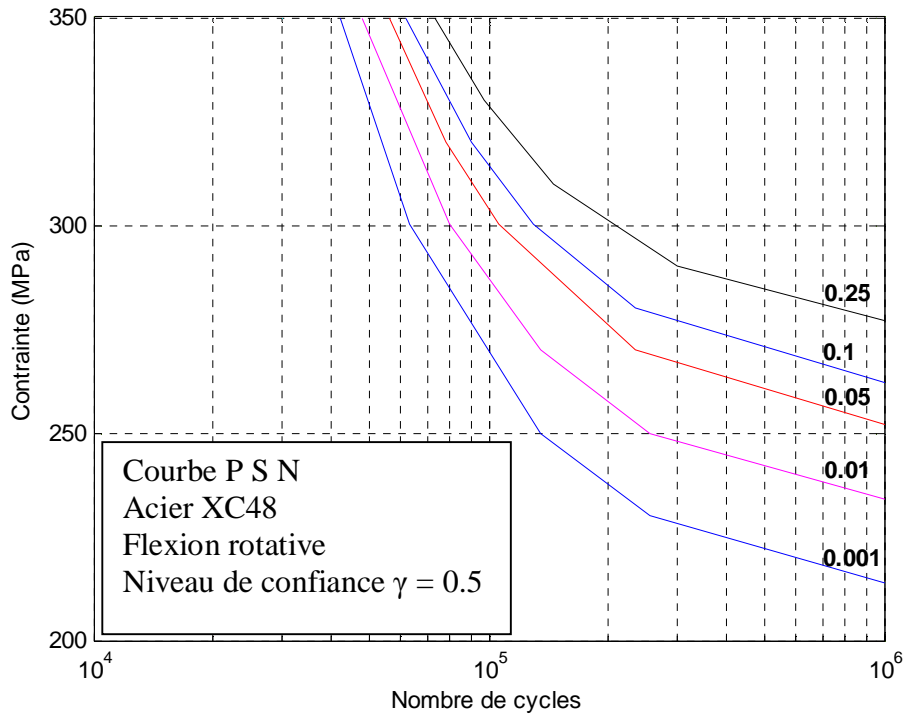


Figure V.3. Courbes d'équiprobabilité de rupture pour un niveau de confiance  $\gamma = 0.5$

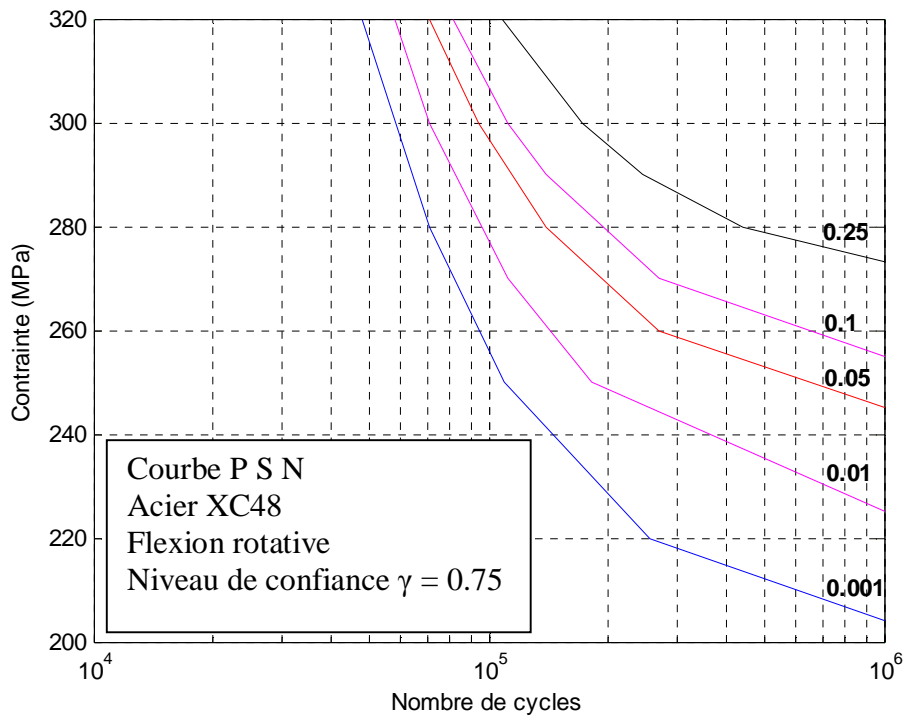


Figure V.4. Courbes d'équiprobabilité de rupture pour un niveau de confiance  $\gamma = 0.75$

