



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : productique

Thème :

Contribution à l'étude de la fatigue des matériaux

Proposé et dirigé par :
M^{elle} benkharbache.H

Présenté :
Boudilmi
Abd el Hakim

Année Universitaire : 2015 / 2016

N° d'ordre : GM/...../2016

ملخص :

هذا العمل يتطرق لدراسة تجريبية لسلوك الاجهاد بالانحناء الدوراني لمواد من نتاج الوطني.

بإجراء العديد من التجارب على عدد من العينات المتماثلة بإجهادات دورية متماثلة ايضا, نستنتج خصائص مقاومة الاجهاد لهذا المواد وذلك بمعرفة :

- مقاومة الاجهاد الحديدية تحت اجهادات دورية محددة,
- التحمل الحدي,
- التمثيل البياني لسلوك المواد عن طريق بعض الرسومات البيانية مثل : منحى وولر , المنحنيات متكافئة احتمال الانكسار , الخ.

الكلمات المفاتيح :

الاجهاد , الانحناء الدوراني , التحمل, مدة الحياة.

Résumé :

Ce travail concerne une étude expérimentale du comportement en fatigue par flexion rotative d'un matériau 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 matériau 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 matériau a été représenté graphiquement par la courbe de Wöhler les et les courbes d'équiprobabilité de rupture.

Mots clés :

Fatigue, flexion rotative, endurance, durée de vie.



Remerciements

Tout d'abord, louange à « Allah » qui m'a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et m'a inspiré les bons pas et les justes reflexes Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti. Qu'il me soit permis ici de dire ma gratitude à ceux qui m'ont donné beaucoup de soin à l'élaboration de ce modeste travail et m'ont guidé sur le bon chemin, en espérant que ce mémoire soit le reflet de la bonne formation que j'ai reçue.

*Je tiens à remercier vivement mon encadreur **benkherbache.h** pour le soutien et l'aide qu'il n'a jamais manqué de m'apporter, et mes vifs remerciements vont aussi mes amis :*



mohamed, Nasser, Sofiane, belkhacem, et tout les ingénieur dans

Les laboratoire de génie Mécanique

à mes attentes ; qu'elles trouvent ici l'expression de mon amitié et sympathie. Et tous les enseignants Département de génie mécanique

Enfin, je remercie les membres de jury pour avoir

Accepté d'évaluer le présent travail



Dédicaces

Je dédie ce mémoire

*A ma chère mère, et mon cher père, pour tout le mal qu'il se
sont donnés afin de me faciliter ma tâche*

*à mes Sœurs **et** mes frère*

*A tous **mes amis** dans la faculté de technologies*



Table des matières

Notations principales

Introduction générale 1

Chapitre I

Propriétés mécaniques des matériaux

I.1. Induction 3

 I.2. propriétés des matériaux 3

 I.3. propriétés mécaniques des matériaux 4

 I .3.1. Essai de traction 4

 I .3.2. Les essais de dureté 5

 I .3.2.1. Essai de dureté Brinell..... 5

 I .3.2.2. Essai de dureté Rockwell 6

 I .3.2.3. Essai de dureté Vickers 7

 I .3.3. Essais de flexion 9

 I .3.4. Essai de résilience 10

 I .3.5. Essai de fatigue 12

 I .3.5.1. Essai de flexion rotative 12

 I .3.5.2. Essai de traction – compression 13

 I .3.5.3. Essai de torsion 13

CHAPITRE II

Etude du phénomène de fatigue

| | |
|---|----|
| II.1.Introduction | 14 |
| II.2.Fatigue et endurance | 14 |
| II.2.1. Définitions | 14 |
| II.2.2.Limite de fatigue | 15 |
| II.2.3.Limite d'endurance | 16 |
| II.2.4.Durée de vie | 16 |
| II.2.5.Contraintes appliquées | 16 |
| II.2.5.1.Contrainte nominale | 17 |
| II.2.5.2. Cycle de contrainte | 17 |
| II.2.5.3. Types de cycles de contraintes..... | 18 |
| II.3. Diagrammes représentatifs | 18 |
| II.3.1. Courbe de Wöhler | 18 |
| II.3.2. Courbes d'équiprobabilité de rupture | 20 |
| II.3.3. Diagramme de Haigh | 20 |
| II.3.4. Diagramme de Goodman-Smith | 22 |
| II.3.5. Diagramme de Roš..... | 23 |
| II.3.6. Diagramme de Moore-Kommers-Jasper | 24 |
| II.4. Fissuration par fatigue | 24 |
| II.4.1. Courbes de propagation des fissures | 24 |
| II.4.2. Expression de la vitesse de fissuration | 25 |

| | |
|--|----|
| II.5. Faciès caractéristiques des ruptures par fatigue | 26 |
| II.5.1- Faciès de fatigue à l'examen optique | 27 |
| II.5.2. Faciès de fatigue à l'examen microscopique..... | 27 |
| II.5.2.1 .Rupture Brutale (finale) | 27 |
| II.5.2.1 .1.Fragile | 27 |
| II.5.2.1 .2.Ductile | 27 |
| II.6. Facteurs d'influence | 29 |
| II.6.1. Facteurs métallurgiques | 30 |
| II.6.2. Facteurs géométriques | 31 |
| II.6.2.1. Influence de la dimension | 31 |
| II.6.2.2. Influence de l'entaille | 31 |
| II.6. 3. Conditions de surfaces | 32 |
| II.6. 3. 1 Influence de la nature de la surface | 32 |
| II.6. 3.2. Influence de la microgéométrie de la pièce | 32 |
| II.6.4. Conditions de sollicitation | 33 |
| II. 6.4.1. Nature des efforts | 33 |
| II.6.4.2. Effet de surcharge et de sous charge | 33 |
| II.6.4.3. Influence des contraintes résiduelles | 34 |
| II.6.4.4. Influence de la fréquence | 34 |
| II.6. 5. Influence de l'environnement | 34 |
| II.6. 5.1. Influence de la température | 34 |
| II.6. 5.2. Fatigue sous corrosion | 35 |

Chapitre III

Partie expérimentale

| | |
|--|----|
| III.1. But des essais de fatigue | 36 |
| III.2. Machine de l'essai de fatigue | 36 |
| III.3. Description de la machine | 37 |
| III.3.1. principe de l'essai | 38 |
| III.4. Eprouvette d'essai | 38 |
| III.5. Usinage d'éprouvette | 40 |
| III.6. Contrainte maximale de flexion | 40 |
| III.7. Etude de diagramme d'endurance des éprouvettes choisies | 41 |
| III.7.1. Essai sur l'éprouvette de type 1 | 42 |
| III.7.2. Essai sur l'éprouvette de type 2 | 44 |
| III.7.3. Essai sur l'éprouvette de type 3 | 47 |
| III.7.4. Essai sur l'éprouvette de type 4 | 49 |
| III.7.5. Essai sur l'éprouvette de type 5 | 52 |
| III.7.6. Essai sur l'éprouvette de type 6..... | 54 |
| III.8. Etude micrographique et analyse morphologique | 57 |

Conclusion générale60

Annexe

Annexe I.....61

Annexe II.....62

Bibliographie

Bibliographie.....63

Liste des figures

Chapitre I

| | |
|---|----|
| Figure. I.1. Diagrammes efforts-déformation..... | 4 |
| Figure I.2. Principe de dureté brinell | 6 |
| Figure I.3. Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle HRC, b) échelle HRB..... | 7 |
| Figure I.4. Principe de dureté Vickers..... | 8 |
| Figure I.5. L'essai de flexion d'un Poutre sur deux appuis | 9 |
| Figure. I.6 : Mouton-pendule de Charpy | 11 |
| Figure. I.7. Éprouvette de résilience | 11 |
| Figure.I.8. la machine essai de flexion rotative | 12 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Figure II.1. Cycle de contrainte de la fatigue | 15 |
| Figure II.2. Exemple de courbe de Wöhler | 19 |
| Figure II.3. Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques)..... | 20 |
| Figure II.4. Diagramme de Haigh (résultats théoriques) | 21 |
| Figure II.5. Différentes représentations de la courbe AB | 22 |
| FigureII.6. Digramme de Goodman-Smith (résultats théoriques)..... | 23 |
| Figure II.7. Diagramme de Roš(Résultats théoriques) | 23 |
| Figure II.8. Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers | 24 |
| Figure II.9. Courbe de fissuration donnant la longueur de la fissure selon le nombre de cycles et le niveau de contrainte | 25 |
| Figure II.10 Faciès de fatigue | 28 |
| Figure II.11. Schéma de la formation des cupules (a- Rupture normale b- Rupture par glissement..... | 28 |
| Figure II.12. Stries observées sur la surface de rupture d'une éprouvette de nickel technique rompue par fatigue après 212000 cycles (X 10000)..... | 30 |

Chapitre III

Figure III.1. La machine de l'essai de fatigue GUNT WP 140.....37

Figure III.2. Eprouvette d'essai de fatigue.....39

Figure III.3. point d'application de la charge F.....41

Figure III.4. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier XC35 (Rayon R=0.5).....43

Figure III.5. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier XC35 (Rayon R=2).....45

Figure III.6. Influence du changement de dimension (rayon).....46

Figure III.7. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier A60 (Rayon R=2).....48

Figure III.8. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier A60 (Rayon R=0.5).....50

Figure III.9. Influence de changement de dimension (rayon).....51

Figure III.10. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier AL6061 (Rayon R=0.5).....53

Figure III.11. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier AL6061 (Rayon R=2).....55

Figure III.12. Influence de changement de dimension (rayon).....56

Figure III.13. Caractéristiques des ruptures développées en fatigue sous sollicitation de flexion rotative de flexion rotative.....57

Figure III.14. Facies d'une éprouvette rupture rompue en XC35 de flexion rotative.....58

Figure III.15. Facies d'une éprouvette rupture rompue en A60 de flexion rotative.....58

Figure III.16. Facies d'une éprouvette rupture rompue en AL6061 de flexion rotative.....59

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau (II.1) Faciès de rupture en fatigue..... | 29 |
| Tableau III.1. Caractéristiques des éprouvettes de la machine WP 140 | 39 |
| Tableau III.2 : les résultats obtenus lors des essais..... | 42 |
| Tableau III.3 : les résultats obtenus lors de l'essai..... | 44 |
| Tableau III.4 : les résultats obtenus lors des essais..... | 47 |
| Tableau III.5 : les résultats obtenus lors des essais | 49 |
| Tableau III.6 : les résultats obtenus lors des essais | 52 |
| Tableau III.7 : les résultats obtenus lors des essais..... | 54 |

Notations principales

| Symbole | Désignation |
|-----------------|--|
| E | Module d'élasticité ou module d'Young |
| ε | 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 |
| ν | 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_σ | Rapport de contrainte |
| s | Ecart-type empirique |
| σ_{moy} | Contrainte moyenne |
| σ_a | Amplitude de la contrainte alternée |
| σ_{max} | Contrainte maximale |
| σ_{min} | Contrainte minimale |
| σ_D | Limite de fatigue |
| $\sigma_{D(N)}$ | Limite d'endurance à N cycles |

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale:

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 matériau (acier XC35 et A60 et l'aluminium AL 6061) 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, 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

INTRODUCTION GENERALE

Ce travail comporte trois chapitres :

- Le premier est une recherche bibliographique, qui se comporte des généralités sur les Propriétés mécaniques des matériaux est quelque essais mécaniques.
- le deuxième chapitre 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 troisième chapitre une recherche expérimentale dans laquelle une description du dispositif expérimental est donnée ainsi que les résultats obtenus.
- une conclusion générale finalise le travail.

CHAPITRE

I

CHAPITRE I

Propriétés mécaniques des matériaux:

I.1. Induction :

Nous définissons les matériaux comme les solides utilisés par l'homme pour la fabrication d'objets qui constituent le support de son cadre de vie.

Effet aucun objet ne peut être réalisé sans matériaux tous les secteurs de l'activité humaine dépendent du choix des matériaux, l'utilisation de ces matériaux pose la question du choix du matériau le mieux adapté aux applications envisagées.

Les critères de choix doivent tenir compte des facteurs suivants :

- Des fonctions principales de la construction. C'est à dire des modes de mise en charge de température, et condition générale d'utilisation.
- Du comportement intrinsèque du matériau : résistance à la rupture, l'usure, Conductibilité,...

Du prix de revient des diverses solutions possibles En service, les matériaux sont sollicités par les charges ou des forces provoquant des déformations il est important de connaître les conditions des déformations et des ruptures.

I.2. propriétés des matériaux :

Le comportement d'un matériau est caractérisé par sa réaction à une sollicitation, on définit une propriété d'un matériau comme étant la mesure d'un comportement par un essai. On peut distinguer trois catégories de propriétés Selon le type de sollicitation extérieure.

Les propriétés mécaniques : qui reflètent le comportement des matériaux de formes par des systèmes de forces.

Les propriétés physiques ; qui mesurent les comportements des matériaux soumis à l'action de la température.

Les propriétés chimiques : qui caractérisent le comportement des matériaux soumis à un environnement plus ou moins agressif.

I.3. propriétés mécaniques des matériaux :

Les propriétés mécaniques des matériaux sont mesurées par des essais mécaniques normalisés à l'aide d'éprouvette standard soumis à des conditions de mise en charge bien définies une éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usiné à des dimensions normalisés.

Les essais sont nombreux mais nous nous contentons de traiter seulement quelques types les plus utilisés. A partir d'essais de traction de dureté, de résilience et de fatigue on peut connaître les caractéristiques essentielles du matériau.

I .3.1.Essai de traction :

L'éprouvette de longueur initiale L_0 , de section S , subit une force croissante jusqu'à la rupture.

Le graphe traduit la relation entre les allongements de l'éprouvette et la force F .

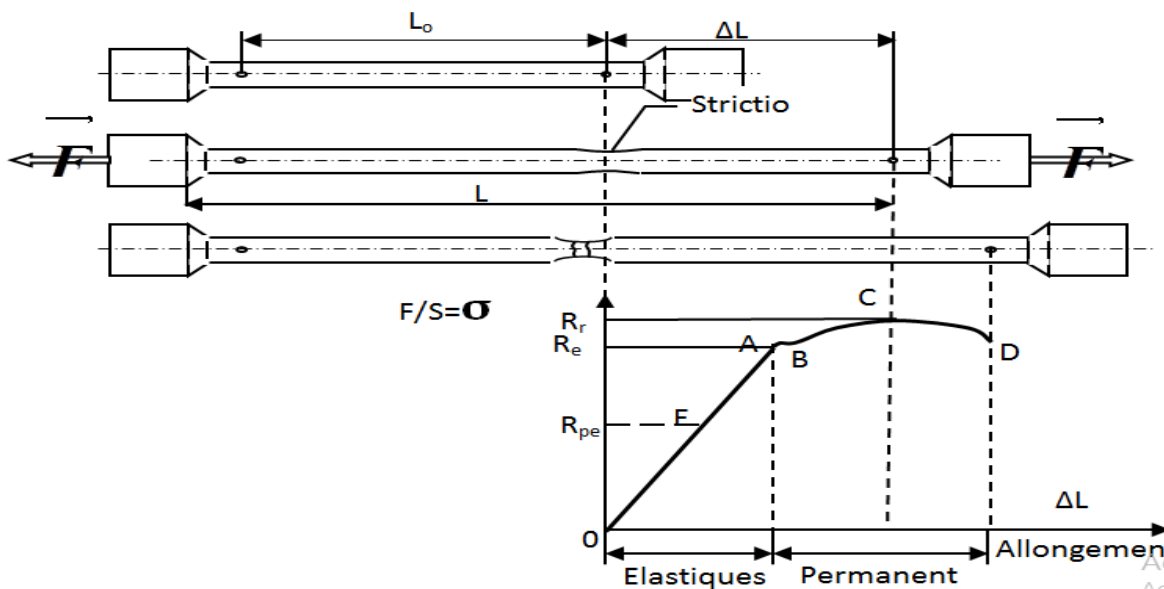


Figure. I .1. Diagrammes efforts-déformation[1].

R_e et R_m , sont exprimés en ($N.mm^{-2}$) sur le diagramme effort - déformation que représente (fig. I.1),

On observe les phases successives suivantes :

- Entre les points 0 et A une phase élastique ou la déformation réversible, et où il y a proportionnalité entre charge et déformation, au moins en première approximation c'est la loi de Hooke, $\sigma = E \cdot \epsilon$
- De A à B, une déformation permanente homogène appelée aussi déformation plastique répartie.
- De B à C la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène c'est la striction, on aboutit à la rupture en C [1].

I .3.2. Les essais de dureté :

La dureté quantifie la résistance d'un matériau à la pénétration sous une certaine charge F (valeur sans dimension) Elle est fonction de :

- déformations élastiques et plastiques.
- forces de frottements sur la surface du matériau.
- géométrie du pénétrateur.
- force appliquée.

