

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Laboratory of Green and Mechanical Development LGMD

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention de diplôme d'ingénieur d'état en génie mécanique

Thème :

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

Réalisé par : **Mohamed Hocine BEZZAOUYA**

Présenté et soutenu publiquement le 09/10/2022

Composition du jury

| | | | |
|------------------|----------------------------|-------------------|------------|
| Président | M. Said RECHAK | Professeur | ENP |
| Promoteur | M. Brahim GUERGUEB | MAA | ENP |
| Promoteur | M. Yacine BELKACEMI | MCA | ENP |
| Examineur | M. Djamel SAIDI | MCB | ENP |

ENP 2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Laboratory of Green and Mechanical Development LGMD

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention de diplôme d'ingénieur d'état en génie mécanique

Thème :

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

Réalisé par : **Mohamed Hocine BEZZAOUYA**

Présenté et soutenu publiquement le 09/10/2022

Composition du jury

| | | | |
|------------------|----------------------------|-------------------|------------|
| Président | M. Said RECHAK | Professeur | ENP |
| Promoteur | M. Brahim GUERGUEB | MAA | ENP |
| Promoteur | M. Yacine BELKACEMI | MCA | ENP |
| Examineur | M. Djamel SAIDI | MCB | ENP |

ENP 2022

ملخص:

إن أعراض التضرر تظهر عندما تفقد المواد القدرة على المقاومة.

ان الهدف من هذه الدراسة هو التقدير الكمي للتضرر تحت التحمل المفرط عن طريق اختبارات الشد السكوني لعينات مشققة مكونة من الفولاذ A60 بعد اخضاعها لإجهادات دورية بواسطة آلة الانحناء الدوراني.

الكلمات المفتاحية: الإعياء ، التحميل المفرط، فقدان المقاومة، تركيز الإجهادات، الإنحناء الدوراني

ABSTRACT

Damage can be measured by loss of strength. The purpose of this study is to quantify the damage by monotonic tensile tests on specimens with double parallel notches. The specimens used are made of A60 (E335) steel having undergone cyclic stresses on a rotating fatigue bending machine.

Key words: Fatigue, damage, loss of resistance, rotating bending, notches

Résumé

L'endommagement se manifeste par une perte de résistance. Le but de cette étude est de quantifier l'endommagement par des essais de traction monotones sur des éprouvettes avec double entailles parallèle. Les éprouvettes utilisées sont en acier A60 (E335) ayant subi des sollicitations cycliques sur une machine de fatigue en flexion rotative.

Mots-clés: Fatigue, endommagement, perte de résistance, entaille, flexion rotative.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à ma famille qui m'a soutenue
et encouragé jusqu'au bout et surtout mes parents, et à
tous ceux qui m'ont soutenu de près et de loin*

Remerciement

En premier lieu je tiens à remercier chaleureusement mes encadrants Mr Y.Belkacemi et Mr B.Guergueb d'avoir proposé et dirigé mon projet de fin d'étude et pour leur disponibilité durant le travail et leurs orientation

Je remercie le Professeur S. Rechak, et Dr. D. Saidi en tant que président et examinateur et exprime ma reconnaissance pour leur formation.

J'exprime aussi ma profonde gratitude à tous les enseignants du département de génie mécanique qui ont assuré ma formation et qui m'ont permis d'acquérir de précieuses connaissances scientifiques

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes amis et camarade de classe de l'année passée qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma formation

Sommaire

Sommaire

Liste des figures

Liste des photos

Liste des tableaux

Nomenclature

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 16 |
| Chapitre 1 : Généralité sur la fatigue et effet d'entaille | 18 |
| Introduction | 19 |
| 1.1 L'endommagement de fatigue | 19 |
| 1.1.1 – Fatigue : | 19 |
| 1.1.2- Endurance : | 19 |
| 1.1.3- Notions de limite d'endurance et de limite de fatigue : | 19 |
| 1.1.3.1 - Limites d'endurance : | 19 |
| 1.1.3.2 - Limites de fatigue : | 19 |
| I.1.4- Détérioration due à la fatigue : | 19 |
| 1.1.5- Définition de dommage : | 20 |
| 1.2 – L'essai de fatigue | 21 |
| 1.2.1- Définitions et symboles des termes utilisés en fatigue : | 21 |
| 1.2.1.1- Contrainte Nominale : | 21 |
| 1.2.1.2 - Cycles de contrainte : | 21 |
| I.2.1.3- Rapport d'endurance :..... | 23 |
| 1.2.2-Classification des contraintes d'essai de fatigue : | 23 |
| 1.2.2.1- Essai sous amplitude constante : | 23 |
| 1.2.3- Classification des modes de sollicitation :..... | 24 |
| 1.2.4- Présentation réelle des résultats : | 24 |
| 1.2.4.1-Courbe de Wöhler (courbe S-N) : | 25 |
| 1.2.5 - Estimation des propriétés de résistance à la fatigue et d'endurance : | 26 |
| 1.2.6 Les éprouvettes d'essai de fatigue | 26 |
| 1.2.6.1 forme des éprouvettes | 26 |
| 1.2.6.2 dimensions des éprouvettes | 27 |
| 1.2.6.3 Usinage des éprouvettes | 28 |
| 1.2.7 Relation empirique entre la limite d'endurance et d'autres propriétés de l'acier | 28 |
| 1.3 effet d'entaille | 29 |
| 1.3.1 Concentration de contraintes | 29 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| 1.3.2 Facteur de concentration de contraintes théorique K_t | 31 |
| Conclusion : | 32 |
| Chapitre 2 : préparation des essais | 17 |
| Introduction | 34 |
| 2.1 Matériau d'essai : | 34 |
| 2.1.1 propriété : | 34 |
| 2.1.2 Etats d'emploi : | 34 |
| 2.1.3 Emplois types | 34 |
| 2.1.4 Composition chimique | 34 |
| 2.1.5 caractéristique mécanique | 34 |
| 2.2 Eprouvette d'essai : | 35 |
| 2.2.1 Eprouvette lisse | 35 |
| 2.2.2 Eprouvette avec entaille : | 35 |
| 2.2.2 Usinages des éprouvette : | 38 |
| 2.3 Machine et appareils utilisé | 38 |
| 2.3.1 Machine de flexion rotative | 38 |
| 2.3.1.1 description de la machine | 38 |
| 2.3.1.2 Mode de sollicitation de l'éprouvette | 39 |
| 2.3.2 Machine de traction utilisée | 40 |
| 2.3.3 les appareils thermiques : | 41 |
| 2.3.4 Le tachymètre | 43 |
| Conclusion : | 43 |
| Chapitre 3 : résultat des essais | 44 |
| Introduction : | 45 |
| 3.1 Caractérisation de l'acier : | 45 |
| 3.2 observations sur les ruptures des éprouvettes | 50 |
| 3.3 résultats des essais | 51 |
| 3.4 évolutions de la température en tête d'entaille | 71 |
| Conclusion : | 73 |
| Conclusion générale | 74 |
| Bibliographie | 76 |