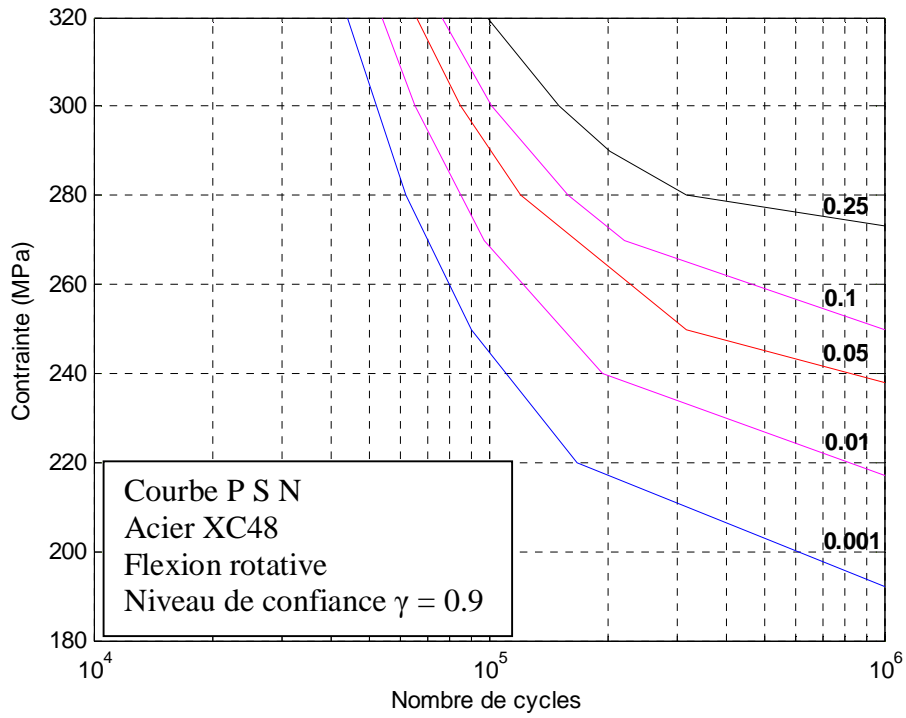


Figure V.5. Courbes d'équiprobabilité de rupture pour un niveau de confiance  $\gamma = 0.9$

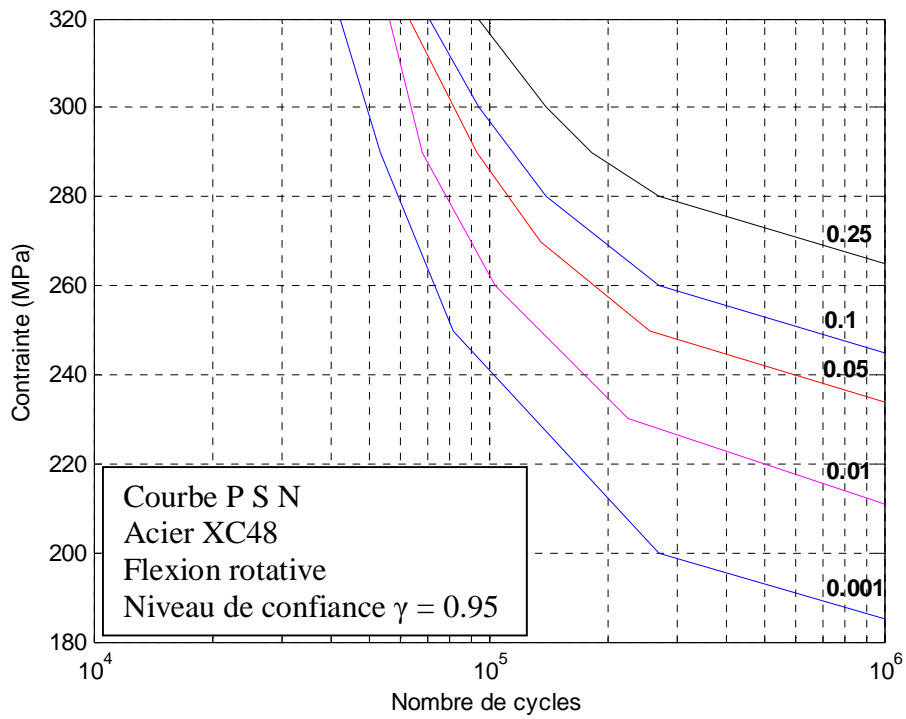


Figure V.6. Courbes d'équiprobabilité de rupture pour un niveau de confiance  $\gamma = 0.95$

### V.3. Utilisation dans un contexte fiabiliste

#### V.3.1. Définition de la fiabilité

La fiabilité est la probabilité pour qu'un dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions données, pendant un temps donné.