I .3.2.1. Essai de dureté Brinell:

L'essai a été édité dès 1924. Il consiste à faire pénétrer dans le métal à tester, une bille polie de forme sphérique en acier trempé ou en carbure de tungstène (Fig. I.2). Le diamètre D utilisé peut valoir 1 mm, 2,5 mm, 5mm et 10mm. La charge appliquée sur le métal est maintenue pendant 15 à 30 s selon le solide Après l'annulation de la charge, la bille laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre d [1].

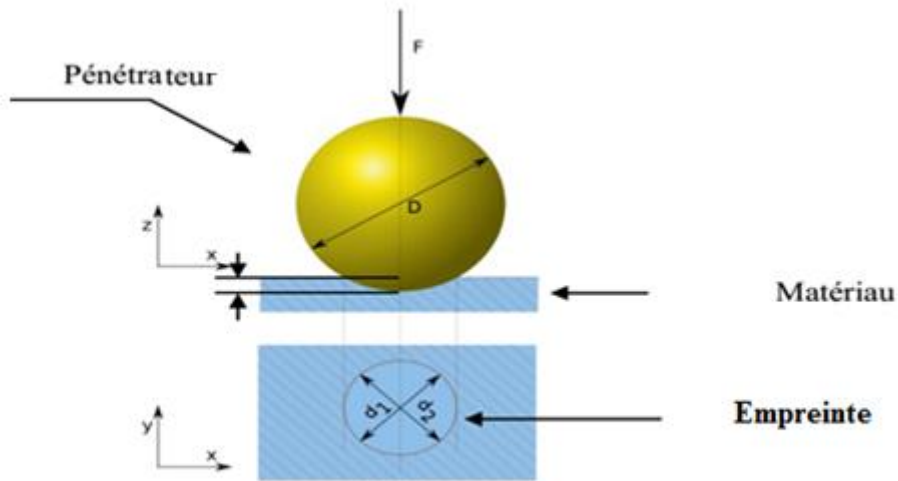


Figure I.2. Principe de dureté brinell [1].

La force f étant exprimée en (kgf), le diamètre de l'empreinte d en (mm^2) et la dureté Brinell HB est exprimée en (kgf/mm^2) selon la relation suivante.

$$\text{HB} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$\text{Avec } d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

I .3.2.2.Essai de dureté Rockwell :

L'essai consiste à mesurer la profondeur rémanente de l'empreinte indentée. Le pénétrateur de forme géométrique conique pour le critère HRC (fig. I.3a), ou bien sphérique pour le critère HRB (fig.I.3b) est appuyé sous faible charge, sur la surface à essayer et dans des conditions bien précises. Le pénétrateur conique est en diamant de section circulaire et d'angle au sommet 120° à pointe arrondie sphérique de rayon de 0,2mm. Le pénétrateur sphérique est une bille d'acier trempée polie de diamètre 1,588 mm ou 3,175mm [1].

L'essai se déroule en trois phases.

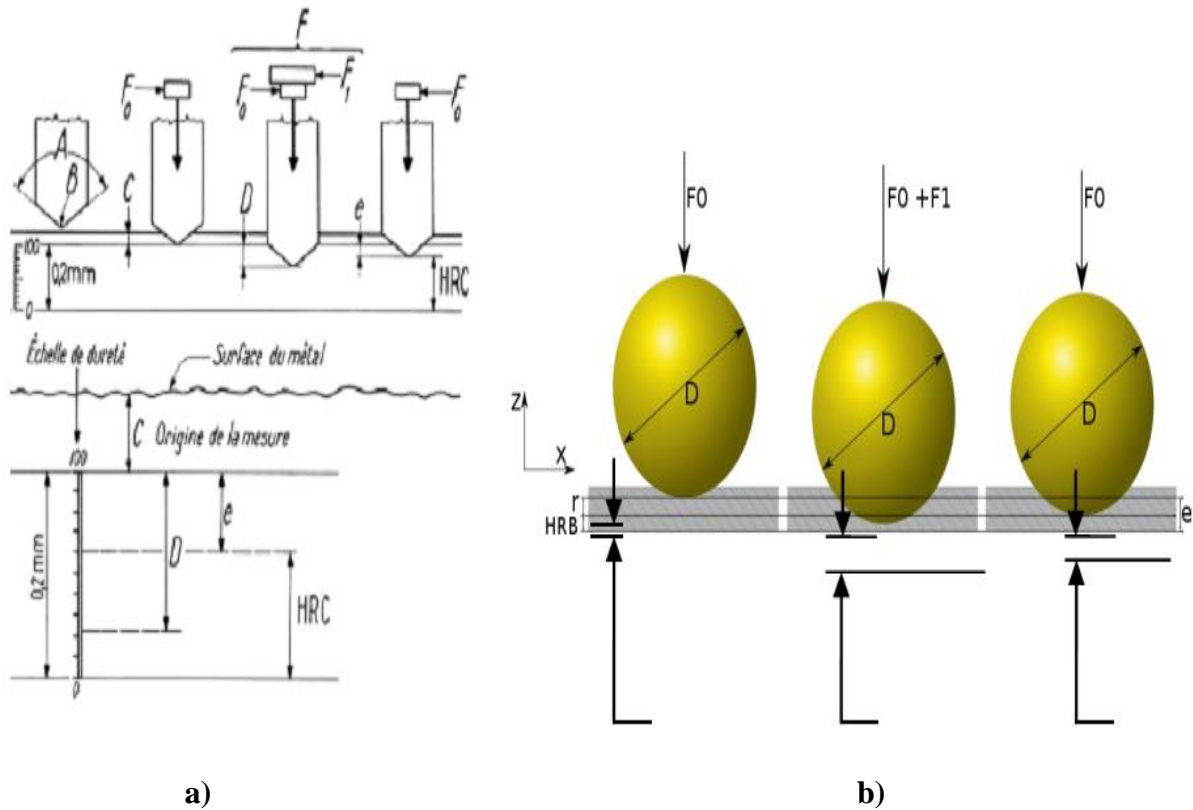


Figure I.3. Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle HRC, b) échelle HRB [1].

- Une phase I de pénétration initiale avant charge additionnelle : après application d'une charge initiale $F_0 = 98\text{N}$ (10 kgf). La profondeur de pénétration étant l'origine qui sera utilisée pour la mesure de la dureté.
- Une phase P de pénétration avec charge additionnelle : Sous la charge supplémentaire F_1 , le pénétreur s'enfonce d'une profondeur P.
- Une phase R de pénétration rémanente sans la charge additionnelle : La force F_1 est relaxée et on lit les indications de l'enfoncement.

I .3.2.3.Essai de dureté Vickers :

Il consiste à imprimer dans le métal testé une empreinte avec un pénétreur en diamant de forme géométrique pyramidale à base carrée et d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136° , sous l'action d'une force connue. On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétreur (fig. I.4).

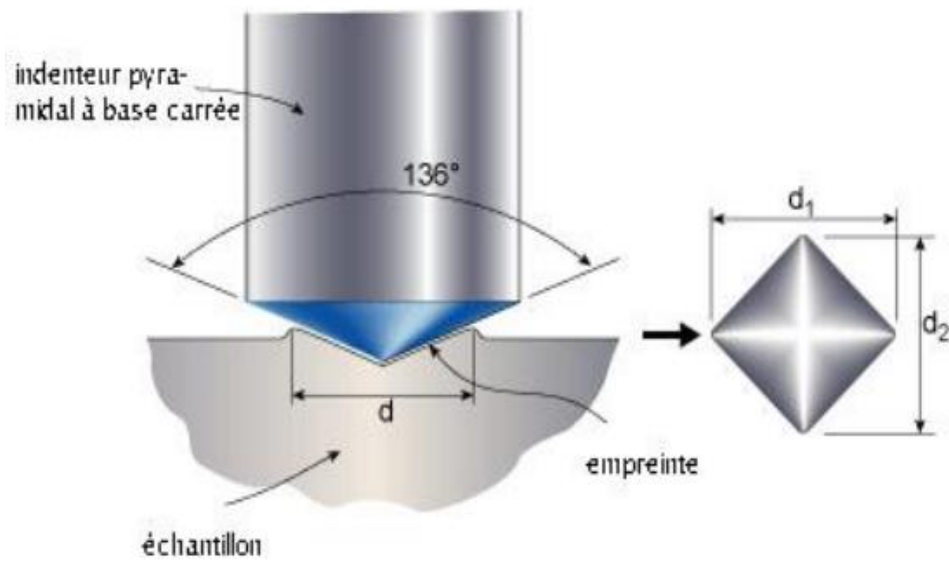


Figure I.4. Principe de dureté Vickers. [1].

Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons. Pour des raisons de fiabilité de l'essai, la force est choisie de telle manière à donner une empreinte ayant la diagonale moyenne inférieure aux deux tiers de l'épaisseur. D'autres sources préconisent que la profondeur de pénétration ne dépasse pas le huitième de l'épaisseur de la pièce à tester [2].

La force F étant exprimée en (kgf), le diamètre de l'empreinte d en (mm) et la dureté Vickers est exprimée en (kgf/mm^2) selon la relation suivante.

$$HV = \frac{1,8454P}{d^2}$$

$$\text{Avec } d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

L'essai de Vickers est celui qui fournit la plus grande diversité de renseignements. Il possède deux avantages principaux : être souvent non destructif et pouvoir être répété un grand nombre de fois ; c'est-à-dire se prêter à une interprétation statistique (dislocation des diagonales d'empreinte suivant une loi gaussienne) [2].

I.3.3. Essais de flexion :

Cet essai a pour but de déterminer la variation de la flèche (f_m) due à la charge qui s'applique au milieu qui développe une flexion simple (figI.5).

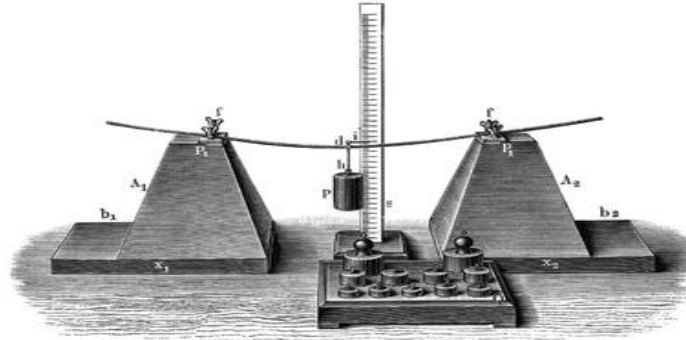


Figure I.5. L'essai de flexion d'un Poutre sur deux appuis [3].

En variant les nuances de la poutre et leur dimension pour mesurer expérimentalement (f_m) de la déterminer théoriquement puis faire une identification entre les deux résultats (f_m)_{th}=(f_m)_{exp} puis extraire la valeur de "E"[3].

On démontre théoriquement que :

$$f_m = \frac{F.l^3}{48.E.I_z}$$

$$\text{Avec } I_z = \frac{bh^3}{12}$$

$$\Rightarrow f_m = \frac{F.l^3}{4.E.b.h^3}$$

$$\text{Ce qui donne } E_p = \frac{F.l^3}{48.f_m.I_z}$$

F : Force concentrée appliquée au point (A).

l : distance mesure entre les appuis (mm).

b : base de la poutre (mm).

h : hauteur de la poutre (mm).

I_z : moment d'inertie de (S) par rapport à l'axe (z).

f_m : flèche mesurée au point (A).

E_{exp} : module d'élasticité longitudinal recherché.

I .3.4.Essai de résilience

L'essai de résilience consister le mode de mesure de la fragilité d'un matériau. (fig.I.6) l'intensité de la force de percussion ne peut pas être déterminée avec précision, la résilience (ou résilience du choc) d'un matériau est caractérisée l'énergie absorbée lors de la rupture ramenée à l'unité d'aire de la section entaillées[4] :

$$K_{cu} = \frac{W}{S} \quad \left[\frac{da_j}{cm^2} \right]$$

La masse pendulaire est lâchée sans vitesse initiale à la hauteur h_1 au point d'impact A l'énergie cinétique de pendule est :

$$W_1 = m \parallel g \parallel . h_1$$

Après rupture de l'éprouvette le pendule remonte et l'énergie cinétique restante se transforme en énergie potentielle.

$$W_2 = m \parallel g \parallel . h_2$$

$$W = W_1 - W_2$$

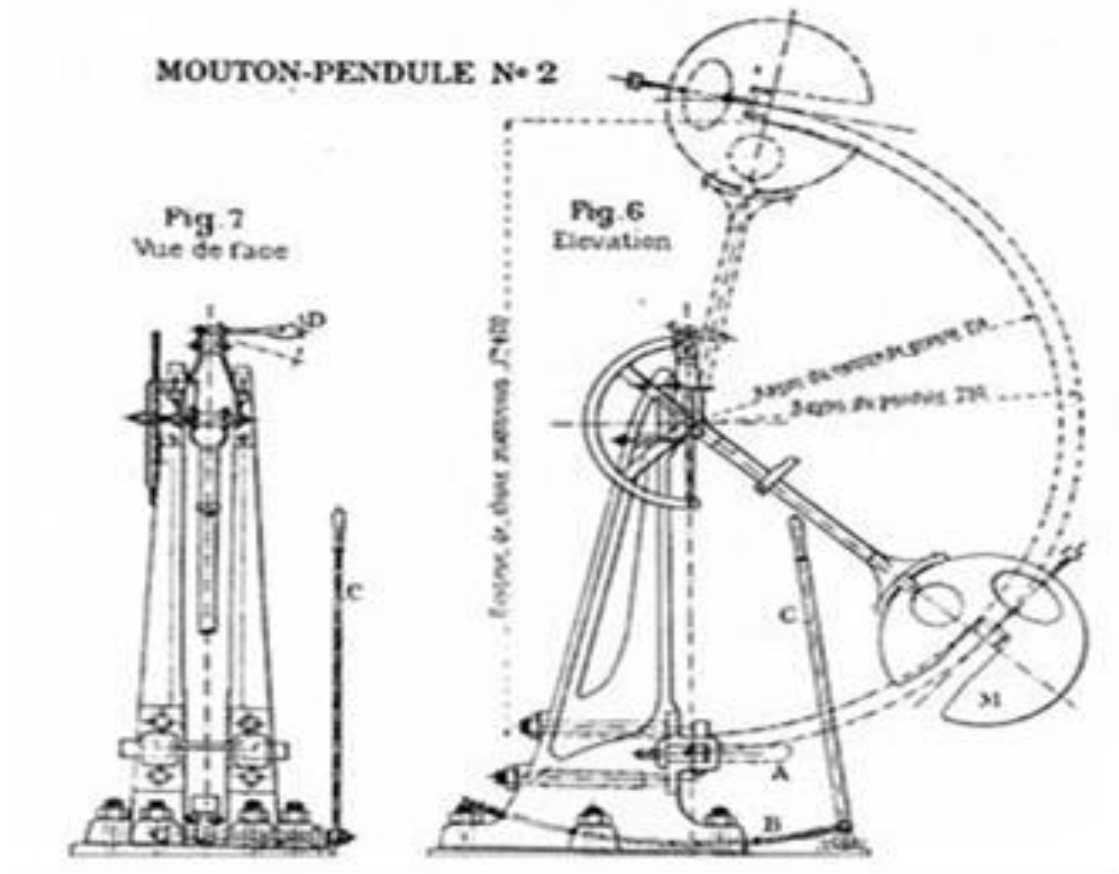


Figure. I.6 : Mouton-pendule de Charpy [4].

Suivant la résilience du matériau l'essai est caractérisé par l'énergie maximale disponible et la profondeur de l'entaille de l'éprouvette.

L'essai KCE $\frac{10}{3}$ correspond à l'application d'une énergie maximale de (98.1) joule sur une éprouvette dont la profondeur de l'entaille U est de (3mm) [4].

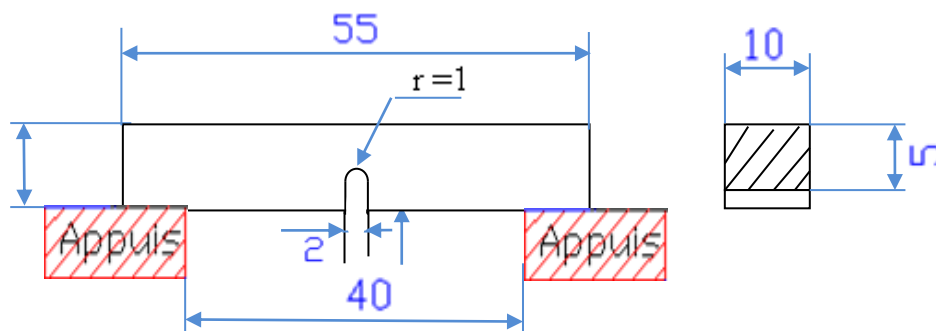


Figure. I.7. Éprouvette de résilience [4].