Liste des figures

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1. 1 Longueur de fissure en fonction du nombre de cycle | 20 |
| Figure 1. 2: Cycle des contrainte de fatigue..... | 22 |
| Figure 1. 3: différents types de sollicitation | 23 |
| Figure 1. 4: Type de cycle de contrainte | 24 |
| Figure 1. 5: Courbe de Wöhler | 25 |
| Figure 1. 6: éprouvettes à section circulaire | 27 |
| Figure 1. 7: éprouvettes à section rectangulaire..... | 27 |
| Figure 1. 8: Flexion d'un cylindre de diamètre constant..... | 30 |
| Figure 1. 9: flexion d'un cylindre avec entaille..... | 31 |
| | |
| Figure 2. 1: Epreuve lisse..... | 35 |
| Figure 2. 2: éprouvettes avec entaille pour la caractérisation..... | 35 |
| Figure 2. 3: éprouvette avec entaille pour les essais de fatigue | 36 |
| Figure 2. 4: Forme de l'entaille..... | 37 |
| Figure 2. 5: Schéma de la machine de flexion rotative [6]..... | 38 |
| Figure 2. 6: Mode de sollicitation | 39 |
| | |
| Figure 3. 1: graphe contrainte-déformation pour l'éprouvette lisse N°1 | 46 |
| Figure 3. 2: graphe force-déplacement pour l'éprouvette lisse N°1 | 46 |
| Figure 3. 3: graphe contrainte-déformation pour l'éprouvette lisse N°2 | 47 |
| Figure 3. 4: graphe force-déplacement pour l'éprouvette lisse N°2 | 47 |
| Figure 3. 5: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille N°1 | 49 |
| Figure 3. 6: : graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille N°2..... | 49 |
| Figure 3. 7: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=10/ N°1..... | 55 |
| Figure 3. 8: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=10/ N°2..... | 56 |
| Figure 3. 9: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=15/ N°3..... | 57 |
| Figure 3. 10: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=20/ N°3..... | 58 |
| Figure 3. 11: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=25/ N°2..... | 59 |
| Figure 3. 12: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=30/ N°1..... | 60 |
| Figure 3. 13: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=35/ N°1..... | 61 |
| Figure 3. 14: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=40/ N°1..... | 62 |
| Figure 3. 15: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=40/ N°2..... | 63 |
| Figure 3. 16: variation de F_m (kN) en fonction de la distance entre les entailles X(mm)..... | 64 |
| Figure 3. 17: variation de τ (%) en fonction de la distance entre les entailles X(mm)..... | 65 |
| Figure 3. 18: Variation du nombre de cycles jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les deux entailles X | 71 |

Liste des photos

Liste des photos

| | |
|--|-----------|
| Photo 2. 1: La distance X entre les doubles entailles parallèles | 36 |
| Photo 2. 2:Outil pour l'usinage des entailles..... | 37 |
| Photo 2. 3: Machine de flexion rotative « SCHENCK » | 38 |
| Photo 2. 4: machine de traction utilisée | 40 |
| Photo 2. 5: : AMPROBE IR-730-Eur thermomètre infrarouge 30 :1 | 41 |
| Photo 2. 6: : la caméra thermique infrarouge PCE-TC 30N la caméra thermique infrarouge PCE-TC 30N | 42 |
| Photo 2. 7:le tachymètre | 43 |
| | |
| Photo 3. 1: éprouvette lisse en cour de traction..... | 45 |
| Photo 3. 2: éprouvette lisse avant et après l'essai de traction | 48 |
| Photo 3. 3: éprouvette avec double entaille avant et après la traction | 50 |
| Photo 3. 4: : observation sur les ruptures des éprouvettes..... | 51 |
| Photo 3. 5 : observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 10 / N°1 | 54 |
| Photo 3. 6: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 10 / N°2 | 55 |
| Photo 3. 7: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 15 / N°3 | 56 |
| Photo 3. 8: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 20 / N°3 | 57 |
| Photo 3. 9: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 25 / N°2 | 58 |
| Photo 3. 10: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 30 / N°1 | 59 |
| Photo 3. 11: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 35 / N°1 | 60 |
| Photo 3. 12: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 40 / N°1 | 61 |
| Photo 3. 13: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 40 / N°2 | 62 |
| Photo 3. 14: observation de la rupture de l'éprouvette en fatigue double entaille X= 10 / N°3 | 65 |
| Photo 3. 15: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 15 / N°1 | 66 |
| Photo 3. 16: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 15 / N°2 | 66 |
| Photo 3. 17: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 20 / N°1 | 67 |
| Photo 3. 18: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 20 / N°2 | 67 |
| Photo 3. 19: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 25 / N°1 | 68 |
| Photo 3. 20: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 25 / N°3 | 68 |
| Photo 3. 21: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 30 / N°3 | 69 |
| Photo 3. 22: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 35 / N°2 | 69 |
| Photo 3. 23: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 35 / N°3 | 70 |
| Photo 3. 24 : observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 40 / N°3 | 70 |
| Photo 3. 25: fixation de l'appareil thermique | 71 |
| Photo 3. 26: photo prise par caméra thermique..... | 72 |

Liste des tableaux

Liste des tableaux

| | |
|---|-----------|
| Tableau 2. 1:composition chimique de l'acier A60 | 34 |
| Tableau 2. 2:Propriété mécanique de l'acier A60 | 34 |
| Tableau 3. 1 : propriété mécanique de l'acier d'après les essais..... | 48 |
| Tableau 3. 2: Résultats de l'essai de traction des éprouvettes. | 53 |
| Tableau 3. 3: Les valeurs de F_m et de rapport de surface pour chaque éprouvette..... | 64 |
| Tableau 3. 4: Evolution de la température au niveau de la tête d'entaille..... | 72 |

Nomenclature

Nomenclature

N : Nombre de cycles.

σ_D : Limite d'endurance (MPa).

R_m : Résistance à la traction (MPa)

R_e : Limite d'élasticité (MPa)

σ_a : Amplitude de contrainte (MPa)

σ_m : Contrainte moyenne (MPa)

σ_{max} : Contrainte maximale (MPa)

σ_{min} : Contrainte minimale (MPa)

R_σ : Rapport de contrainte

K_t : Facteur de concentration de contrainte dans le domaine élastique.

D : diamètre extérieur ou largeur extérieur de la pièce. (mm)

d: diamètre ou largeur en fond d'entaille. (mm)

r : rayon en fond d'entaille.(mm)

E : Module de Young (MPa)

X : Distance entre entaille (mm)

S : Surface au niveau de l'entaille (mm²)

τ : Rapport des surfaces

T : Température °C

Introduction générale

Introduction générale

Les observations faites sur des pièces mécaniques en utilisation montrent qu'elles se rompent sous l'effet des charges d'utilisation qui apparaissent modérées par rapport à leur capacité à supporter des charges statiques.

Ce phénomène est appelé fatigue ou endommagement par fatigue.

Les problèmes de fatigue structurelle existent dans de nombreux domaines tels que la marine, l'aviation et les machines. En 1869, l'ingénieur ferroviaire bavarois A. Wöhler a réalisé la première étude systématique de ce phénomène dans le cadre de l'étude de rupture des essieux des wagons de marchandises. Il soutient que, tout comme dans un organisme vivant, un stress répété réduit la résistance du matériau, "fatiguant" ainsi le matériau. L'idée ne correspond pas à la réalité physique, mais le terme sert toujours de nom générique au phénomène. L'étude de la fatigue des matériaux reste aujourd'hui l'objet de nombreux efforts de recherche, principalement sur les métaux.

L'endommagement par fatigue est affecté par de multiples facteurs métallurgiques (composition chimique et structure cristalline, inclusions, défauts, etc.), géométriques et mécaniques (type et fréquence de chargement, effets d'échelle, présence d'entailles, état des surfaces, etc.) sans oublier l'effet de l'environnement (température, corrosion par fatigue, etc.).