#### V.3.2. Fiabilité des courbes d'équiprobabilité de rupture

Tous les éléments sont alors en place dans des courbes d'équiprobabilité de rupture :

- « pendant un temps donné » est représenté par le nombre de cycles ( $\log N$ ) en abscisses ;
- « dans des conditions données » est représenté par l'effort ou la contrainte en ordonnées ;
- « la probabilité » est représentée par les diverses courbes paramétrées en probabilité de non rupture avec un niveau de confiance donné.

C'est ainsi que pour l'acier testé (XC48) dont les résultats constituent un des supports de cette étude, les essais dynamiques ont été réalisés dans cet état d'esprit en déterminant les courbes d'équiprobabilité de rupture.

#### V.3.3. Utilisation des courbes d'équiprobabilité de rupture dans un concept fiabiliste

Dans le cas où une rupture ou un échappement de charge peut avoir des conséquences humaines graves, une sécurité est exigible soit, par exemple, fiabilité de  $10^{-3}$  ( $p = 0.001$ ) avec un niveau de confiance  $\gamma = 0.95$ .

Dans le cas où une rupture ou un échappement de charge ne risque d'avoir que des conséquences techniques mineures, il peut n'être demandé qu'une fiabilité relativement faible, par exemple de 0.75 ( $p = 0.75$ ) avec un niveau de confiance également faible, par exemple  $\gamma = 0.75$ .

##### V.3.3.1. Fiabilité en temps pour un taux de travail donné

La question qui se pose, sous une charge donnée, au bout de combien d'effort répétés est : doit-on remplacer la pièce ?

La réponse est implicite après traitement et tracé des courbes d'équiprobabilité de rupture sur lesquelles la réponse est directement lue.

### V.3.3.2. Fiabilité en taux de travail pour un temps donné

Inversement, supposons que les pièces soient vendues pour  $10^6$  manœuvres, quel doit être le taux de travail maximal admissible pour le cas envisagé ?

Comme précédemment, l'exploitation des courbes d'équiprobabilité de rupture permet de répondre à la question.

## V.4. Exemple numérique

### V.4.1. Calcul du nombre de cycles à rupture $N_R$ pour un effort et une probabilité de rupture donnée

Supposons que, pour des pièces travaillant sous un effort de 300 MPa, nous recherchions le nombre de cycles  $N_R$  pour lequel il est demandé une probabilité de rupture de 0.1% avec un niveau de confiance  $\gamma = 0.95$ . Autrement dit, nous acceptons 5 «chances» sur 100 ( $\gamma = 0.95$ ) de nous tromper, en affirmant qu'une seule et unique pièce sur 1000 utilisées sous  $\sigma = 300$  MPa risque de se rompre avant le nombre de cycles noté  $N$  (0.001, 0.95).

Pour les conditions choisies, l'annexe III indique que  $k = 4.276$

Il vient donc :  $N(0.001, 0.95) = 49000$  cycles

On constate donc que, raisonner en termes de probabilité de rupture, conduit à faire chuter de façon importante, mais raisonnée, le domaine admissible [passage de  $N(0.5, 0.5) = 523000$  cycles à  $N(0.001, 0.95) = 49000$  cycles].

### V.4.2. Calcul de l'intervalle de confiance de la moyenne $m$ de la population

Toujours dans les mêmes conditions que précédemment nous désirons connaître l'intervalle de confiance (I. C.) de la moyenne  $m$  de la population avec un niveau de confiance  $\gamma = 0.95$ .

Autrement dit, nous acceptons 5 «chances» sur 100 de nous tromper en affirmant que la vraie moyenne  $m$  de la population des pièces se trouve comprise dans l'intervalle :

$$\left[ \bar{x} + t_{\beta_1} \frac{s}{\sqrt{n}} ; \bar{x} + t_{\beta_2} \frac{s}{\sqrt{n}} \right]$$

Pour les conditions choisies, c'est-à-dire :

$$n = 21 \text{ soit } \nu = n - 1 = 20$$

$$\gamma = 0.95$$

$$\beta_1 = \frac{1 - \gamma}{2} = 0.025$$

$$\beta_2 = \frac{1 + \gamma}{2} = 0.975$$

L'annexe IV indique que :

$$t_{\beta_1} = - 2.09$$

$$t_{\beta_2} = + 2.09$$

L'intervalle de confiance de la moyenne est donc compris entre :

$$N_{\min} = 48000 \text{ cycles et } N_{\max} = 59000 \text{ cycles}$$

Au risque de 0.05 de se tromper, la vraie moyenne de la population des pièces à  $\sigma = 300$  MPa est comprise entre 48000 cycles et 59000 cycles.