I.3.5. Essai de fatigue :

Pour simplifier la machine d'essai et la conduite d'essai de fatigue on applique aux éprouvettes des contraintes maximales variant suivant une loi harmonique.

Pour connaître dans tous les cas l'endurance des matériaux c'est à dire l'amplitude à résister au phénomène de fatigue il suffit d'exercer sur des éprouvettes échantillons des contraintes [4].

Variables alternées, ondulées, répétés ... et ceci avec tous les modes de sollicitations, simples ou composés parmi tous les types d'essais de fatigue nous signalerons les plus utilisés.

I.3.5.1. Essai de flexion rotative :

Dans l'essai de flexion rotative l'éprouvette utilisée est de forme cylindrique est sollicitée par un moment fléchissant (fig I.8), chaque point d'une section quelconque est soumise à une contrainte variable avec le temps [4].

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot r \sin(\omega t)$$

M : moment fléchissant par rapport à la section considérée.

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

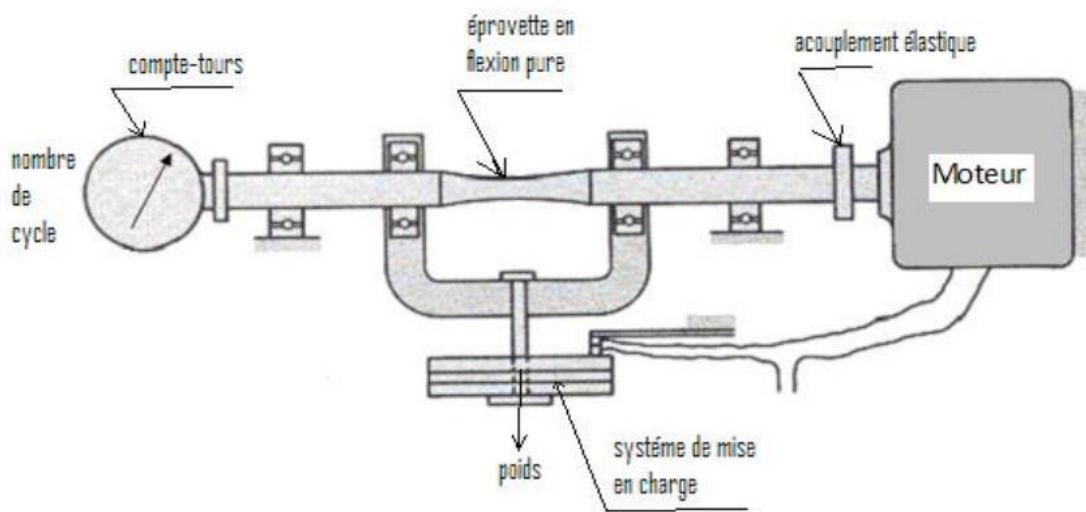


Figure.I.8. la machine essai de flexion rotative [5].

I .3.5.2.Essai de traction – compression :

l'éprouvette généralement cylindrique, est fixée à un bâti par l'intermédiaire d'un dynamomètre et l'autre extrémité sur un organe spécial qui peut être animé d'un mouvement harmonique de faible amplitude initialement on applique à l'éprouvette une force statique constante F_m qui peut être soit puis sollicité l'éprouvette par une force variable suivant une loi harmonique l'effort sur l'éprouvette varie suivant la loi [5]:

$$F = F_m + F_0 \sin(\omega t).$$

F_m : force statique constante .

$F_0 \sin(\omega t)$: force variable suivant une loi harmonique à amplitude maximale F_0 .

I .3.5.3.Essai de torsion :

le principe de fonctionnement de la machine d'essai de fatigue en torsion est la pièce en torsion en lui imposant un couple variable suivant la loi [4] :

$$M = M_m + M_0 \sin(\omega t)$$

M_m :: moment de torsion statique constante.

$M_0 \sin(\omega t)$: moment variable suivant une loi harmonique à amplitude maximale M_0 .

CHAPITRE

II

CHAPITRE II**Etude du phénomène de fatigue :****II.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.

Habituellement, le phénomène de la fatigue est présenté comme un processus par lequel des dommages s'accumulent dans le matériau lors de l'application de charges variables.

Ces dégradations peuvent éventuellement provoquer une rupture, même si la charge maximale est bien inférieure à celle qui est requise pour atteindre la limite d'élasticité du matériau. En fait la fatigue est un phénomène qui produit localement une diminution de la résistance du matériau de construction. Ce matériau peut être un alliage métallique, un polymère ou un matériau composite comme le béton armé ou un plastique renforcé par des fibres.

Afin de préciser les différents aspects de la fatigue des métaux, nous donnons les définitions nécessaires du phénomène de fatigue 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].

II.2.Fatigue et endurance :**II.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 sont définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle σ_{\max} par la valeur moyenne de la contrainte σ_m et par le rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximale $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ [1] (voir figure II.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.

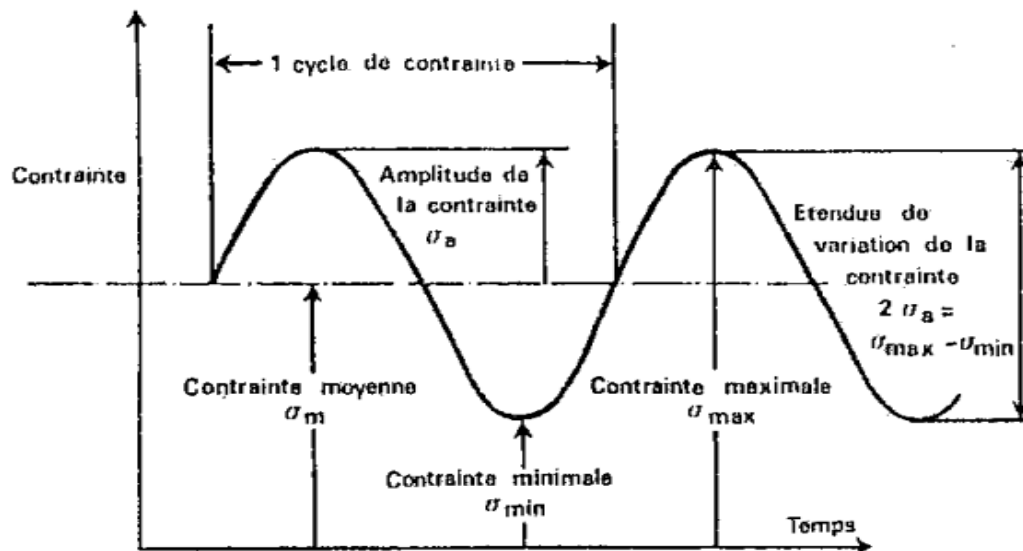


Figure II.1. Cycle de contrainte de la fatigue [5].

En général, la fatigue a lieu lorsqu'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].

II.2.2. Limite de fatigue :

Pour une contrainte moyenne σ_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].

II.2.3.Limite d'endurance :

Pour une contrainte moyenne σ_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 d'après plusieurs auteurs et particulièrement de la référence [2].

II.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].

II.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 varie 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.

II.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 (N/mm^2) ou en Megapascal ($1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$).

II.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 (σ_{\max}) : valeur maximale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte ;
- la contrainte minimale (σ_{\min}) : valeur minimale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte ;
- la contrainte moyenne (σ_m) qui est définie par la valeur algébrique : $\sigma_m = \frac{\sigma_{\min} + \sigma_{\max}}{2}$;
- l'amplitude de contrainte (σ_a), appelée aussi contrainte alternée, définie par la valeur

$$\text{algébrique: } \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} ;$$

- le rapport de contrainte (R_σ), définie par le rapport algébrique $R_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$;
- l'étendue de variation de la contrainte ($2R_\sigma$) qui est la différence algébrique entre la contrainte maximale et la contrainte minimale du cycle de contrainte :

$$2R_\sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}).$$

II.2.5.3. Types de cycles de contraintes :

On trouve :

- 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 ($\sigma_a = \sigma_m$) ;
- contrainte ondulée : contrainte qui varie entre les valeurs maximale et minimale qui sont de même signe ($\sigma_m > \sigma_a$).

II.3. Diagrammes représentatifs :

Pour présenter de manière facilement utilisable les résultats d'essais de fatigue, il existe un assez grand nombre de méthodes ou arrangements 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].

II.3.1. Courbe de Wöhler :

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

Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule qui permet de visualiser la tenue de la pièce ou 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 a l'allure donnée sur la (figure II.2).

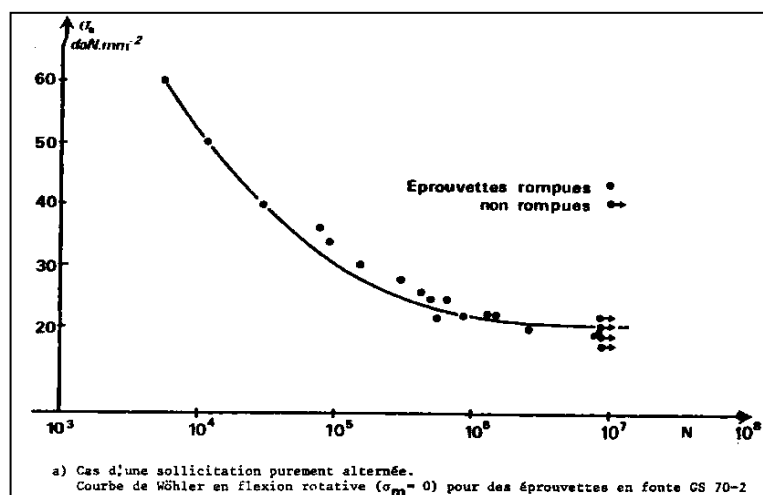


Figure II.2. Exemple de courbe de Wöhler [2].

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 olygocyclique où les ruptures, précédées d'une déformation plastique globale notable, surviennent après un petit nombre de cycles ($N_R < 10^5$) ;

- le domaine d'endurance limitée ($N_R > 10^5$ 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.

II.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 II.3).

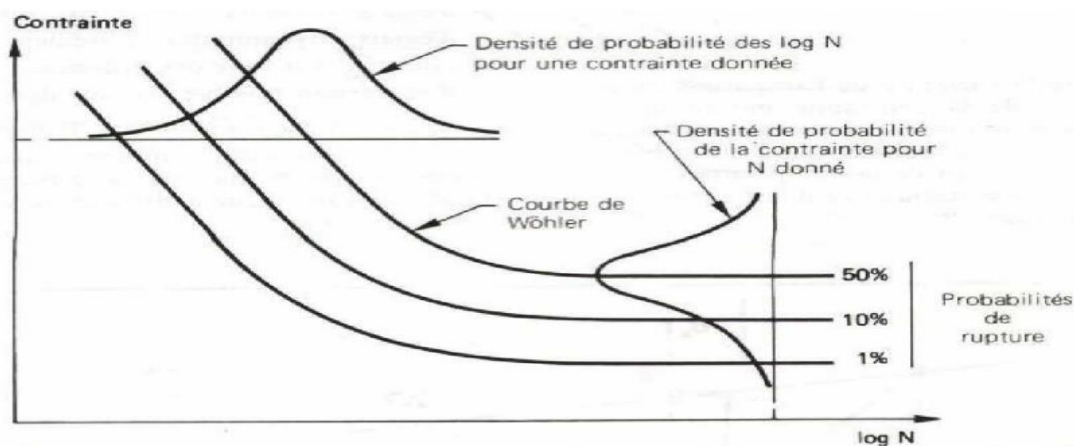


Figure II.3. Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques) [3].

II.3.3. Diagramme de Haigh :

Sur ce diagramme, l'amplitude de contrainte σ_a est portée en fonction de la contrainte moyenne à laquelle a été réalisé l'essai de fatigue (figure II.4) [2],

Deux points particuliers sont à considérer :

- le point A, qui représente la limite d'endurance σ_D en sollicitation purement alternée ($\sigma_D = \sigma_a$) ;
- 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 σ_a et σ_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.

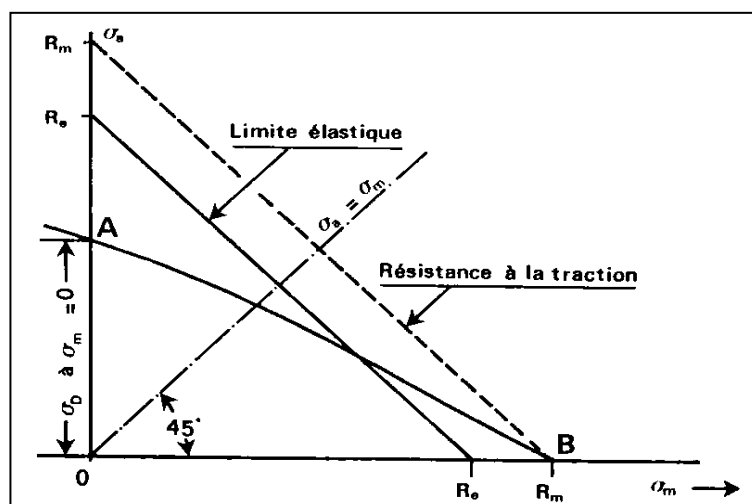


Figure II.4. Diagramme de Haigh (résultats théoriques) [2].

Plusieurs représentations de la courbe AB ont été proposées et qui permettent de reconstruire 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 : $\sigma_a = \sigma_D \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m}\right)$;
- Droite de Söderberg : $\sigma_a = \sigma_D \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_e}\right)$;
- Parabole de Gerber : $\sigma_a = \sigma_D \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m}\right)^2\right)$;

La figure II.5 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 $\sigma_a > 0$.

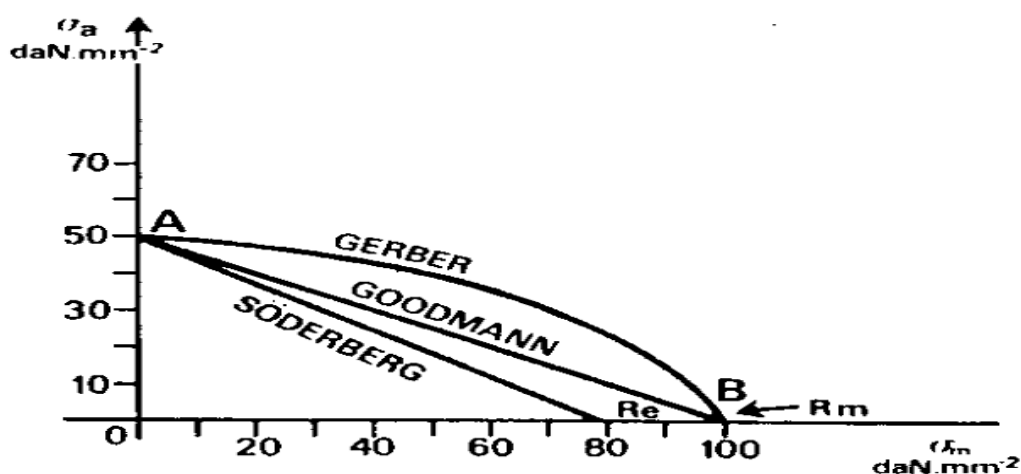


Figure II.5. Différentes représentations de la courbe AB [2].

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 Bahaud ou de Dietmann.

II.3.4. Diagramme de Goodman-Smith :

Sur ce diagramme les contraintes maximales σ_{\max} et minimales σ_{\min} sont représentés en fonction de la contrainte moyenne σ_m (figure II.6) [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).

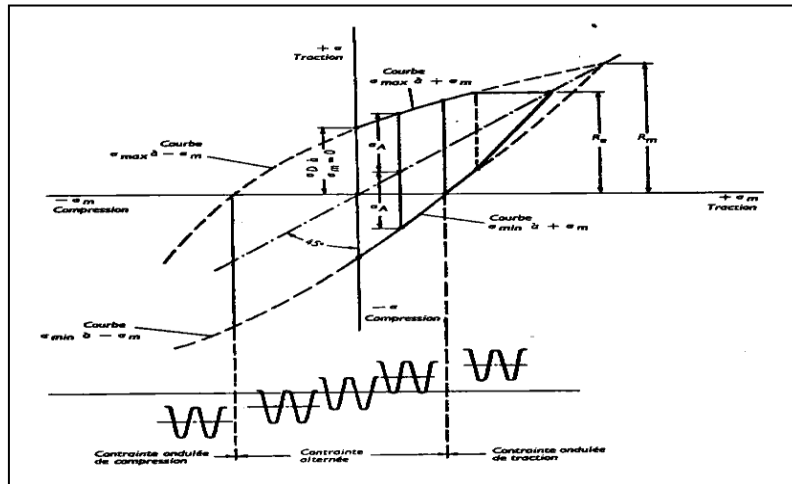


Figure II.6. Digramme de Goodman-Smith (résultats théoriques) [2].