L'objectif de ce travail est de montrer l'effet de la modification de la distance entre deux entailles parallèles sur l'endommagement par fatigue.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres. Le premier concerne des généralités sur la fatigue. Le chapitre 2 présente l'effet de l'entaille. Le chapitre 3 traite la préparation des essais. La partie expérimentale de ce travail est présentée dans le chapitre 4. L'essai d'endommagement par fatigue en flexion rotative des éprouvettes d'acier A60 comporte des doubles entailles parallèles, tandis que la distance entre les entailles est modifiée et son effet étudié.

Chapitre 1 :

Généralité

sur la fatigue

et effet

d'entaille

Introduction

L'état initial du matériau est l'état d'historique de contrainte connu, la dernière étape d'endommagement est la rupture de l'élément volumique, lorsque la fissure macroscopique débute. L'élément volumique est considéré comme complètement endommagé.

Les fissures s'amorcent en majorité à partir de la surface de la pièce, à des concentrations de contraintes avec la géométrie (entailles, filets, congés, arrêts, congé, rainure)

Pour cette raison, nous sommes intéressés à comprendre l'influence de l'entaille sur éprouvettes

1.1 L'endommagement de fatigue

1.1.1 – Fatigue :

La fatigue fait référence au comportement d'un matériau sous des cycles répétés de contrainte ou de déformation, ce qui peut entraîner la détérioration du matériau et éventuellement provoquer sa rupture soudaine.

1.1.2- Endurance :

L'endurance est la capacité de résistance à la fatigue des pièces et des assemblages [1]

1.1.3- Notions de limite d'endurance et de limite de fatigue :

1.1.3.1 - Limites d'endurance :

Pour une contrainte moyenne donnée, la limite d'endurance est l'amplitude de contrainte maximale à laquelle on observe 50 % de rupture après un nombre fini de N cycles [7]

Cette valeur peut être déterminée à l'aide de méthodes statistiques et est exprimée en $\sigma_D(N)$

1.1.3.2 - Limites de fatigue :

Pour une contrainte moyenne donnée, la limite de fatigue est l'amplitude de contrainte maximale à laquelle aucune rupture n'est observée après un nombre infini de cycles N [7]

1.1.4- Détérioration due à la fatigue :

Les fissures se propagent dans différents matériaux et dans des différentes conditions à différentes vitesses, Des expériences ont été réalisées dans lesquelles la longueur de la fissure a été mesurée en fonction du nombre de cycles

La figure suivante montre certaines courbes de croissance de fissures typiques à différents niveaux de contrainte, chacune aboutissant à une rupture à une certaine longueur de fissure critique

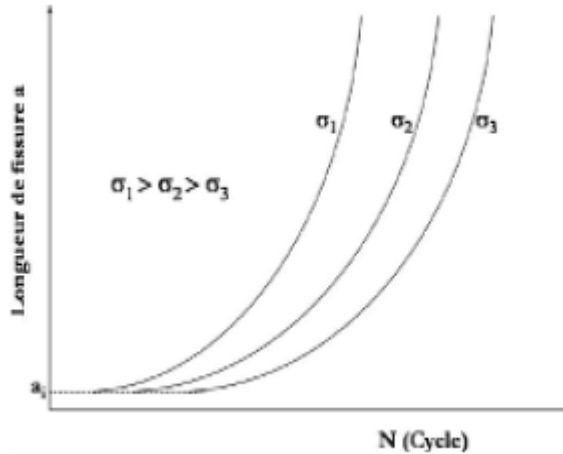


Figure 1. 1 Longueur de fissure en fonction du nombre de cycle

L'ordre dans lequel les niveaux de contrainte sont appliqués a un effet important sur la progression des dommages de fatigue, par exemple, il semble logique que de grandes fissures déclenchées par une contrainte élevée précédente ne se propagent pas aussi rapidement sous l'influence d'une faible contrainte ultérieure. Les petites fissures laissées par les faibles niveaux de contrainte antérieurs peuvent se développer très rapidement sous la contrainte élevée ultérieure, tandis que l'écroutissage local dû à la déformation aux extrémités des fissures est fortement affecté. Effectuer à un stress ultérieur plus ou moins élevé.

Tous ces changements tendent à être moyennés si les niveaux de contraintes sont appliqués aléatoirement, et comme un grand nombre de spectres de contraintes sont appliqués aléatoirement, il est raisonnable de penser que les changements sont moyennés : c'est sur cette base que la théorie de la détérioration cumulative est établie [4]

1.1.5- Définition de dommage :

La notion de dommage a deux aspects, l'un est physique (le plus intuitif) et l'autre est descriptif, ce qui est très important du point de vue de l'utilisation des matériaux de construction [1]

Les aspects physiques de l'endommagement correspondent aux modifications des propriétés physiques d'un matériau en fatigue qui reflètent les modifications que subit le matériau sous contrainte.

L'aspect descriptif du concept d'endommagement est de quantifier la durabilité d'un matériau face à un historique de déformation plus ou moins variable.

Chapitre 1 : Généralité sur la fatigue et effet d'entaille

Les dommages sont généralement définis en fonction des paramètres suivants :

a)- Evolution des fissures et absorption des propriétés plastiques :

Lors des essais de fatigue, la croissance de fissure de longueur L est caractérisée par sa longueur L_0 correspondant à une fissure microscopique ($n=1$), jusqu'à la valeur critique L_c Correspond a la rupture ($n=N$).

Plusieurs mécanismes de déformation ont été proposés pour expliquer la propagation des fissures, par exemple, la formation de nouveaux fronts liés à la vitesse de fissure peut s'expliquer par l'absorption d'énergie dans la zone plastique présente en extrémité de fissure [1]

b)- Perte de résistance statique à la traction

Si l'essai de fatigue est arrêté et que l'échantillon est soumis à un essai de traction statique avant la rupture finale, la rupture se produit à un niveau de contrainte σ_{ur} situé entre R_m et σ_a [1]

R_m est la résistance du matériau d'origine sous tension statique et σ_a est l'amplitude de la contrainte appliquée

c) - Réduction de la limite d'endurance :

La limite d'endurance σ_D diminue avec l'augmentation du nombre de cycle appliqué pour atteindre à la rupture la valeur critique σ_e^* .

d)- La déformation plastique augmente :

Le changement de déformation plastique augmente avec le nombre de cycles appliqués à des charges cycliques élevées

1.2 – L'essai de fatigue

1.2.1- Définitions et symboles des termes utilisés en fatigue :

1.2.1.1- Contrainte Nominale :

La contrainte considérée dans l'essai de fatigue (contrainte calculée) est la contrainte nominale Elle est calculée à partir de la section nette de la pièce considérée, en utilisant la formule usuelle de résistance r des matériaux relative au domaine élastique [7]

1.2.1.2 - Cycles de contrainte :

Un cycle de contrainte existe lorsqu'une contrainte d'amplitude variable dans le temps se répète périodiquement. Le cycle sinusoïdal est le plus couramment utilisé.