### V.5. Analyse de défaillance

Une analyse de la défaillance se déroule en trois étapes successives :

1. enquête préliminaire,
2. analyse morphologique de la pièce défaillante,
3. examens complémentaires en laboratoire.

### V.5.1. L'enquête préliminaire

La défaillance d'une pièce ou d'un organe de machine peut avoir débuté dans un passé quelquefois lointain ou s'être produite brutalement [9]. Il est donc nécessaire d'adopter une démarche prudente pour son analyse et de recueillir tout d'abord le maximum d'information sur :

- ses circonstances,
- les conditions de service,
- l'environnement,
- les incidents antérieurs.

Il faut également rassembler toutes les données concernant le matériau, sa nuance, son origine, les traitements mécaniques, thermiques, thermochimiques et de surface que la pièce a subit.

### V.5.2. Analyse morphologique de la pièce défaillante

Cette analyse se fait à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe, en s'efforçant d'examiner attentivement l'aspect général de la dégradation et les accidents de surface de façon à recueillir tous les renseignements et indices susceptibles de permettre :

- de classer la défaillance,
- de définir le mode de chargement et le type de sollicitation,
- de localiser la zone d'amorçage,
- d'orienter les examens complémentaires en laboratoire (microscopie électronique, optique, essais mécaniques, etc.).

### V.5.3. Examen complémentaire en laboratoire

Ces examens ont pour but de compléter l'analyse morphologique. Ils permettent entre autre [9] :

- de confirmer ou d'apporter des précisions sur les causes d'amorçage et les modes de propagation des fissures,

- de vérifier la conformité des matériaux aux spécifications, du point de vue composition chimique, structure ou caractéristique mécaniques.

Les moyens utilisés pour effectuer ces examens complémentaires sont essentiellement :

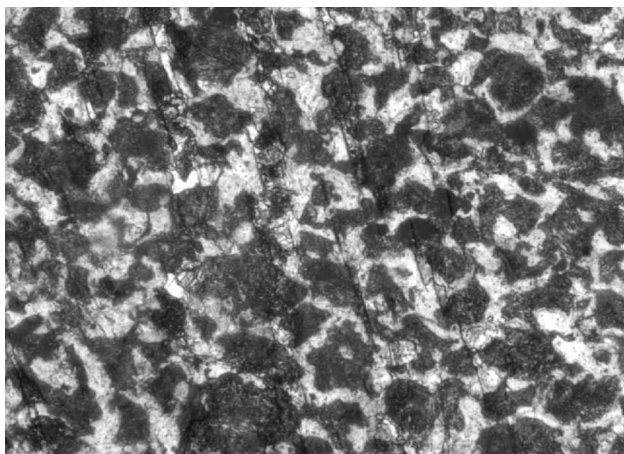
- la microscopie optique et électronique,
- l'analyse chimique,
- les essais mécaniques.

La confrontation des résultats des examens complémentaires [9], avec ceux de l'analyse morphologique et des informations rassemblées au cours de l'enquête préliminaire, doivent permettre d'atteindre le but final, qui est de déterminer les remèdes et les moyens préventifs, donc de remettre en cause séparément ou ensemble :

- la conception mécanique de la pièce,
- le choix du matériau et des traitements thermiques,
- le contrôle des conformités produit et pièce,
- les conditions d'utilisation.

#### V.6. Etude micrographique et analyse morphologique

Un examen microscopique (microscope optique modèle : *Leitz WETZLAR*) montre que la structure est ferrito-perlitique ; perlite lamellaire.



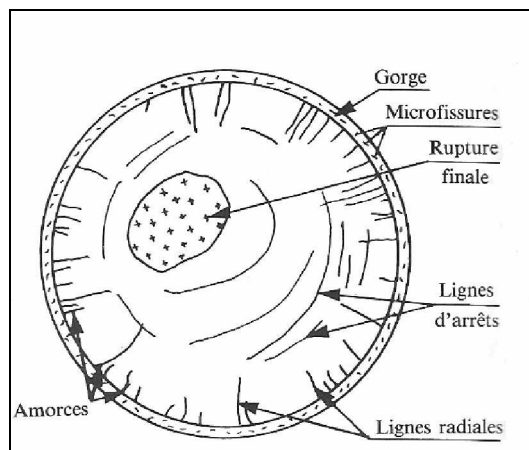
**Figure V.7.** Structure métallographique de l'acier XC48

La présence d'une zone lisse périphérique et d'une zone centrale grenue est caractéristique des ruptures développées en fatigue sous sollicitation de flexion rotative.