II.3.5. Diagramme de Roš:

Essentiellement utilisé dans les pays anglo-saxons, ce diagramme représente la contrainte maximale σ_{max} en fonction de la contrainte σ_{min} (figure II.7). En plus des deux points particuliers cités A et B, il apparaît un autre point particulier C pour lequel $\sigma_{min} = 0$ [2].

Un certain nombre de valeurs particulières du rapport des contraintes $R_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$ ($R_\sigma = -\frac{1}{2}$ et $R_\sigma = +\frac{1}{2}$) sont souvent indiquées sur ce diagramme.

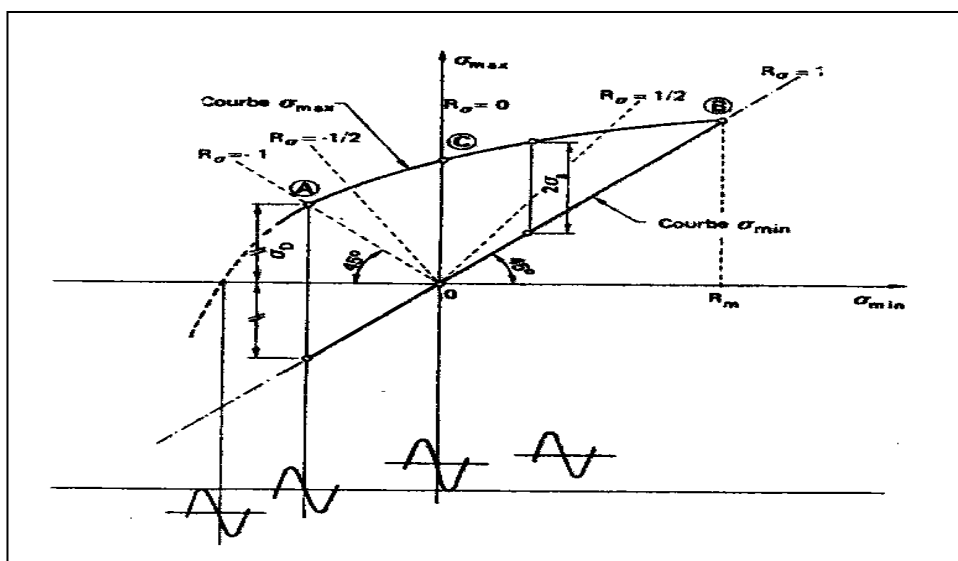


Figure II.7. Diagramme de Roš (Résultats théoriques) [2].

II.3.6. Diagramme de Moore-Kommers-Jasper :

Ce diagramme représente la contrainte maximale σ_{\max} en fonction du rapport des contraintes $R_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$ (figure II.8).

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

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

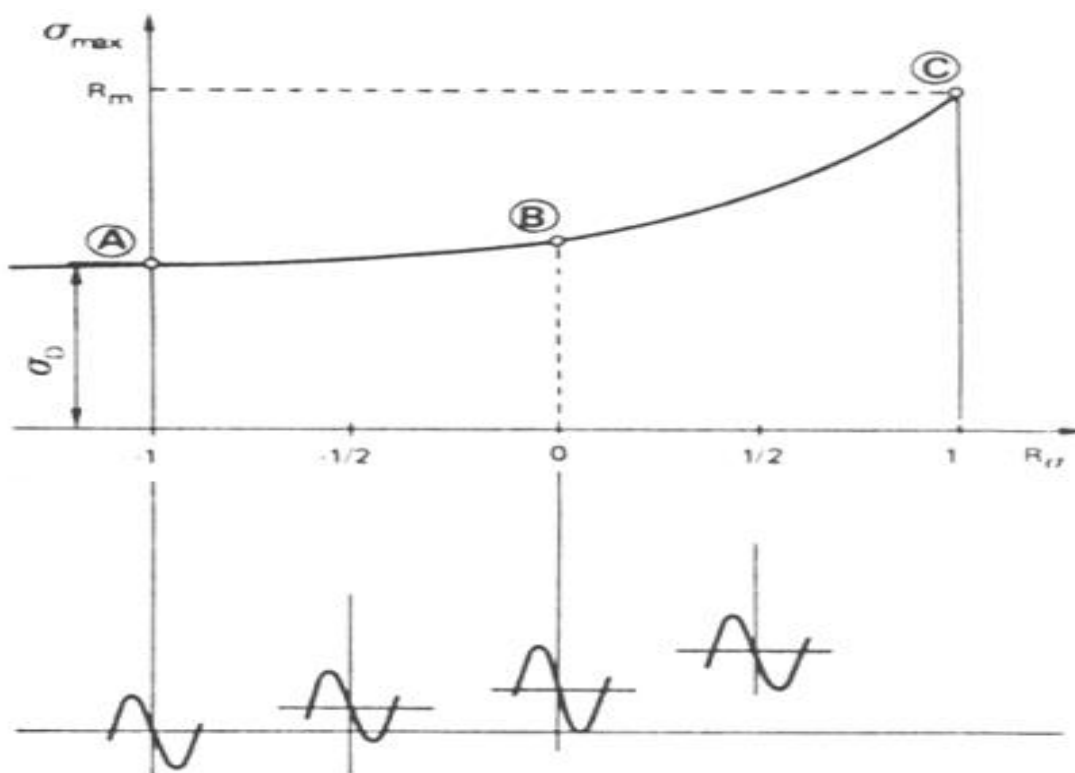


Figure II.8. Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers [2].

II.4. Fissuration par fatigue :

II.4.1. 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 [8], et au-dessus de laquelle leur propagation serait irréversible (endommagement) et conduirait à la rupture. Il faut donc chercher 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.9). 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 des pièces considérées, soumises à la contrainte périodique maximale.

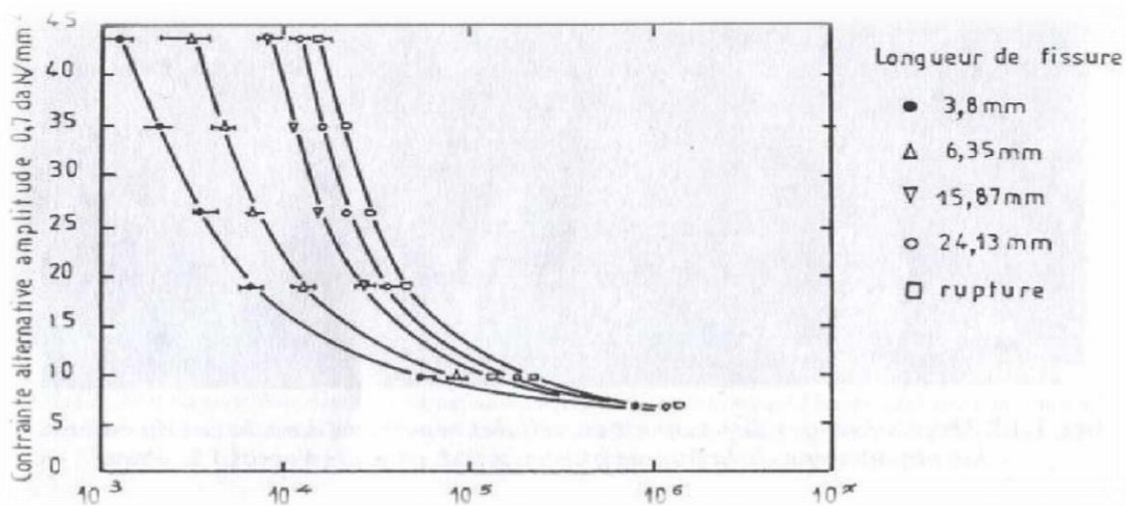


Figure II.9. Courbe de fissuration donnant la longueur de la fissure selon le nombre de cycles et le niveau de contrainte [8]

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.

II.4.2. 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 σ la contrainte maximale des cycles, on peut citer, chronologiquement :

- 1) Formule de Frost et Dugdale :

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

Où : A est une constante 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 σ_n la contrainte normale dans la section fissurée.

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

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

Où : A est une constante, et 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 : ΔK est l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte K et C et m des constantes qui dépendent du matériau [07].

II.5. Faciès caractéristiques des ruptures par fatigue :

L'examen attentif de toute rupture de pièces est une opération d'une grande importance dans le développement d'un produit. Afin de montrer les causes de rupture, donc envisager les remèdes à appliquer pour que cet état de fait soit supprimé [8].

II.5.1- Faciès de fatigue à l'examen optique :

Sur la section de la rupture, on observe à l'œil nu et à la loupe, un nombre de caractéristiques (figure (II.4)) ou est cette figure.

- Présence de deux zones distinctes d'importance variable selon l'amplitude des contraintes et la nature du matériau :

1- La rupture brutale avec faciès à grains ou à nerfs.

2- La fissure de surface avec une surface lisse.

- L'examen permet de déterminer aussi la nature des sollicitations (Tableau (II.1)).

II.5.2.Faciès de fatigue à l'examen microscopique :

Le microscope électronique à balayage (MEB) présente l'avantage de permettre un examen direct avec une gamme large et continue de grossissements et sous des orientations qui peuvent varier dans de larges limites, l'observation est complètement différente de celle observée optiquement :

II.5.2.1 .Rupture Brutale (finale) :

II.5.2.1 .1.Fragile :

Montre les clivages trans-granulaires lisses avec réamorçages par rivières lors des passages des joints de grains ou des clivages à longuettes suivant des plans cristallographiques proches à forte densité, le sens de propagation de la rupture est indiqué par le sens des rivières.

II.5.2.1 .2.Ductile :

Montre des cupules (creux amorcés sur des précipitations) les deux faces de la rupture présentant ces cupules qui se produisent après une déformation plastique importante, lorsque les cupules ne sont pas équiaxes (ce qui généralement le cas sauf en traction pure), le sens de propagation est donné par le grand axe des cupules. (**FigureII.6**).

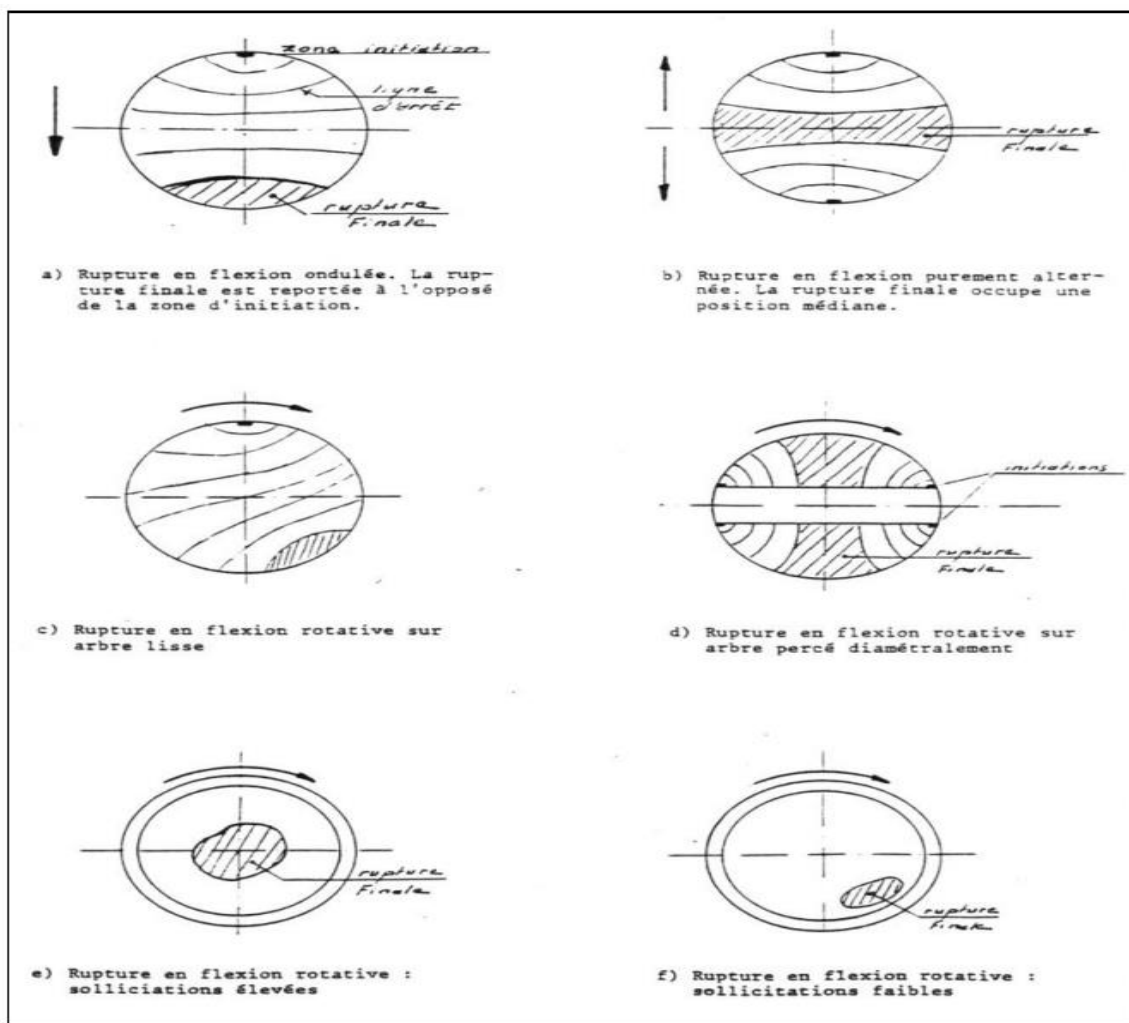


Figure II.10 Faciès de fatigue [8].

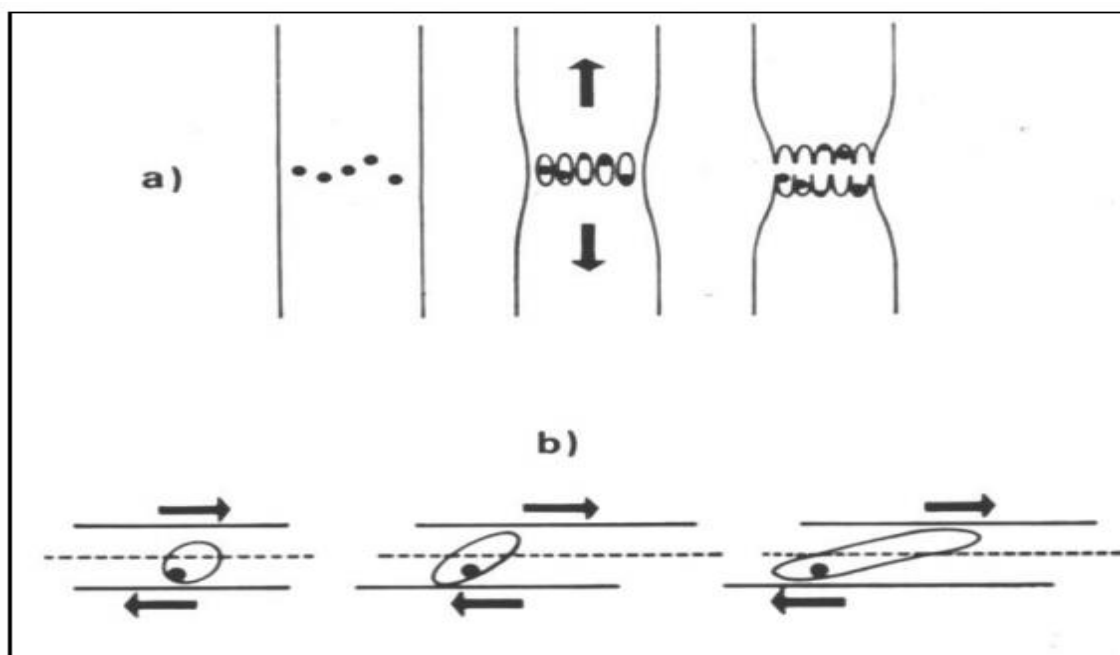


Figure II.11. Schéma de la formation des cupules [10] (a- Rupture normale b- Rupture par glissement)

| Type de sollicitation | Contrainte nom. élevée | | | Contrainte nom. Faible | | |
|---|-----------------------------|--------|--------|------------------------|--------|--------|
| | Concentration de contrainte | | | | | |
| | Nulle | Faible | élevée | Nulle | Faible | elevée |
| Traction-traction Ou Traction-compression | | | | | | |
| Flexion plane Ondulée | | | | | | |
| Flexion plane Alternée | | | | | | |
| Flexion rotative | | | | | | |
| Torsion | | | | | | |

Tableau (II.1) Faciès de rupture en fatigue [9].