La contrainte cyclique peut être considérée comme une superposition de contrainte statique (contrainte moyenne) et de contrainte alternée pure (considérée comme contrainte dynamique) .[7]

a) - contrainte maximale σ_{max}

La valeur algébrique maximale de la périodicité des contraintes, positive en traction et négative en compression

b)-contrainte minimale σ_{min}

Chapitre 1 : Généralité sur la fatigue et effet d'entaille

La plus petite valeur algébrique que la contrainte prend périodiquement.

c)-Contrainte moyenne σ_m

Moyenne algébrique des contraintes maximales et minimales.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \dots \dots \dots (1.1)$$

d)- amplitude de contrainte σ_a

La contrainte alternée est égale à la moitié de la différence algébrique entre (σ_{max}) et (σ_{min})

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

e)- Rapport de contrainte :

Le rapport algébrique de la contrainte minimale à la contrainte maximale dans le cycle.

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \dots \dots \dots (1.3)$$

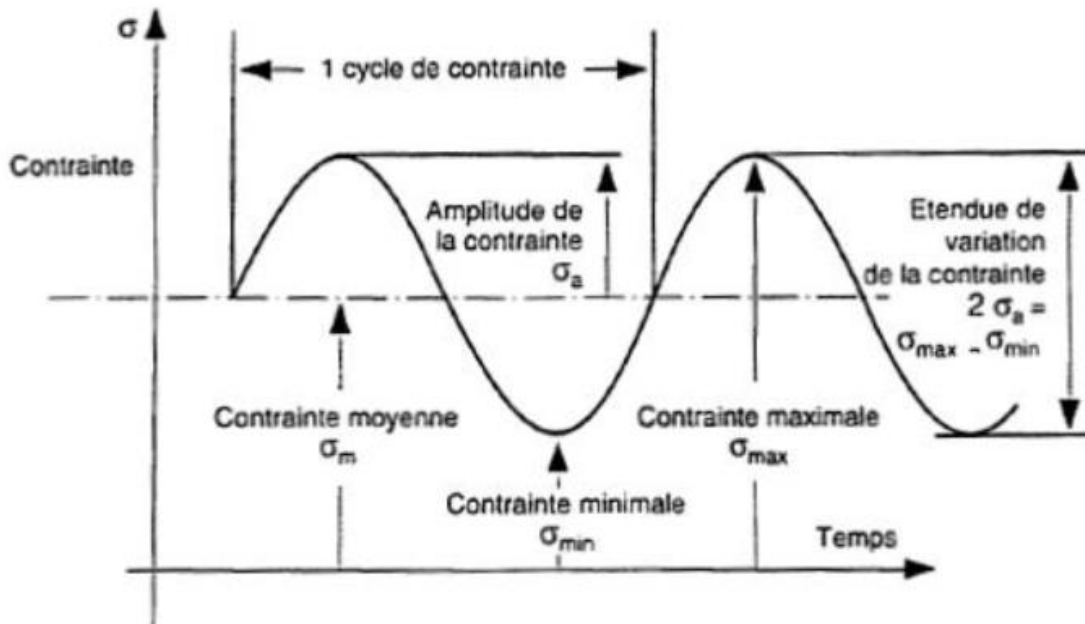


Figure 1. 2: Cycle des contrainte de fatigue

1.2.1.3- Rapport d'endurance :

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

1.2.2-Classification des contraintes d'essai de fatigue :

Deux grandes catégories d'essais de fatigue peuvent être distinguées : Essais à l'amplitude constante et variable

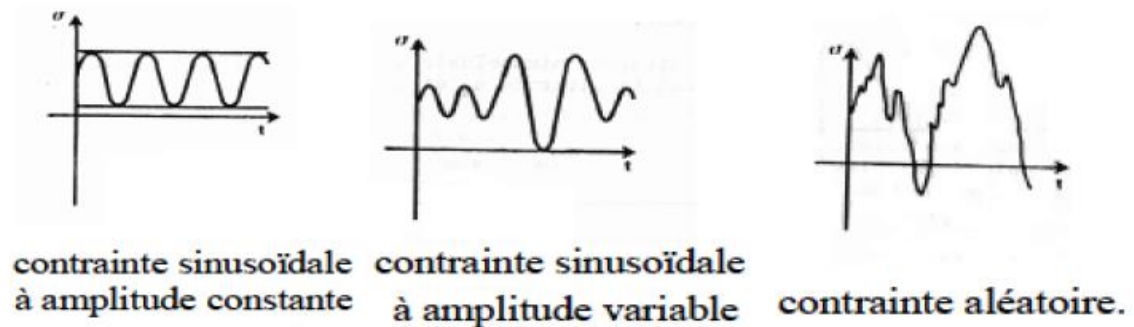


Figure 1. 3: différents types de sollicitation

1.2.2.1- Essai sous amplitude constante :

Dans cette catégorie, la contrainte de service est placée à un seul niveau d'amplitude et on peut distinguer trois cas :

1- Sollicitation aux efforts statiques et aux efforts variable de même nature et de même direction, auquel cas les trois sollicitation peuvent être distinguées en fonction du temps quelle que soit la nature de la force appliquée (traction, flexion, torsion).

- Effort alterné pour ($\sigma_m < \sigma_a$) (l'effort est symétrique si ($\sigma_m = 0, R = -1$) et dissymétrique pour ($0 < \sigma_m < \sigma_a, -1 < R < 0$))
- Effort répété ($\sigma_m = \sigma_a, R = 0$)
- Effort ondulés pour ($\sigma_m > \sigma_a, 0 < R < 1$)

2- Sollicitations aux efforts statiques et variables de nature différente
3- Sollicitations aux efforts variables de nature différente.

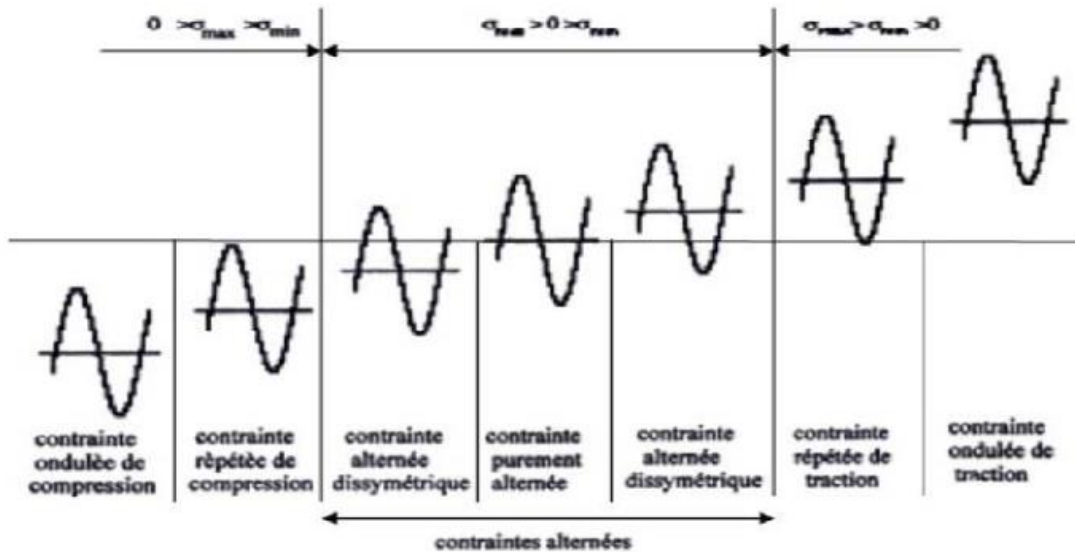


Figure 1. 4: Type de cycle de contrainte

1.2.3- Classification des modes de sollicitation :

Les sollicitations cycliques peuvent être classées en fonction de la nature de la force que la machine applique à la pièce ou à l'éprouvette.