La présence de nombreuses lignes radiales sur tout le pourtour de la cassure témoigne de la multitude d'amorçages superficiels [9].

La position centrale de la rupture finale est liée aux fortes concentrations de contraintes qui affectent la pièce au niveau de la gorge, mais sa faible étendue indique que la pièce est peu chargée.

L'examen de la zone d'amorçage permet enfin de constater la présence de nombreuses microfissures à la surface de la gorge. Ces défauts, provoqués lors de l'usinage (sans doute par le «broutage» de l'outil), sont à l'origine de la rupture qui s'est ensuite développée sous l'effet des sollicitations normale de service (cf. figure V.8).



**Figure V.8.** Caractéristiques des ruptures développées en fatigue sous sollicitation de flexion rotative [9]

Un tableau récapitulatif des faciès de rupture est schématisé en **annexe : V**.

Et voici quelques faciès de rupture observés lors des essais de fatigue :



**Figure V.9.** Faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 260 MPa après  $3 \cdot 10^6$  cycles



**Figure V.10.** *Faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 280 MPa après  $10^6$  cycles*



**Figure V.11.** *Faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 300 MPa après 12000 cycles*



**Figure V.12.** *Faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 320 MPa après 18000 cycles*

## Conclusion

Ce travail, a été consacré à une étude expérimentale sur le comportement en fatigue en flexion rotative d'un acier d'usage général (**XC48**).

Cette étude a pour but de connaître les caractéristiques de fatigue de cet acier, telle que la limite fatigue à N cycles ( $10^6$  cycles).

Pour ce faire, nous avons donc réalisé des essais dynamiques sur des éprouvettes cylindriques entaillés, par des différentes méthodes.

L'étude a comporté les étapes suivantes :

- vérification de la conformité de la nuance (composition chimique, caractéristiques mécaniques, etc.), et nous avons trouvé que la nuance est conforme aux normes de livraison,
- réalisation des essais de fatigue par la méthode de reclassement des données sur 01 lot de 08 éprouvettes qui a donné comme limite de fatigue à  $10^6$  cycles 280 MPa. Cette dernière a été utilisée comme une charge du premier niveau pour les essais suivants, qui sont réalisés par une méthode qui donne des résultats plus précis ; cette méthode (reclassement des données) permet de tracer point par point la courbe de Wöhler,
- réalisation des essais de fatigue par la méthode de l'escalier sur 03 lots de 21 éprouvettes pour chacun, et qui ont donné les résultats suivants : 284 MPa, 286 MPa et 290 MPa. On voit bien ici, une dispersion des résultats obtenus,
- des analyses probabilistes ont été faites sur ces résultats par des bases mathématiques et des tableaux qui permettent au concepteur d'utiliser cette dispersion mesurée ; un exemple numérique a été illustré,
- l'ajustement de la courbe de Wöhler, tracée par les résultats des essais réalisés par la méthode de reclassement des données, permet de tracer les courbes d'équiprobabilité de rupture qui peuvent être utilisés dans un concept fiabiliste.

La dispersion expérimentale des résultats, observée lors des essais fatigue est la résultante de plusieurs facteurs qui influent sur le phénomène de fatigue tels que : les facteurs

métallurgiques, géométriques, conditions de surface, conditions de sollicitation, l'influence de l'environnement, etc.

Durant cette étude plusieurs solutions ont été proposées pour éliminer ou minimiser l'influence de ces facteurs sur la limite de fatigue. Nous recommandions au concepteur de les prendre en considération, citons :

- Ø le choix du matériau à utiliser lors de la conception de la pièce,
- Ø la propreté du matériau augmente l'endurance,
- Ø l'état de surface a une influence importante sur la limite d'endurance (une pièce présentant un état de surface fin est plus endurante que la même pièce avec un état de surface grossier),
- Ø traitement de durcissement sur les couches superficielles,
- Ø développement de contraintes résiduelles de sens favorable,
- Ø diminution de la température du milieu de travail de la pièce,
- Ø éviter un environnement agressif (air humide par exemple).