II.6. Facteurs d'influence :

On peut, soit par l'analyse de résultats bibliographiques, soit 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].

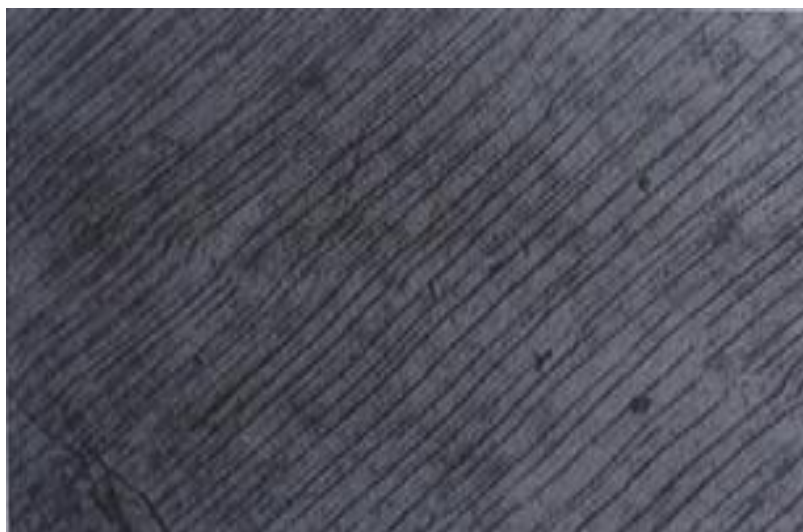


Figure II.12. Stries observées sur la surface de rupture d'une éprouvette de nickel technique rompue par fatigue après 212000 cycles (X 10000) [1]

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

II.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 liées, 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 une endurance plus élevées.

II.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).

II.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].

II.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 , 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'extensomètres (photoélasticité, jauges à résistance...).

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

ou 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 , pour les aciers à très haute limite d'élasticité. Il en résulte qu'une augmentation de résistance statique n'entraîne pas nécessairement une augmentation de résistance à la fatigue en présence d'entaille. [1]

II.6. 3. Conditions de surfaces :

Toujours de façon expérimentale, et d'après la bibliographie, l'état de surface (caractérisé par sa rugosité) a 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 [3].

Les fissures de fatigue prennent le plus souvent naissance dans les couches superficielles, 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 [1] .

II.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.

II.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.

II.6.4. Conditions de sollicitation :

II. 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. Ces différences de gradient, qui entraînent des variations importantes dans le volume de métal déformé, conduisent à des différences de limite d'endurance σ_D qui décroît de la flexion (plane ou rotative) à la traction-compression puis à la torsion [4].

II.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, es matériaux les plus adaptables, permet, de relever la limite d'endurance de façon sensible (10 à 20 %).

II.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 σ_m de travail correspondante si elles 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].

II.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.

II.6. 5. Influence de l'environnement :

II.6. 5.1. Influence de la température :

La limite d'élasticité et la résistance à la traction diminue 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 [4].

II.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

III

Chapitre III

Partie expérimentale

III.1. But des essais de fatigue :

L'objectif des essais de fatigue est de déterminer le comportement des éprouvettes métalliques, des pièces ou d'ensembles mécaniques sous des sollicitations de contraintes périodiques analogues à celles qui se produisent dans la pratique lors des sollicitations de service. L'expérience a montré en effet que, si l'amplitude et le nombre de sollicitations périodiques sont suffisants il en résulte une rupture par fatigue, généralement celle-ci se produit brutalement sans allongement précurseur et la cassure présente deux zones distinctes, une zone lisse qui est la cassure de fatigue proprement dite sur laquelle on peut observer des lignes d'arrêt successives, et une zone d'arrachement à nerf ou à grain qui est la rupture finale instantanée. Le terme fatigue a été utilisé pour désigner la défaillance en service et on appelle endurance, l'aptitude à résister à la fatigue. Dans le but de concrétiser les informations acquises par la théorie, nous voulons faire les essais de fatigue en « flexion rotative » sur des éprouvettes typiques à la machine et voir leur comportement sous l'action des contraintes de flexion différentes.

III.2. Machine de l'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 possède une machine d'essai de fatigue en flexion rotative de modèle : **GUNT**, de type : **WP 140**, qui a les caractéristiques suivantes :

- Courant alternatif: 220 V.
- Fréquence: 50 Hz.
- Charge maximale: 300 N.
- Échelle de graduation : 5 N.
- Environnement: air ambiant.
- Température: ambiante.

III.3. Description de la machine :

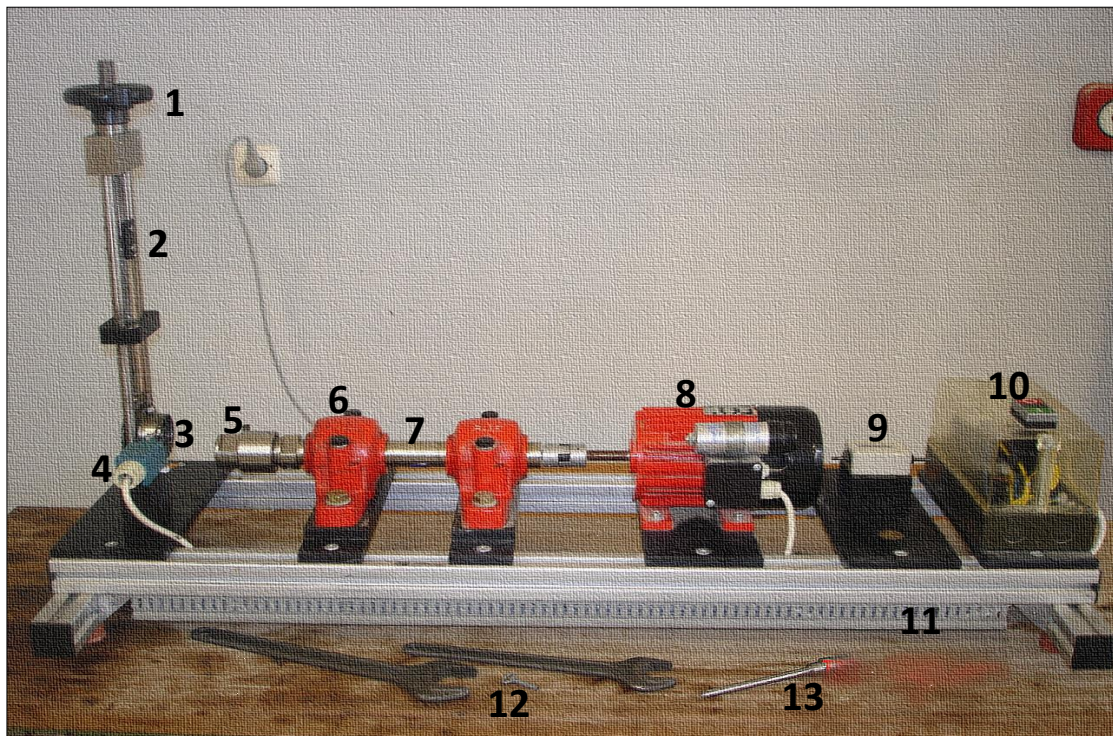


Figure III.1. La machine de l'essai de fatigue GUNT WP 140.

- 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.3.1.principe de l'essai :

- A. Connecter la machine de l'essai de fatigue à l'alimentation électrique.
- B. Tourner le volant dans le chariot transversal jusqu'à ce que le numéro « 0 » apparait dans l'échelle des charges.
- C. S'assurer que l'axe du roulement et celui de l'arbre de transmission sont, en alignés.
- D. Insérer l'éprouvette désirée (le tableau III.1 donne les dimensions des éprouvettes relatives 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 en serrant bien le mandrin.
- E. Utiliser la clé pour mettre le compteur à "0" (le "0" de la dernière colonne du compteur peut retourner en tournant l'arbre de transmission à la main).
- F. Charger l'extrémité libre de l'éprouvette (sur le roulement) par la charge désirée en tournant le volant.
- G. Allumer la machine.
- H. A la rupture, la fin de course est atteinte et la machine s'arrête automatiquement, il faut changer l'éprouvette rompue et recommencer l'essai.

III.4. 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.

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).

La figure III.2 présente une éprouvette de l'essai de fatigue relative à la machine GUNT WP 140.

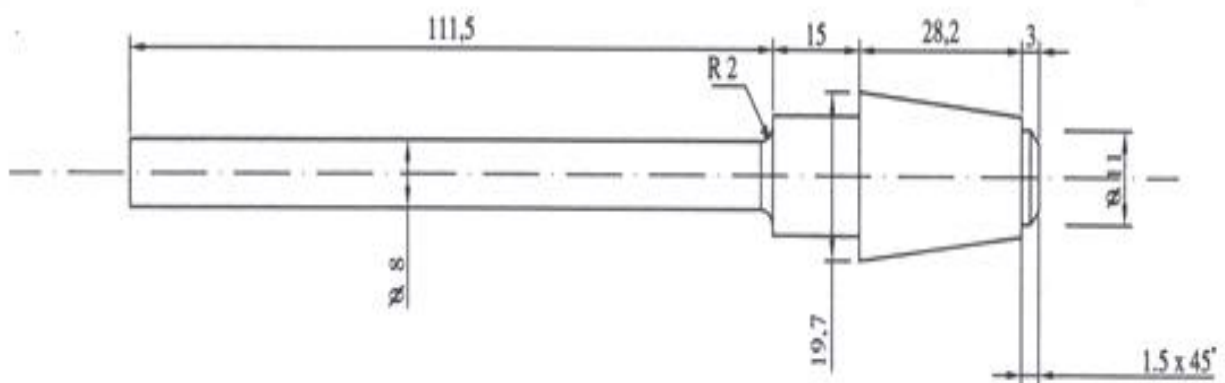


Figure III.2. Epreuve d'essai de fatigue.

Nous avons utilisé 3 types de matière

- 1) Acier XC35,
- 2) Acier A60,
- 3) l'aluminium AL6061,

Le tableau III.1 représente les différents types d'éprouvettes respectives à la machine de l'essai de fatigue **WP140**.

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

| Eprouvette N° | Rayon R(mm) | Rugosité de la surface $R_a(\mu\text{m})$ | Matériaux |
|---------------|-------------|---|------------------|
| 1 | 0,5 | 1.3 | Acier XC35 |
| | 2 | | |
| 2 | 0.5 | 0.5 | Acier A60 |
| | 2 | | |
| 3 | 0.5 | 1.6 | aluminium AL6061 |
| | 2 | | |

III.5. Usinage d'éprouvette :

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.

Dans cette présente étude nous avons usiné nos éprouvettes dans les ateliers de fabrication de l'université de M'sila par un tour modèle : **parelle**, type : **E3N.01** 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 σ sur la fibre externe se calcule par la formule de Navier [16].

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

avec :

M_f : moment fléchissant par rapport à la section considérée

M_I : moment

$$M_f = F * L$$

F : la charge appliquée.

L : longueur du bras de levier.

et
$$M_I = \frac{I_z}{V}$$

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.

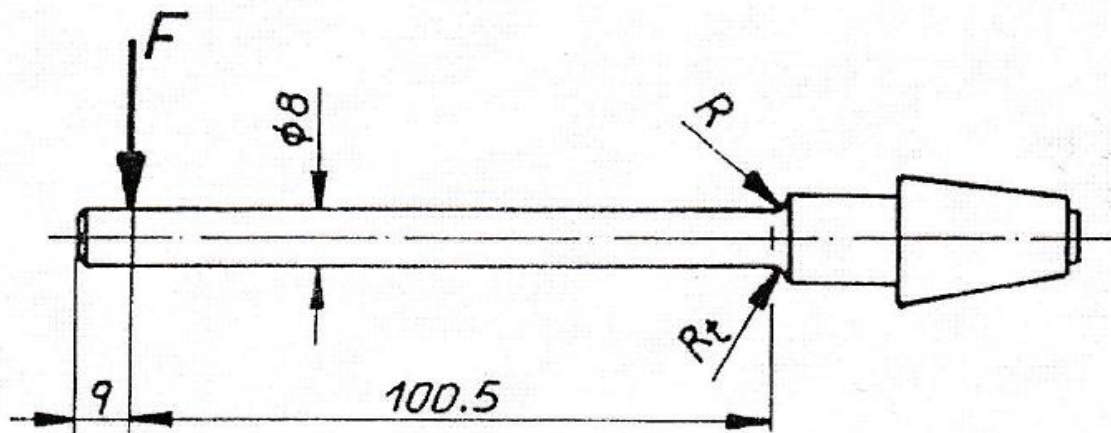


Figure III.3.point d'application de la charge F.

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

$$M_f = F * L$$

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

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

$$= \frac{F * 100,5}{\frac{\pi.8^3}{32}}$$

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

III.7.Etude de diagramme d'endurance des éprouvettes choisies :

L'éprouvettes choisies sont de dimensions selon les données de la machine et dont les caractéristiques ont de déjà citées sur tableau précédent.

III.7.1. Essai sur l'éprouvette de type 1 :

- Matièreaux : acier X35
- Machine d'essai : WP 140
- $R = 0,5(\text{mm})$
- $R_a = 1.3 \mu\text{m}$

Les résultats sont regroupés dans le tableau III.2 et la relation contrainte –nombre de cycle est présentée sur une courbe.

Tableau III.2 : les résultats obtenus lors des essais

| N° d'essai | Contrainte σ (N/mm ²) | N° de cycle | Observation |
|------------|---|-------------|-------------|
| 1 | 520 | 2175 | rompue |
| 2 | 460 | 3677 | rompue |
| 3 | 400 | 9942 | rompue |
| 4 | 340 | 26312 | rompue |
| 5 | 280 | 43079 | rompue |
| 6 | 220 | 142815 | rompue |
| 7 | 180 | $10^7 >$ | Non rompue |

D'après ce tableau nous pouvons calculer la limite de fatigue

$$\sigma_D = \frac{220+180}{2} = 200 \text{ (N/mm}^2\text{)}.$$

σ_D est nommée limite de fatigue ou limite d'endurance

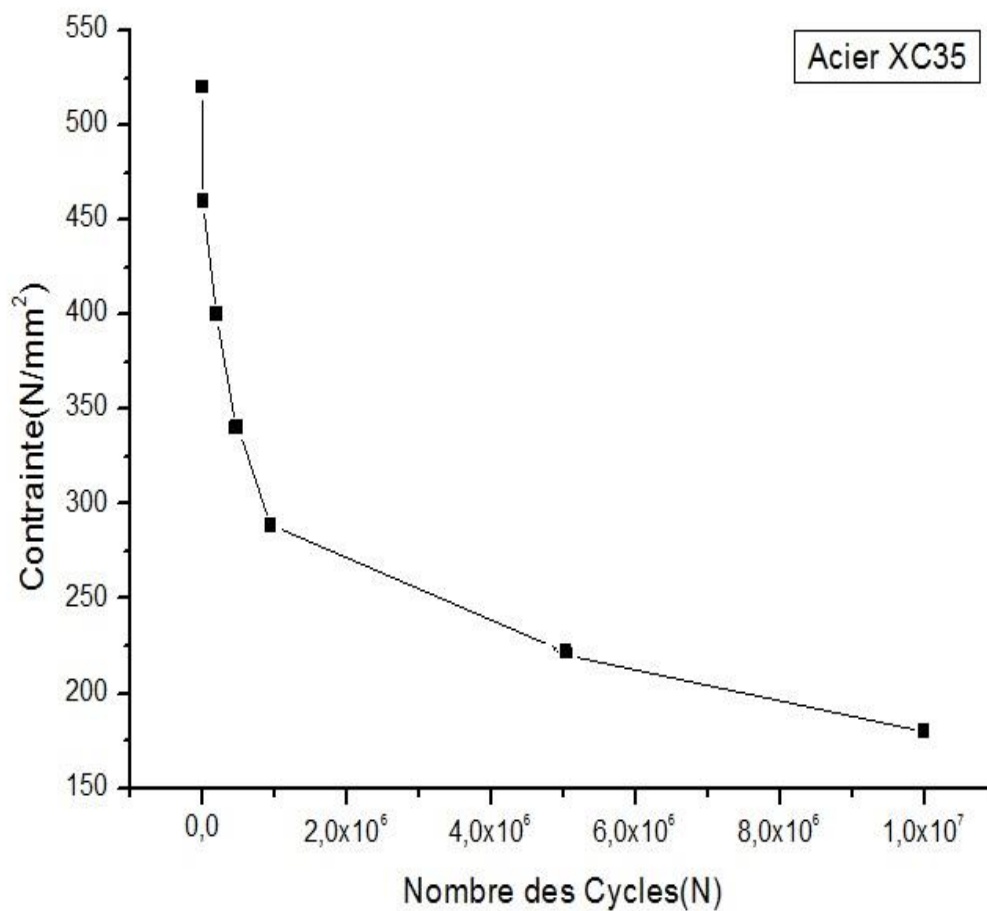


Figure III.4. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier XC35

(Rayon $R=0.5$).