- Essai de flexion plane
- Essai de flexion en rotative
- Essai sous efforts axiaux
- Essai de torsion
- Combine les tests de résistance, la tension de torsion statique et dynamique et la torsion... etc.

Différentes machines de test peuvent effectuer ces différents tests.

1.2.4- Présentation réelle des résultats :

Il existe plusieurs représentations possibles des résultats obtenus lors des essais de fatigue, selon la disposition adoptée pour les paramètres intervenant dans la mesure, elles sont

- Le temps. Représente le nombre de cycles N
- Contrainte, Statique R_e . R_m . σ_m et Dynamique : σ_{max} , σ_{min} . σ_a

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

1.2.4.1-Courbe de Wöhler (courbe S-N) :

Une courbe de Wöhler appelée S-N (Stress-Number of cycles) pour visualiser le comportement d'une pièce ou d'un matériau dans le domaine de la fatigue

La courbe représente l'évolution de l'une des contraintes ci-dessus en fonction du nombre de cycles jusqu'à la rupture (rapporté sur une échelle logarithmique). Afin de tracer une telle courbe, les essais sont généralement effectués sous une 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 (σ , N) et à partir d'un certain nombre d'essai à contrainte généralement décroissante, on peut tracer la courbe qui a l'allure suivante (fig1.5)

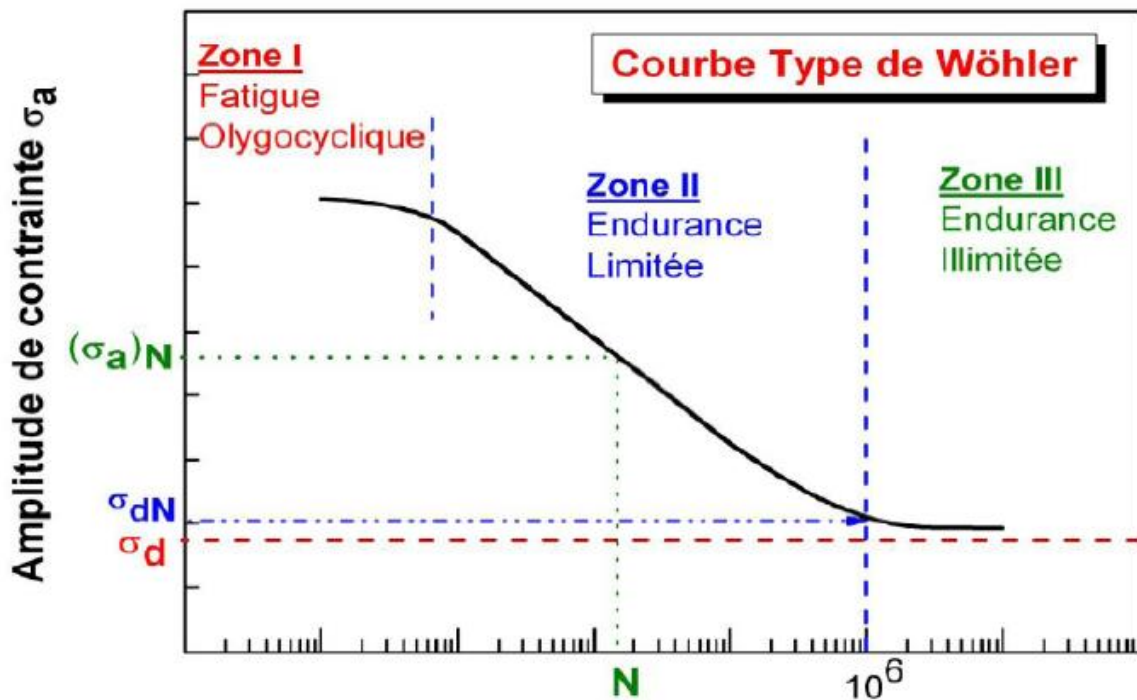


Figure 1. 5:Courbe de Wöhler

Une courbe de Wöhler se compose de trois domaines:

1- Zone de fatigue oligocyclique où la rupture se produit après des cycles courts Nombre de cycles ($N_R \leq 10^{+4}$ cycles).

Chapitre 1 : Généralité sur la fatigue et effet d'entaille

2- Zone d'endurance limitée ($N_R > 10^{+4}$), la rupture se produit systématiquement après avoir augmenté le nombre de cycles avec réduction du contrainte .

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

1.2.5 - Estimation des propriétés de résistance à la fatigue et d'endurance :

La dispersion des résultats des essais de fatigue est actuellement considérée comme un fait d'expérience et un fait physique.

L'action simultanée de ces deux causes se traduit par une dispersion des résultats d'essai souvent de l'ordre de grandeur et parfois assez importante.

C'est pourquoi la détermination expérimentale des propriétés de fatigue nécessite l'utilisation de méthodes statistiques.

La dispersion des résultats est principalement due à trois raisons principales

- 1- Les raisons à l'intérieur de la matière : Ce sont des hétérogénéités, des inclusions...etc.
- 2- Pour des raisons dues ou liées à la préparation de l'éprouvette : L'opération d'usinage de l'éprouvette a un effet sur l'endurance de la pièce, le traitement thermique est aussi à l'origine de la dispersion, puisqu'il n'est pas possible de façon rigoureuse manière.
- 3- Causes externes de l'éprouvette Celles-ci incluent l'incertitude d'assemblage et l'ajustement de la charge appliquée et la fréquence du cycle.

1.2.6 Les éprouvettes d'essai de fatigue

Les éprouvettes utilisées pour les essais de fatigue sont de formes et de tailles très diverses. Cependant, deux types principaux peuvent être distingués : les éprouvettes de section circulaire et les éprouvettes prismatiques de section rectangulaire.

1.2.6.1 forme des éprouvettes

La forme de l'éprouvette doit essentiellement répondre aux conditions géométriques requises pour les essais de fatigue. De plus, il ne doit pas contenir de singularités entraînant des dommages localisés. La plupart des ruptures par fatigue s'amorcent à la surface et la résistance à la fatigue est fortement affectée par l'état de surface

Les éprouvette peuvent être trouvés à:

- * Eprouvettes à section circulaire : congés à raccordement tangentiel entre la partie utile et les extrémités de l'éprouvette, ou arcs de rayon continu entre les extrémités. Fig.1.6.[3]

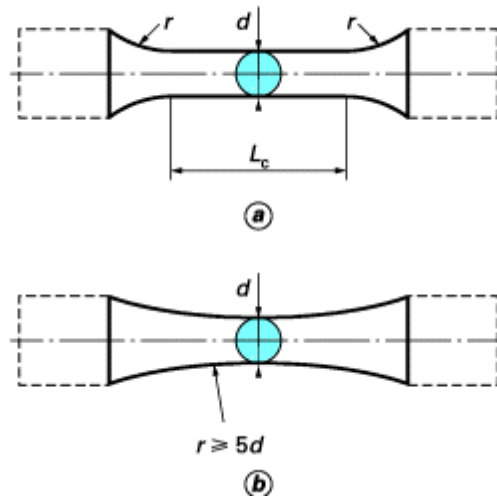


Figure 1. 6: éprouvettes à section circulaire

*Éprouvette de section rectangulaire d'épaisseur uniforme sur toute la partie à essayer, avec des angles arrondis reliés tangentiellement entre la partie utile et la tête de l'éprouvette, ou des arcs de rayon continu entre les extrémités.Fig.1.7.[6]