III.7.2. Essai sur l'éprouvette de type 2 :

- Matièreaux : acier X35
- Machine d'essai : WP 140
- R=2(mm)
- R_a= 1.3 μm

Les résultats sont regroupés dans le tableau III.3 et la relation contrainte –nombre de cycle est présentée sur une courbe (voir figureIII.5).

Tableau III.3 : les résultats obtenus lors de l'essai

| N° d'essai | Contrainte σ (N/mm ²) | N° de cycle | Observation |
|------------|---|-------------------|-------------|
| 1 | 520 | 3958 | rompue |
| 2 | 460 | 8734 | rompue |
| 3 | 400 | 28340 | rompue |
| 4 | 340 | 123137 | rompue |
| 5 | 280 | 537095 | rompue |
| 6 | 220 | 1342806 | rompue |
| 7 | 180 | 10 ⁷ > | Non rompue |

On calcule la limite de fatigue de la même manière que précédemment on trouve la valeur suivante :

$$\sigma_D = 200 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

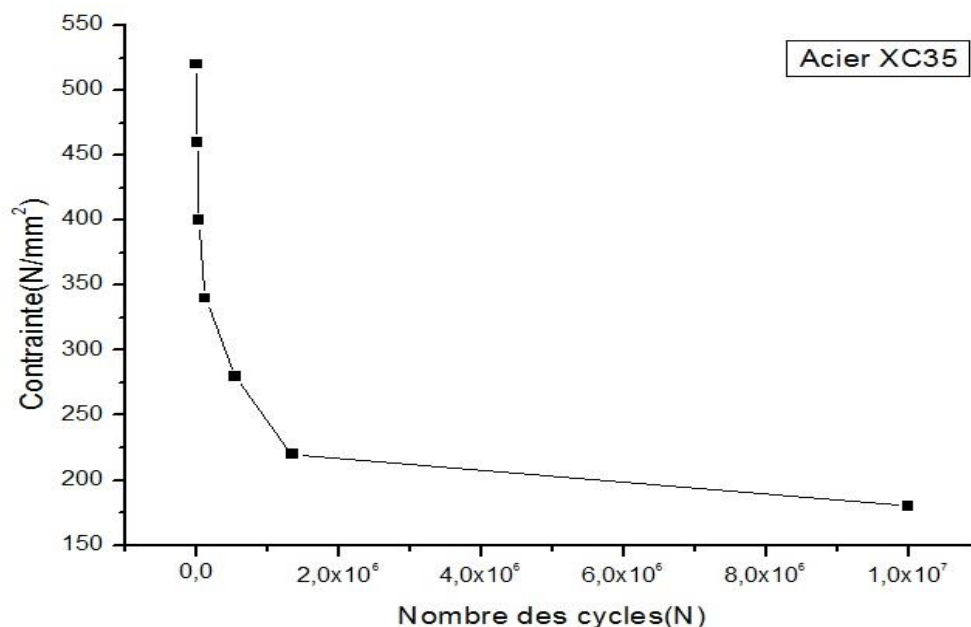


Figure III.5. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier XC35

(Rayon $R=2$).

➤ **Interprétation :**

Les figures III (4,5) représente le diagramme d'endurance (σ .N) pour l'acier XC35 :

On constate qu'il est divisé en trois zones :

Sur la 1^{er} zone on remarque que pour de grandes contraintes la rupture a lieu à des nombres de cycle N allant jusqu'à 10^4 (ce qui représente la phase oléogocyclique).

Pour la 2^{eme} zone la rupture des éprouvettes est atteintes après un nombre de cycle compris entre 10^4 et 10^6 pour des contrainte de croissantes ; d'après la théorie dans cette zone la rupture n'est pas accompagnée d'une déformation plastique on dit qu'on est le domaine de limite de fatigue limitée.

La 3^{eme} zone dite zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité, sous faible contrainte la rupture n'a pas lieu à des nombres de cycles $N > 10^7$.

➤ **Influence du changement de dimension :**

La comparaison des résultats d'essais entre deux types d'éprouvettes de rayons différents

($R_1 = 0.5 \text{ mm}$, $R_2 = 2 \text{ mm}$) représentés sur le (figurer III.6),

Pour la même contrainte σ l'éprouvette de rayon ($R_1 = 0.5 \text{ mm}$) est rompue avant l'éprouvette de rayon ($R_2 = 2 \text{ mm}$). En effet Pour $\sigma = 340 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ($R_1 = 0.5$, $N = 26312 \text{ cycles}$)

($R_2 = 2$, $N = 123137 \text{ cycles}$) les nombres de cycle sont légèrement différents mais la limite d'endurance σ_D reste inchangée.

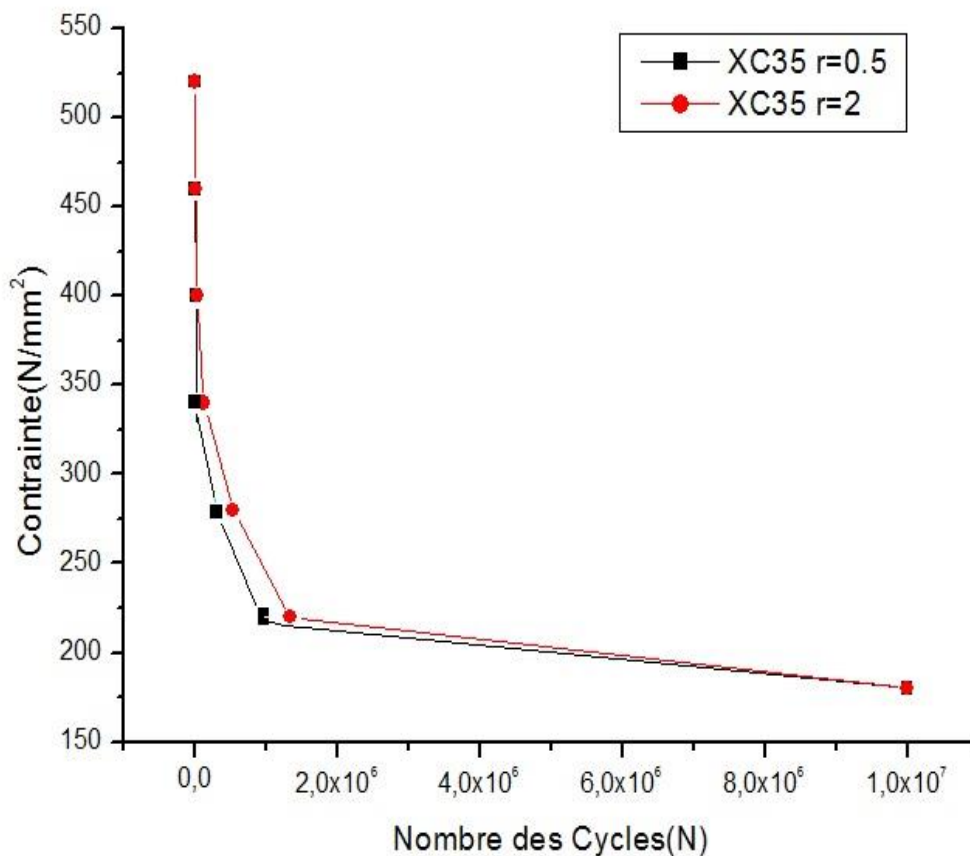


Figure III.6. Influence du changement de dimension (rayon).

III.7.3. Essai sur l'éprouvette de type 3 :

- Matièreaux : A60
- Machine d'essai : WP 140
- $R=2(\text{mm})$
- $R_a= 0.5 \mu\text{m}$

Les résultats sont regroupés dans le tableau III.4 et la relation contrainte –nombre de cycle est présentée sur une courbe (voir figureIII.7).

Tableau III.4 : les résultats obtenus lors des essais

| N° d'essai | Contrainte σ (N/mm ²) | N° de cycle | Observation |
|------------|---|-------------|-------------|
| 1 | 520 | 4336 | rompue |
| 2 | 460 | 8217 | rompue |
| 3 | 400 | 22863 | rompue |
| 4 | 340 | 59036 | rompue |
| 5 | 280 | 60563 | rompue |
| 6 | 220 | 477912 | rompue |
| 7 | 180 | $9.10^6 >$ | Non rompue |

D'après ce tableau nous pouvons calculer la limite de fatigue

$$\sigma_D = \frac{220+180}{2} = 200 \text{ (N/mm}^2\text{)}.$$

σ_D est nommée limite de fatigue ou limite d'endurance

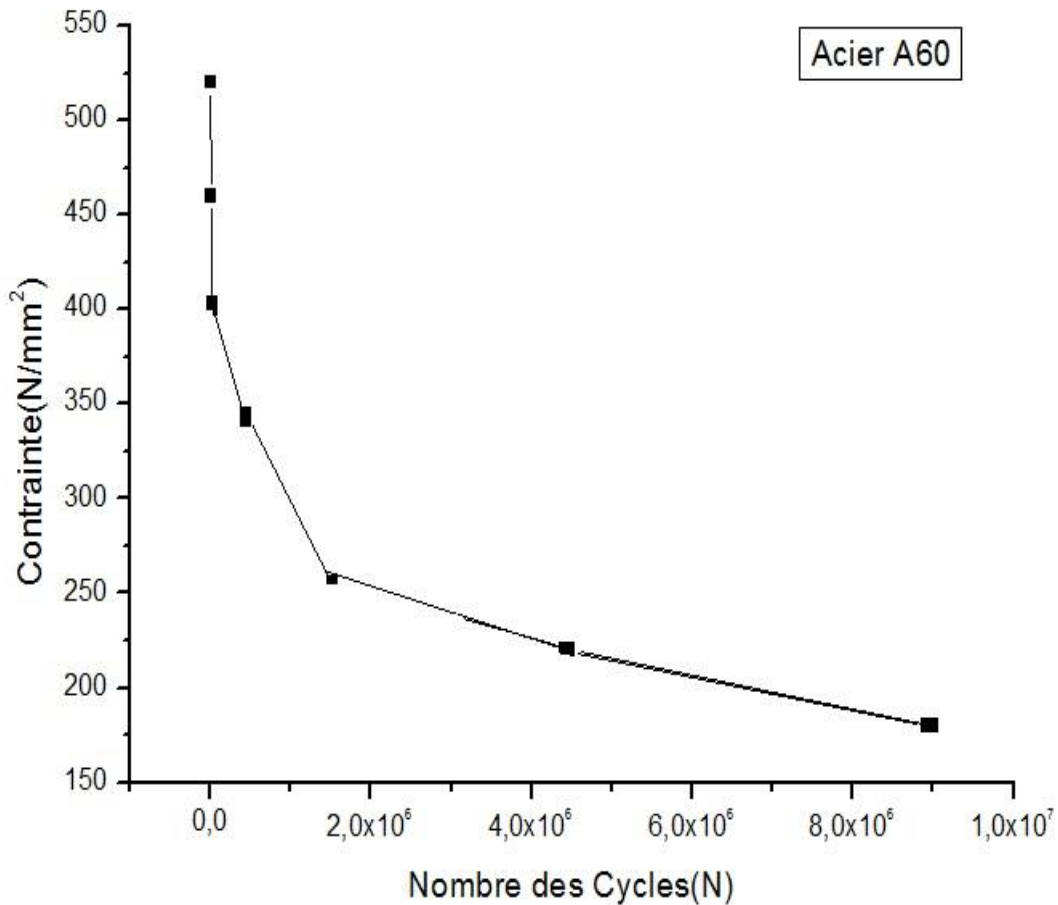


Figure III.7. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier A60
(Rayon R=2).

III.7.4. Essai sur l'éprouvette de type 4 :

- Matièreaux : A60
- Machine d'essai : WP 140
- $R=0,5(\text{mm})$
- $R_a= 0.5 \mu\text{m}$

Les résultats sont regroupés dans le tableau III.5 et la relation contrainte –nombre de cycle est présentée sur une courbe (voir figureIII.8).

Tableau III.5 : les résultats obtenus lors des essais

| N° d'essai | Contrainte σ (N/mm ²) | N° de cycle | Observation |
|------------|---|-------------|-------------|
| 1 | 520 | 3050 | rompue |
| 2 | 460 | 4071 | rompue |
| 3 | 400 | 20812 | rompue |
| 4 | 340 | 33606 | rompue |
| 5 | 280 | 51766 | rompue |
| 6 | 220 | 80484 | rompue |
| 7 | 180 | $10^6 >$ | Non rompue |

On calcule la limite de fatigue de la même manière que précédemment on trouve la valeur suivante :

$$\sigma_D = 200 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

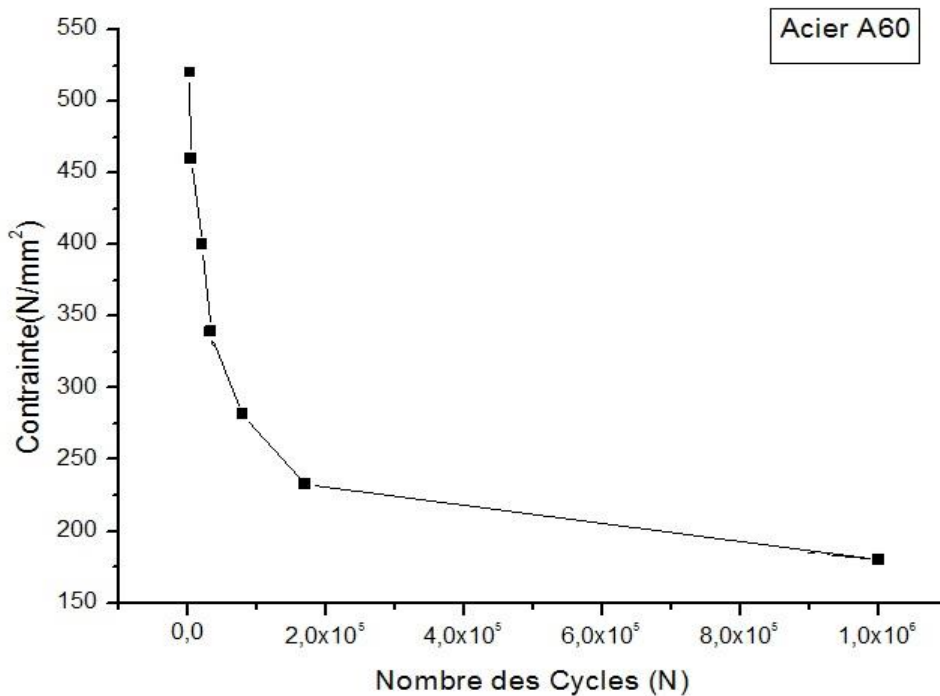


Figure III.8. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier A60
(Rayon $R=0.5$).

➤ Interprétation :

Cette figure III (7,8) représente le diagramme d'endurance (σ .N) pour l'acier A60 :

La 1^{er} zone on remarque que pour de grande contrainte la rupture a lieu à des arbres de cycle N allant jusqu'à 10^4 (ce qui représente la phase oléogcyclique).

La 2^{eme} zone la rupture des éprouvettes est attendues après un nombre de cycle compris entre 10^4 et 10^5 rupture pour des contraintes croissantes d'après la théorie dans cette zone la rupture n'est pas accompagnée d'une déformation plastique.

La 3^{eme} zone dite zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité sous faible contrainte la rupture n'est pas lieu à des arbres pour N cycle $> 10^6$.

➤ **Influence de changement de dimension :**

La comparaison des résultats d'essais entre deux types d'éprouvettes de rayon différent

($R_1 = 0.5 \text{ mm}$, $R_2=2 \text{ mm}$) représentés sur le (figuier III.9),

Pour la même contrainte σ l'éprouvette de rayon ($R_1=0.5\text{mm}$) se rompt avant l'éprouvette de rayon ($R_2=02\text{mm}$).

Pour $\sigma=340(\text{N}/\text{mm}^2)$ ($R_1=0.5$, $N = 33606 \text{ cycle}$) ($R_2=2$, $N=59036 \text{ cycle}$) la différence est bien lisible.

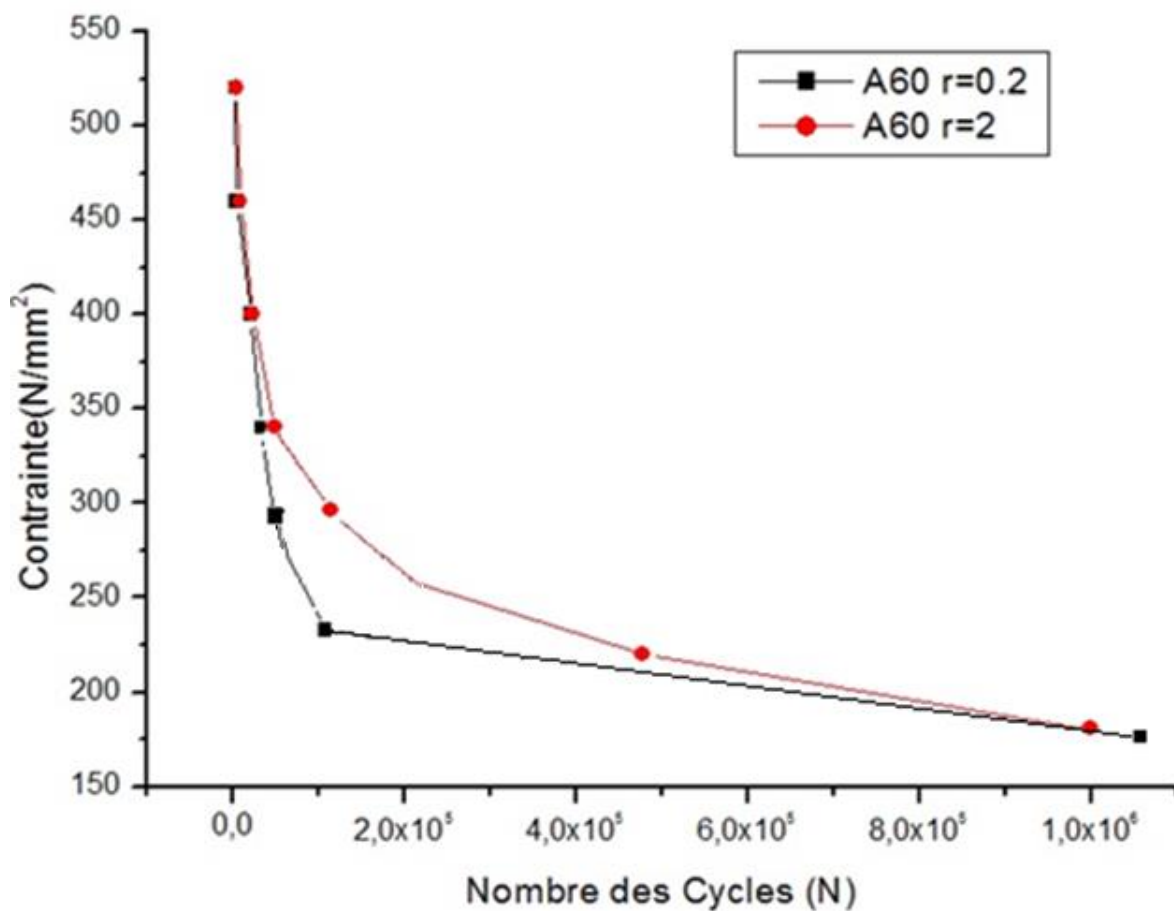


Figure III.9. Influence de changement de dimension (rayon).

III.7.5. Essai sur l'éprouvette de type 5 :

- Matièreaux : aluminium AL6061
- Machine d'essai : WP 140
- $R=0,5(\text{mm})$
- $R_a= 1.6 \mu\text{m}$

Les résultats sont regroupés dans le tableau III.6 et la relation contrainte –nombre de cycle est présentée sur une courbe (voir figure III.10).

Tableau III.6 : les résultats obtenus lors des essais

| N° d'essai | Contrainte σ (N/mm ²) | N° de cycle | Observation |
|------------|---|-------------|-------------|
| 1 | 200 | 790 | Rompue |
| 2 | 180 | 1031 | Rompue |
| 3 | 160 | 1677 | Rompue |
| 4 | 140 | 3056 | Rompue |
| 5 | 120 | 5334 | Rompue |
| 6 | 100 | 12214 | Rompue |
| 7 | 80 | 23308 | Rompue |

Pour le cas de l'aluminium toutes les éprouvettes utilisées étaient rompues pour des contraintes allant jusqu'à 80 N/mm^2 , on suppose que pour des contraintes très inférieures

(20 N/mm^2) d'après Basthia et autres auteurs[5]

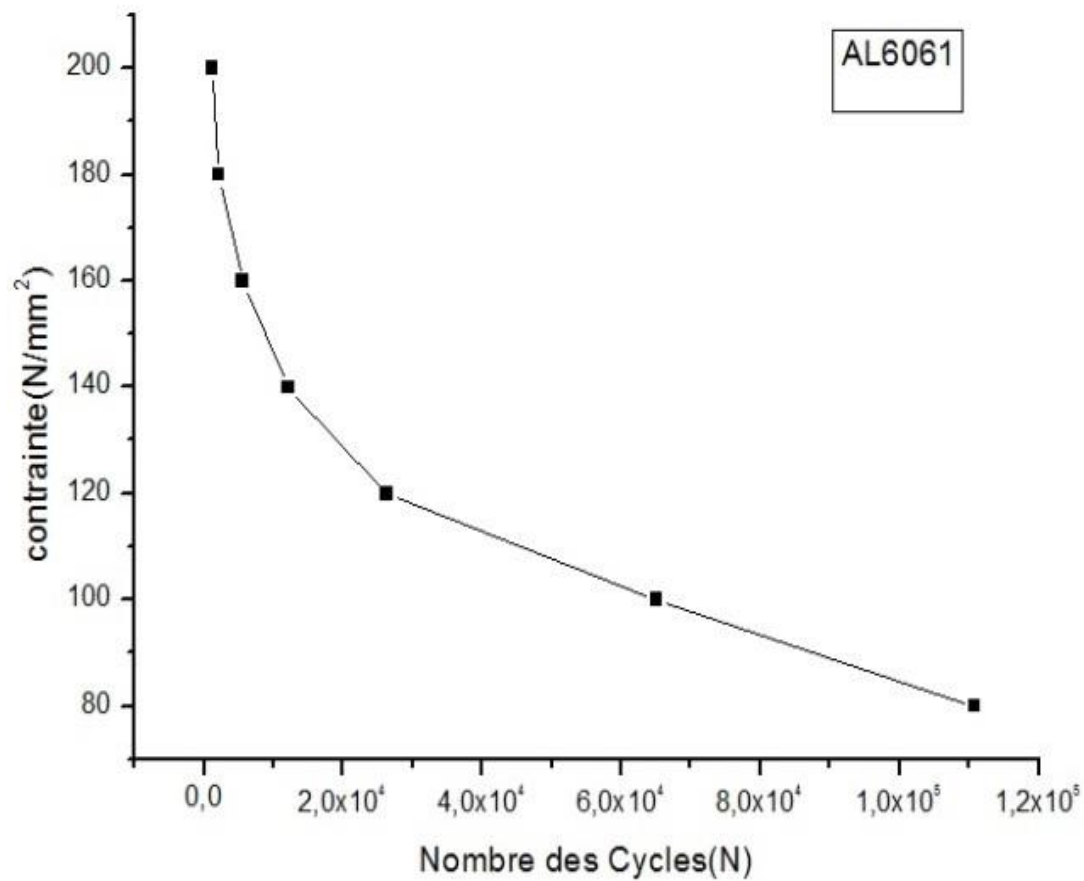


Figure III.10. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier AL6061
(Rayon $R=0.5$).

III.7.6. Essai sur l'éprouvette de type 6 :

- Matièreaux : LA6061
- Machine d'essai : WP 140
- R=2(mm)
- $R_a = 1.6 \mu\text{m}$

Les résultats sont regroupés dans le tableau III.7 et la relation contrainte –nombre de cycle est présentée sur une courbe (voir figure III.11).

Tableau III.7 : les résultats obtenus lors des essais

| N° d'essai | Contrainte σ (N/mm ²) | N° de cycle | Observation |
|------------|---|-------------|-------------|
| 1 | 200 | 1205 | Rompue |
| 2 | 180 | 2136 | Rompue |
| 3 | 160 | 5576 | Rompue |
| 4 | 140 | 12106 | Rompue |
| 5 | 120 | 26293 | Rompue |
| 6 | 100 | 65027 | Rompue |
| 7 | 80 | 1108355 | Rompue |

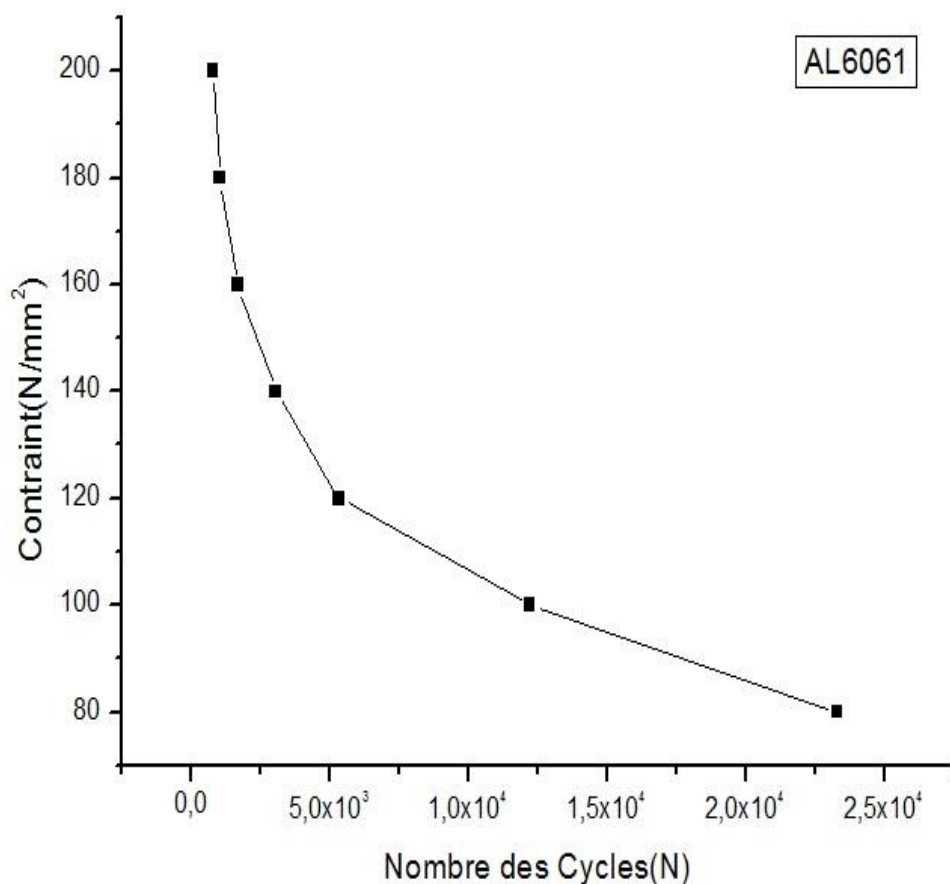


Figure III.11. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'aluminium AL6061

(Rayon $R=2$)

➤ Interprétation :

Les figures III (10,11) représentent les diagrammes d'endurance (σ -N) pour l'aluminium AL6061, exprimant la relation entre les contraintes de rupture et les nombres de cycles.

On remarque que pour de grandes contraintes la rupture a lieu à des nombres de cycle N allant jusqu'à 10^3 (ce qui représente la phase oléocyclique).

La rupture des éprouvettes est atteinte après un nombre de cycle compris entre 10^3 et 10^5 . Pour des contraintes croissantes d'après la théorie dans cette zone la rupture n'est pas accompagnée d'une déformation plastique.

➤ **Influence de changement de dimension :**

La comparaison des résultats d'essais entre deux types d'éprouvettes de rayon différent ($R_1 = 0.5 \text{ mm}$, $R_2 = 2 \text{ mm}$) représentés sur la (figure III.12),

Pour la même contrainte σ l'éprouvette de rayon ($R_1 = 0.5 \text{ mm}$) est rompue avant l'éprouvette de rayon ($R_2 = 2 \text{ mm}$). Les courbes ont la même allure décroissante mais pour des contraintes similaires les nombres de cycles sont différents.

Pour $\sigma = 160 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ($R_1 = 0.5$, $N = 1677 \text{ cycle}$) ($R_2 = 2$, $N = 5576 \text{ cycle}$).

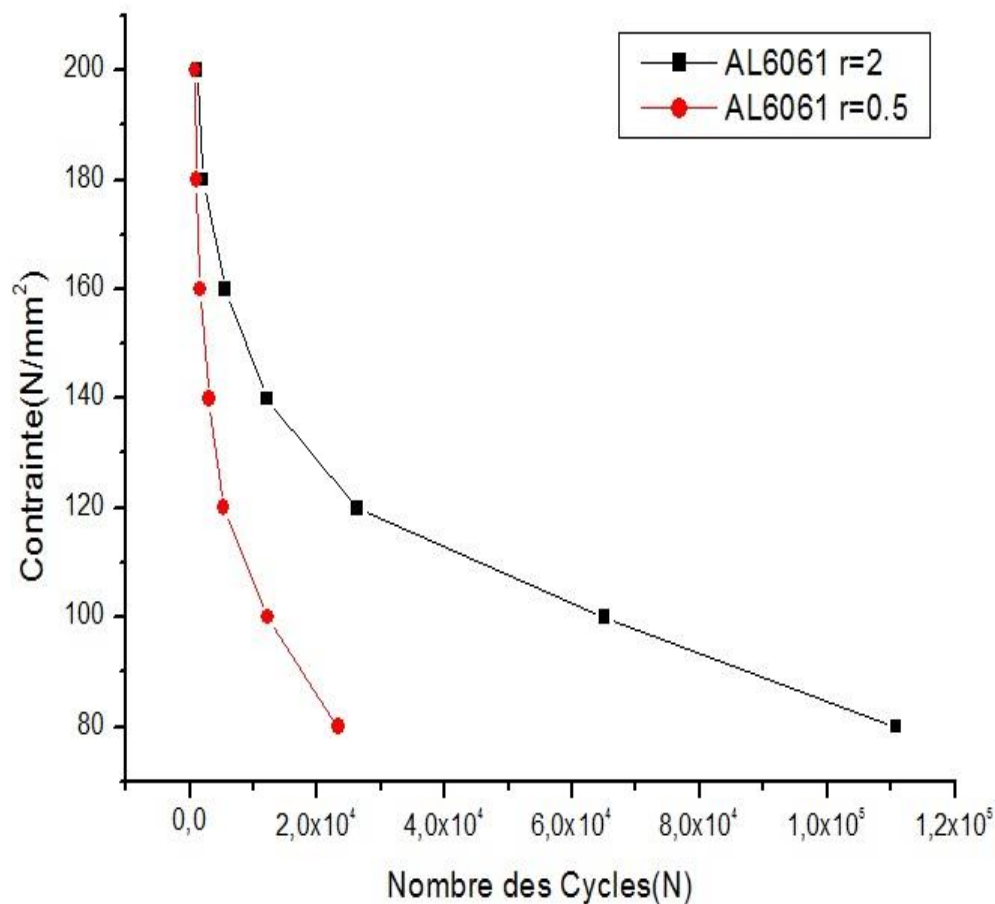


Figure III.12. Influence de changement de dimension (rayon).

III.8. Etude micrographique et analyse morphologique :

L'examen à l'œil nu ou au microscope d'une cassure de fatigue montre la présence d'une zone lisse périphérique et d'une zone centrale à grain, 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 [16].

La position centrale de la rupture finale est liée aux fortes concentrations de contraintes qui affectent la pièce au niveau du rayon, 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 du rayon.

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 (**figure III.13**).

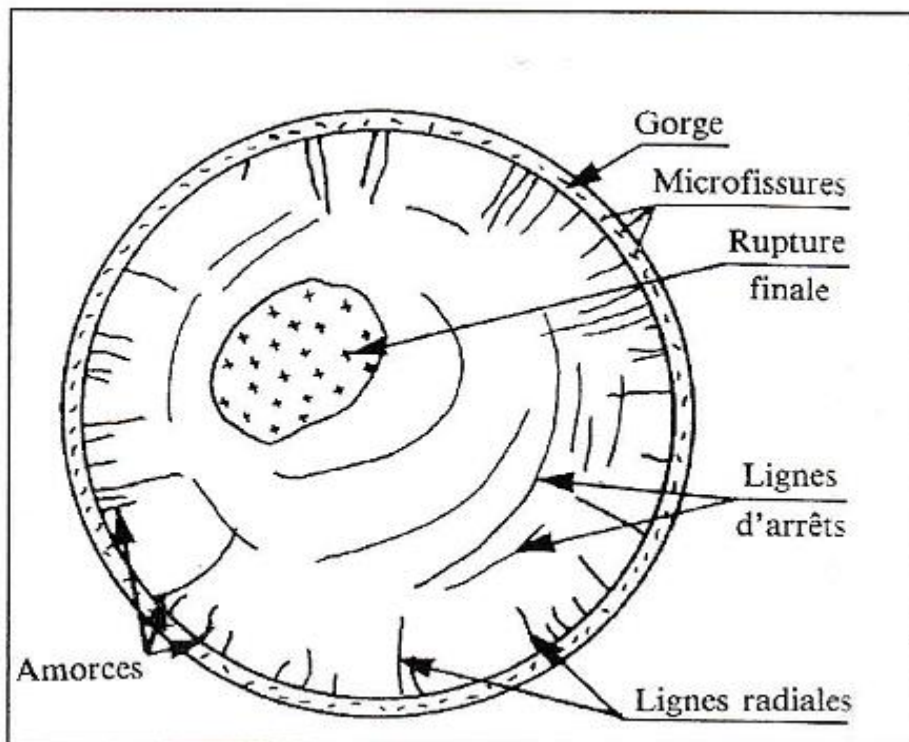


Figure III.13. Caractéristiques des ruptures développées en fatigue sous sollicitation de flexion rotative de flexion rotative [16].