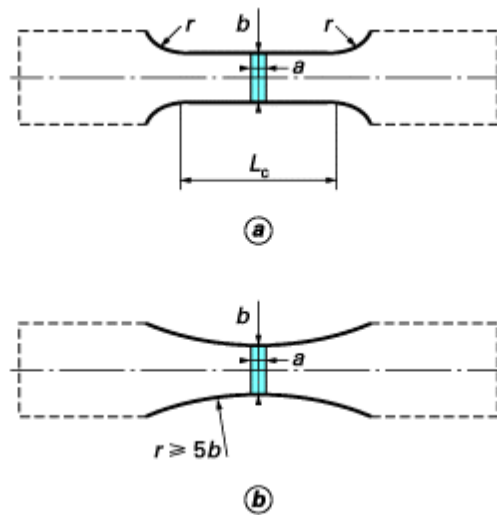


Figure 1. 7: éprouvettes à section rectangulaire

1.2.6.2 dimensions des éprouvettes

Selon la norme française des produits sidérurgiques - NF A 03-401-1986, les dimensions des éprouvettes doivent satisfaire :

Chapitre 1 : Généralité sur la fatigue et effet d'entaille

- La contrainte d'essai maximale doit toujours être supérieure à 25 % de la capacité de la machine et la contrainte minimale doit être supérieure à 2,5 % de la capacité.
- La fréquence propre de l'éprouvette est au moins le double de la fréquence de la machine.
- Le rayon de congé entre la partie utile de l'éprouvette et la tête d'amarrage doit être choisi pour avoir un facteur théorique de concentration de contraintes inférieur à 1,05 afin d'éviter les ruptures dans la zone de connexion.
- Le diamètre de la pièce à tester doit être compris entre 5 et 10 mm et la longueur de la partie utile doit être supérieure à trois fois le diamètre de la zone
- Les dimensions de la tête d'amarrage doivent être choisies de manière à ce que le rapport de la section de la tête d'amarrage à la section de la partie utile soit supérieur à 1,5.
- La tolérance d'excentricité entre la partie utile et la tête d'amarrage est de $\pm 0,025$ mm et la tolérance de forme de la partie utile est de $\pm 0,02$ mm.s

1.2.6.3 Usinage des éprouvettes

Afin de ne pas modifier la structure et les propriétés du métal, l'éprouvette doit être traitée pour éviter tout échauffement et minimiser l'écrouissage de la surface de l'éprouvette.

L'usinage devait se faire en préparant une ébauche d'une épaisseur supplémentaire de 0,5 mm, suivie de passes de finition de plus en plus fines pour atteindre une profondeur de passe de 0,025 mm. Enfin, polissez longitudinalement la surface de l'échantillon avec un tissu abrasif et du papier de verre de plus en plus fins, et enfin terminez avec du papier de silicium carbone imperméable à 600 degrés. Il est donc nécessaire d'obtenir une finesse de surface de 0,025 mm. [2]

1.2.7 Relation empirique entre la limite d'endurance et d'autres propriétés de l'acier.

Différents chercheurs dans le domaine de la fatigue des métaux ont proposé des relations empiriques liant la limite de durabilité à d'autres propriétés telles que : limite de rupture, limite d'élasticité, striction et allongement, nous donnons ci-dessous quelques-unes des relations proposées par différents auteurs et citées par cazaud [2]

MAILANDER

$$\sigma_D = (0.49 \pm 20\%)R_m \dots \dots \dots (1.4)$$

STRIBECK :

$$\sigma_D = 0.285 \pm 20\%(R_m + R_e) \dots \dots \dots (1.5)$$

ROGERS

$$\sigma_D = 0.4 R_e + 0.25R_m \dots \dots \dots (1.6)$$

HOUDREMENT ET MAILANDER

$$\sigma_D = 0.25(R_m + R_e) + 5 \dots \dots \dots (1.7)$$

JUNGER

$$\sigma_D = 0.2(R_e + R_m + S\%) \dots \dots \dots (1.8)$$

LEQUIS, BUCHHOLTZ et SCHULTZ :

$$\sigma_D = 0.175(R_e + R_m - A\% + 100) \dots \dots \dots (1.9)$$

FRY, KESSNER et OETTEL :

$$\sigma_D = \alpha R_m + \beta R_e \dots \dots \dots (1.10)$$

Dans les relations empirique ci-dessus nous avons :

Re : Limite élastique

Rm : limite de rupture

A : allongement en pourcentage

S : striction en pourcentage

α et β facteurs tirés d'un abaque en fonction de Rm

1.3 effet d'entaille

La plupart des structures sont composées d'éléments aux formes géométriques complexes. Ces entailles mécaniques sont des lieux de concentration des contraintes et ont un effet néfaste sur la résistance de la structure. Les modifications de la section de la pièce dues à la présence d'une entaille, de congés, de trous, .. Entraînent des modifications de la répartition uniforme des contraintes et conduisent à des pics de contraintes locaux

L'effet de la concentration des contraintes sur la résistance à la fatigue du matériau a été étudié sur éprouvettes entaillées. Cette concentration de contrainte localisée est mesurée à l'aide d'un facteur de concentration de contrainte qui sera défini plus loin dans ce chapitre.

1.3.1 Concentration de contraintes

Considérons une pièce mécanique cylindrique de diamètre constant subissant une flexion : comme le montre la Figure 1.8.

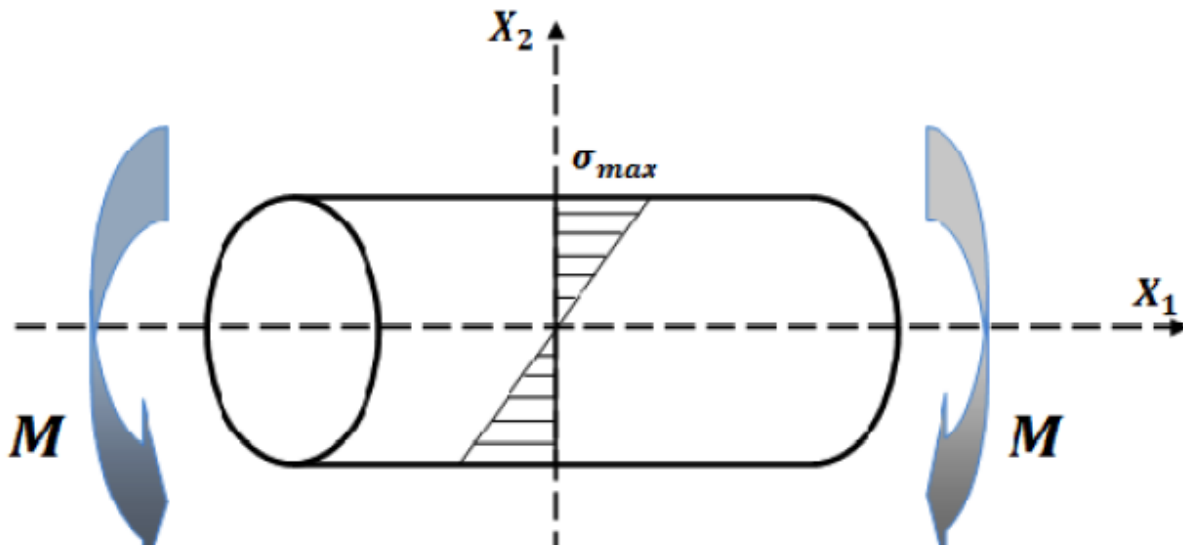


Figure 1. 8: Flexion d'un cylindre de diamètre constant

Si l'on considère la section transversale de la pièce fléchie, l'état de contrainte dans le plan de flexion est linéaire, donné par l'expression :

$$\sigma(X_2) = \left(\frac{M_3}{I_{33}}\right) \cdot X_2 \dots \dots \dots (1.11)$$