Les figures suivantes présentent quelques faciès des surfaces de rupture.

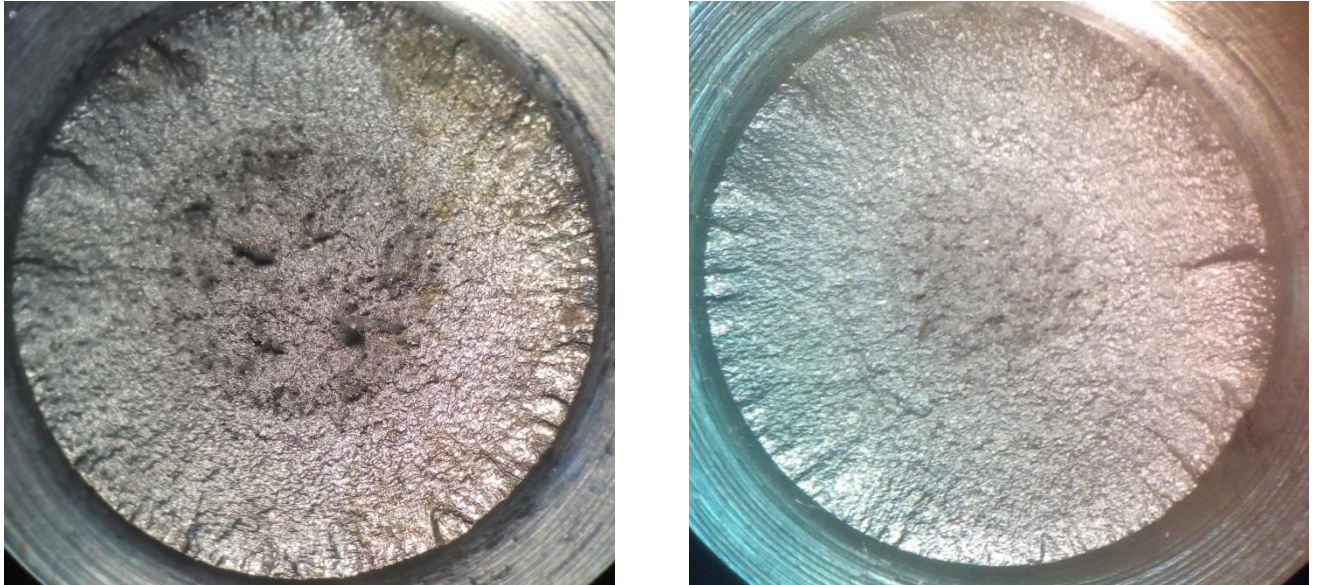


Figure III.14. Facies d'une éprouvette rupture rompue en XC35 de flexion rotative.

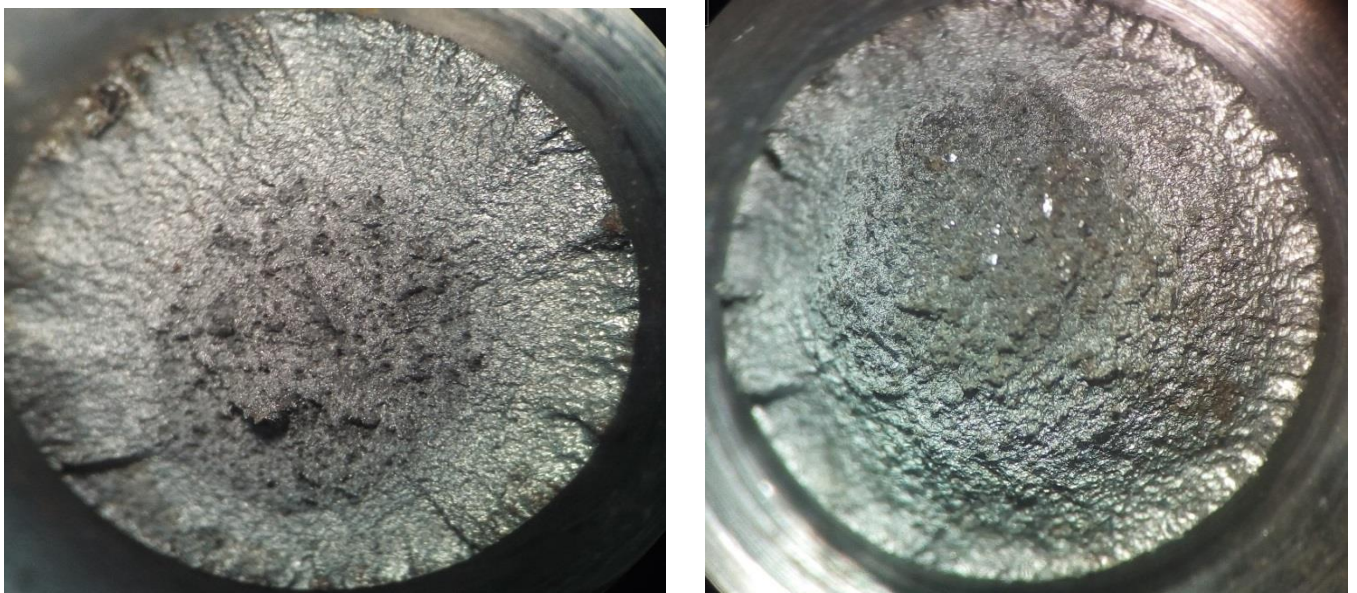


Figure III.15. Facies d'une éprouvette rupture rompue en A60 de flexion rotative.

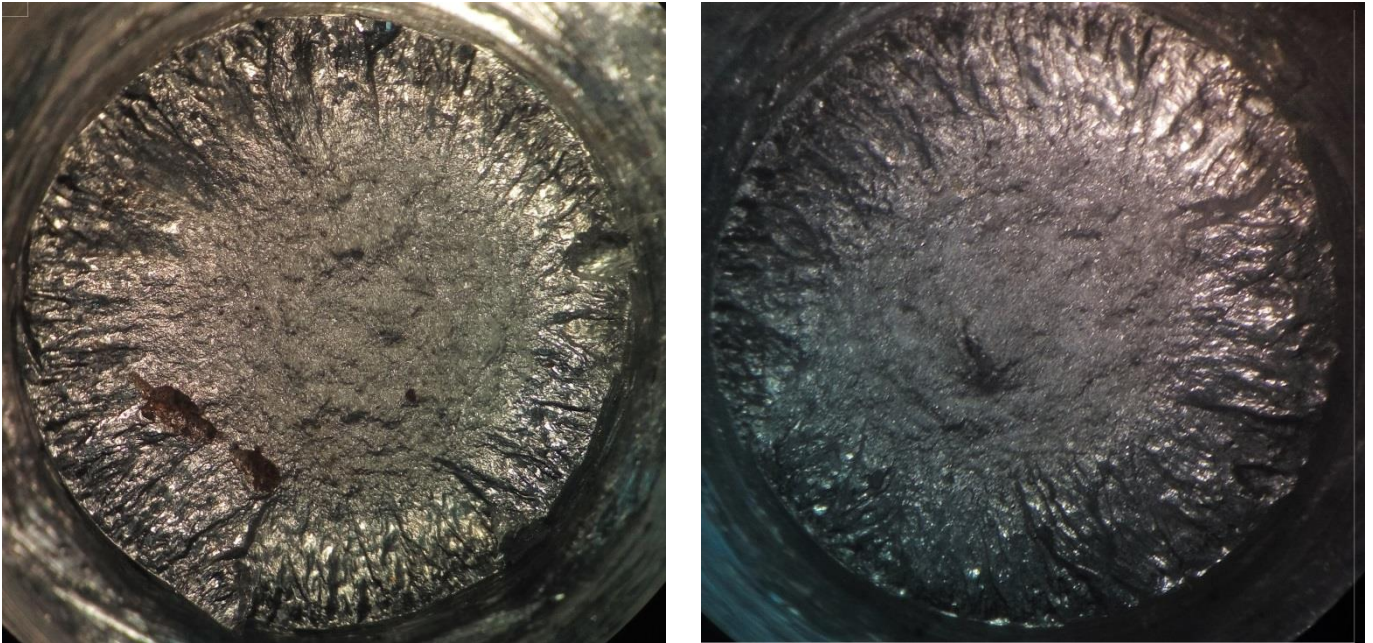


Figure III.16. Facies d'une éprouvette rupture rompue en AL6061 de flexion rotative.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce travail est une contribution à l'étude de fatigue des matériaux .

Nous avons présenté des notions théoriques sur le phénomène de fatigue ainsi que les paramètres ayant une influence sur la limite d'endurance d'une pièce mécanique.

Nous avons effectué une étude expérimentale sur le comportement de fatigue en flexion rotative de deux acier XC35 et A60 et l'aluminium AL6061.

Le nombre de facteurs d'influence est très grand , les étudier tous exige un très grand temps ; dans notre cas nous nous sommes limité à la recherche de l'influence du rayon de courbure des éprouvettes sur la limite à la fatigue et pouvoir faire une comparaison.

Nous avons constaté que la variation du rayon de l'éprouvette , influe beaucoup sur la période de rupture puisque pour les mêmes contraintes les nombres de cycle sont différents.

Les courbes présentées ont toutes l'allure de la courbe de théorique de Wöhler avec les trois zones de fatigue : la zone oligocyclique où la rupture a lieu pour de grandes contraintes et pour de faibles nombre de cycles , la zone de fatigue limitée pour les nombres de cycle $< 10^7$ et des contraintes de rupture décroissantes et enfin la zone de fatigue illimitée où $N > 10^7$.

Pour le cas de l'aluminium la zone illimitée est estimée à des contraintes inférieures à

20 N/mm² et nous remarquons bien la différence entre les valeurs de nombres de cycle qui montrent que les éprouvettes à rayon très petit se rompent plus vite.

Nous pensons que nos résultats sont en accord avec ceux de la bibliographie et espérons que ce travail soit continué par d'autres étudiants en utilisant d'autres facteurs tels que la corrosion, les variations de section...

Annexe

Annexe I :

Les composants de l'aluminium AL6061 choisis en % sont :

Thermo
SCIENTIFIC

Thermo Fisher Scientific
900 Middlesex Turnpike
Billerica, MA 01821

Certificate of Verification

XL3t-62240

| | |
|-------------|------------------|
| Reading No | 73 |
| Mode | General Metals |
| Time | 2016-03-06 10:44 |
| Duration | 31.87 |
| Units | % |
| Sigma Value | 2 |
| Sequence | Final |
| Alloy1 | AA 6063 : 1.19 |
| Alloy2 | No Match : *2.95 |
| Flags | No Al |
| SAMPLE | |
| HEAT | |
| LOT | |
| BATCH | |
| MISC | |
| NOTE | |

| | % | ± | Error |
|----|--------|---|-------|
| Sn | < LOD | : | 0.002 |
| Pd | < LOD | : | 0.002 |
| Ag | < LOD | : | 0.003 |
| Ru | < LOD | : | 0.002 |
| Mo | < LOD | : | 0.002 |
| Nb | < LOD | : | 0.002 |
| Zr | < LOD | : | 0.002 |
| Bi | < LOD | : | 0.002 |
| Pb | < LOD | : | 0.002 |
| Se | < LOD | : | 0.002 |
| W | < LOD | : | 0.005 |
| Zn | 0.014 | ± | 0.002 |
| Cu | 0.005 | ± | 0.002 |
| Ni | < LOD | : | 0.009 |
| Co | < LOD | : | 0.008 |
| Fe | 0.238 | ± | 0.014 |
| Mn | < LOD | : | 0.019 |
| Cr | < LOD | : | 0.032 |
| V | < LOD | : | 0.066 |
| Ti | < LOD | : | 0.123 |
| S | < LOD | : | 0.002 |
| P | < LOD | : | 0.002 |
| Si | 0.556 | ± | 0.085 |
| Mg | < LOD | : | 1.432 |
| Sb | < LOD | : | 0.003 |
| Al | 98.916 | ± | 0.695 |

Supervised By: _____

Annexe II :

Les composants de acier A60 choisi en % sont :

Thermo
SCIENTIFIC

Thermo Fisher Scientific
900 Middlesex Turnpike
Billerica, MA 01821

Certificate of Verification

XL3t-62240

Reading No 260
Mode General Metals
Time 2016-04-28 14:14
Duration 30.76
Units %
Sigma Value 2
Sequence Final
Alloy1 No Match : *4.70
Alloy2 No Match : *5.01
Flags
SAMPLE Echantillon N° 2
HEAT
LOT
BATCH
MISC
NOTE

| | % | ± | Error |
|----|--------|---|--------|
| Sn | 0.017 | ± | 0.005 |
| Pd | < LOD | : | 0.007 |
| Ag | < LOD | : | 0.013 |
| Ru | < LOD | : | 0.003 |
| Mo | 0.068 | ± | 0.002 |
| Nb | < LOD | : | 0.002 |
| Zr | < LOD | : | 0.002 |
| Bi | < LOD | : | 0.002 |
| Pb | < LOD | : | 0.004 |
| Se | < LOD | : | 0.003 |
| W | < LOD | : | 0.030 |
| Zn | 0.023 | ± | 0.008 |
| Cu | 0.983 | ± | 0.030 |
| Ni | 0.756 | ± | 0.024 |
| Co | 0.140 | ± | 0.057 |
| Fe | 97.148 | ± | 0.077 |
| Mn | 0.612 | ± | 0.025 |
| Cr | 0.169 | ± | 0.006 |
| V | 0.014 | ± | 0.004 |
| Ti | 0.051 | ± | 0.005 |
| Sb | < LOD | : | 0.010 |
| Al | < LOD | : | 80.000 |

Supervised By: _____

BIBLIOGRAPHIE

- [1].A. Compa. Technologie professionnelle, paris 1984
- [2]. Introduction à la résistance des matériaux Cours RDM / A.U : 2012-2013x
- [3] Charpy, G. (1904)- Sur l'essai des métaux par flexion de barreaux entaillés. Mémoires et comptes rendu de la société des ingénieurs civils de France, 468-482.
- [4]. résistance des matériaux Département Maintenance Industrielle support de cours
- [5]. Mécanique du solide et des matériaux Elasticité-Plasticité-Rupture Jean-Claude Charmettes.
- [6] c. BATHIAS, JEAN-PAUL. BAÏLON, La fatigue, des Matériaux et des structures hermès paris e² édition (1997).
- [7] A. BRAND - J-f FLAVENOT' R. GRÉGOIRE et C. TotwmR donné technologique sur la fatigue, CETIM 3e édition (1992).
- [8] A. BRAND, Calcul des pièces à la fatigue, CETIM (1980).
- [9] R. CAZAUD, G. POMEY, P. RABBE et Ch. JANSSEN, La fatigue des métaux, DUNOD Paris5e édition (1969).
- [10] Buthod.H Lieurade.H.P (1986) influence des propriétés mécaniques sur les caractéristiques d'endurance en flexion d'une gamme étendue d'acier. Rev de met.
- [11] C. BOUHELIER, Mécanique de la rupture. Seuil de propagation. Propagation des fissures Par fatigue, CETIM 3e édition (1989).

[12] Bernard Barthélémy (1980) notions pratiques de mécanique de la rupture
Paris Eyrolles.

[13] Didier DUPRAT (2004) Fatigue et mécanique de la rupture des pièces en
alliage
léger Bureau d'études. Aérospatiale Toulouse

[14] P.BONNET (2004-2005) fatigue des métaux 'matériaux et procédés'
Institut supérieur de mécanique de PARIS.

[15] Marc Blétry 2007 Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux.

[16] Alexis BANVILLET 2001 Prédiction de durée de vie en fatigue multiaxiale sou
chargements réels : vers des essais accélérés Thèse de Doctorat, L'ENSAM Centre de
Bordeaux.