Où

M_3 : le moment de la flexion

I_{33} : moment d'inertie de la section par rapport à l'axe

$$I_{33} = \frac{\pi d^4}{64} \dots \dots \dots (1.12)$$

La valeur maximale de contrainte est donnée sur la fibre la plus éloignée de l'axe neutre, pour $X_2 = \frac{d}{2}$

$$\sigma_{max} = \frac{M}{\frac{\pi d^3}{32}} \dots \dots \dots (1.13)$$

Considérez une autre pièce mécanique cylindrique avec un entaille, faites en sorte que le diamètre du bas de l'entaille soit le même que le diamètre de la pièce au-dessus et subissant la même flexion. 1.9.

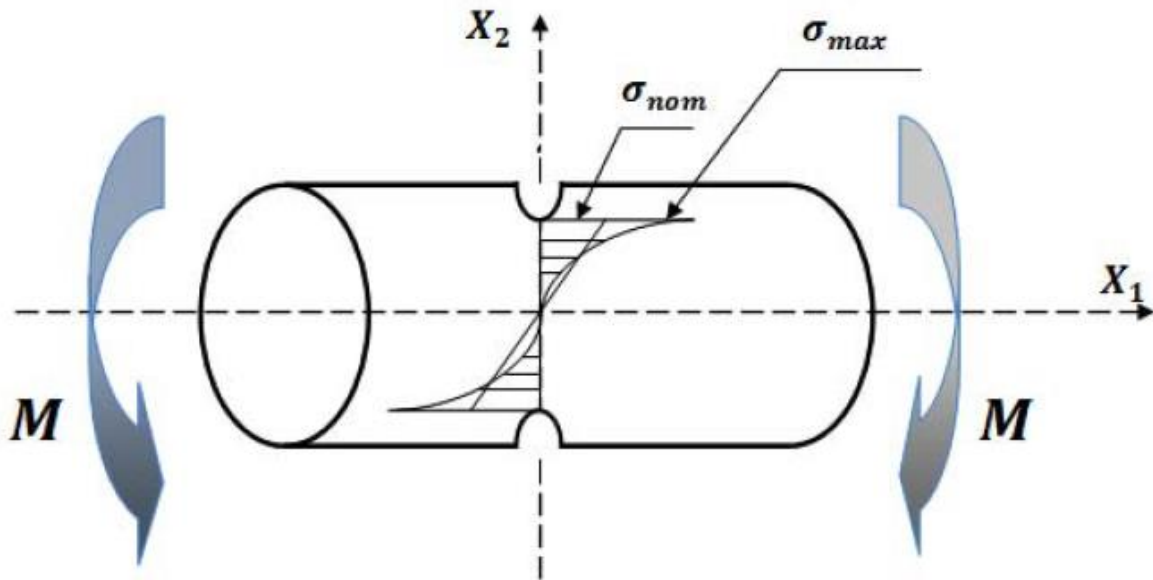


Figure 1. 9: flexion d'un cylindre avec entaille

Dans ce cas, la répartition des contraintes n'est plus linéaire, et on observe une contrainte avec un fond d'entaille qui dépasse le maximum correspondant à l'état linéaire. On parle alors de "concentrations de contraintes" . [9]

1.3.2 Facteur de concentration de contraintes théorique K_t

Pour caractériser la concentration de contraintes par rapport à l'état linéaire, à l'aide du facteur de concentration de contraintes, qui est défini comme le rapport de la contrainte maximale en fond d'entaille sur la contrainte dans la section nette, on note :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \dots \dots \dots (1.14)$$

σ_{max} : contrainte maximale en fond de l'entaille.

σ_{nom} : contrainte maximale normale calculé à partir de la section nette

Ces facteurs théoriques s'appliquent aux matériaux idéaux parfaitement élastiques Ils sont déterminés sur la base des hypothèses de la théorie d'élasticité pour le cas des charges statiques c'est à dire la contrainte σ_{max} qui peut être réelle ou effective. Ces facteurs sont alors de la forme géométrique des pièces et de la sollicitation. L'une des formules donnant les valeurs de ces facteurs et qui a été établie à partir des travaux de NEUBER [8]

$$K_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{A \cdot \frac{2r}{D-d} + B \cdot \frac{2r \left(1 + \frac{2r}{d}\right)^2}{d}}} \dots \dots \dots (1.15)$$

Chapitre 1 : Généralité sur la fatigue et effet d'entaille

Où

D : diamètre extérieur ou largeur extérieur de la pièce.

d: diamètre ou largeur au fond d'entaille.

r : rayon au fond d'entaille.

A, B : facteurs dépendant de la géométrie et de la sollicitation appliquée à la pièce, tels que $A = 0.25$ et $B = 1.80$ pour le cas de flexion de cylindre.

En pratique, pour de nombreux cas simples, le facteur de concentration de contraintes est présenté sous forme de tableau ou de graphique en fonction des paramètres géométriques de la pièce mécanique.

Conclusion :

Ce chapitre est consacré aux études théoriques des différents aspects de la fatigue. Il rassemble des rappels, des définitions et des diagrammes. Le modèle de calcul de La limite d'endurance est utilisé dans le traitement de nos résultats. Nous définissons aussi différentes relations liées à l'influence des entailles. Dans notre étude, les entailles sont bien identifiées

Chapitre 2 : préparation des essais

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différentes étapes faites avant de commencer nos essais sur la machines flexion rotative.

Pour cela on présente d'abord, la nuance de matériau, les machines et les appareils utilisé, la procédure d'usinage des éprouvettes et on termine par une conclusion.

2.1 Matériau d'essai :

2.1.1 propriété :

A60 est un acier mi-dur de haute qualité pour une utilisation à l'état recuit .

2.1.2 Etats d'emploi :

L'acier A60 est généralement utilisé à l'état recuit. Bien entendu, dans le cas de petites pièces, un traitement de revenu est possible.

2.1.3 Emplois types

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

2.1.4 Composition chimique

Tableau 2. 1:composition chimique de l'acier A60

| Elément | C % | Mn % | N % | P % | S% |
|----------------------|------|------|-------|----------|-----------|
| Composition chimique | 0.25 | 0.5 | 0.009 | 0.05 Max | 0.045 Max |

2.1.5 caractéristique mécanique

Tableau 2. 2:Propriété mécanique de l'acier A60

| Propriété Mécanique | Limite élastique | Limite de rupture | Allongement a la rupture | Module de Yong |
|---------------------|------------------|-------------------|--------------------------|----------------|
| Symbole | Re (Mpa) | Rm (Mpa) | A% | E (MPa) |
| A60 | 300-355 | 590-770 | 6-16 | 205000 |

2.2 Eprouvette d'essai :

On a trois types de forme et de dimensionnement des éprouvettes utilisé tel que :

2.2.1 Eprouvette lisse

On a usiné deux éprouvette lisse pour connaître les caractéristiques mécaniques de notre acier utilisé à l'aide de la machine a traction. Ces deux éprouvettes sont de forme cylindrique de longueur 170 mm , avec un diamètre de 12 mm , une partie utile de 64 mm et un diamètre de 8 mm

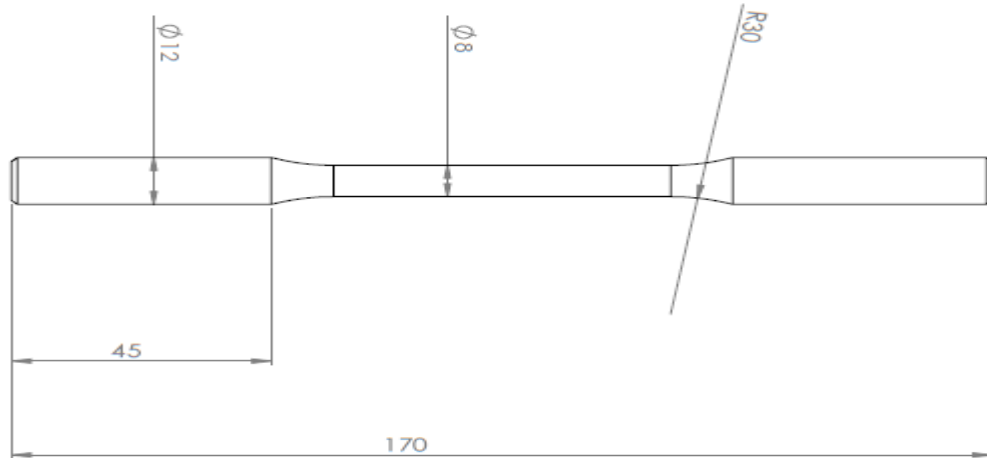


Figure 2. 1:Eprouvette lisse

2.2.2 Eprouvette avec entaille :

On a deux types d'éprouvettes avec entaille:

La première est a la même longueur que l'éprouvette précédente, mais il y a une différence au niveau de la partie utile telle que le diamètre de la partie utile de cette éprouvette est de 10 mm, et elle contient aussi double entaille parallèle, le diamètre au niveau de l'entaille est de 8 mm .

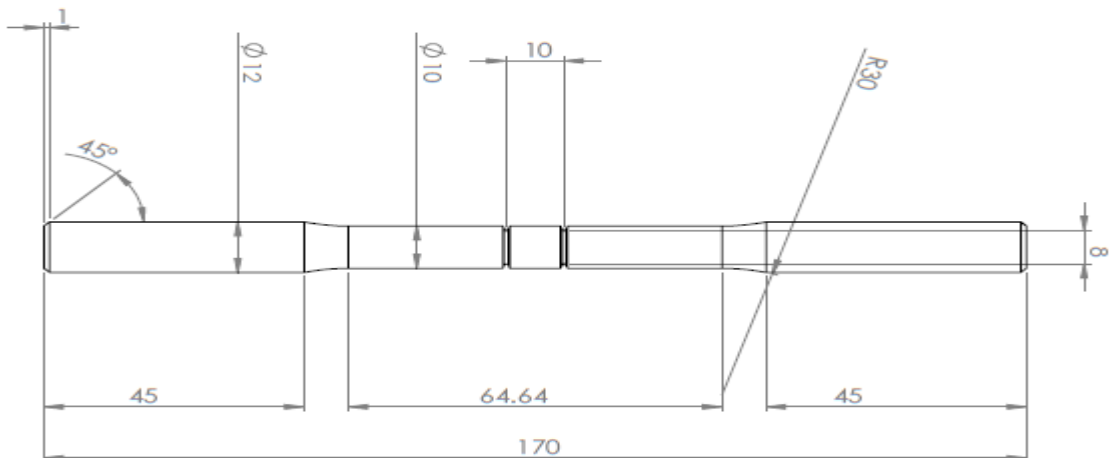


Figure 2. 2:éprouvettes avec entaille pour la caractérisation

Chapitre 2 : Préparation des essais

Et le deuxième type d'éprouvette avec entaille sont des éprouvettes qui vont subir des essais de flexion rotative. Ces éprouvettes sont de longueur de 435 mm, des têtes de diamètre de 12 mm au adaptées pour les pinces des fixations sur la machine. Une partie de longueur 80 mm et de un diamètre de 10 mm comporte deux entailles parallèles de distance variable de 10 mm à 40 mm.

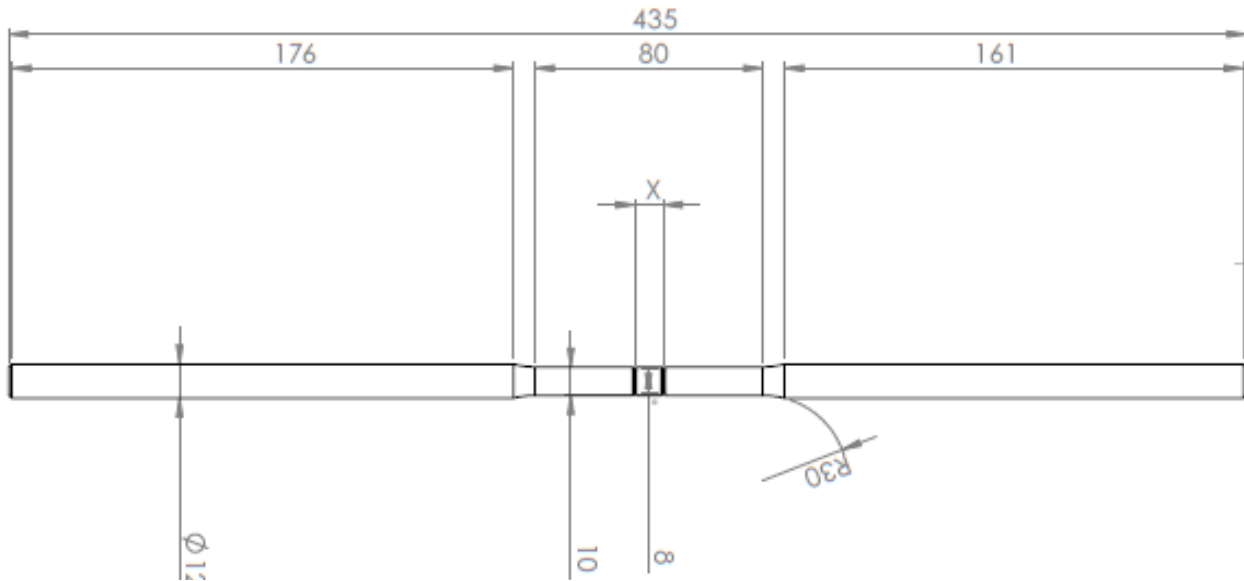


Figure 2. 3:éprouvette avec entaille pour les essais de fatigue

La distance entre deux entailles (X) est le paramètre qui varie d'une éprouvette à l'autre. Les entailles sont à égale distance du milieu de l'éprouvette (Voir la photo 3-1).



Photo 2. 1: La distance X entre les doubles entailles parallèles

Chapitre 2 : Préparation des essais

L'entaille en "V" est réalisée à l'aide d'un outil à pastille rapportée de rayon 0,4 mm et d'angle d'ouverture de 35°. La profondeur d'entaille est fixée à 1 mm. L'entaille prend donc la forme :

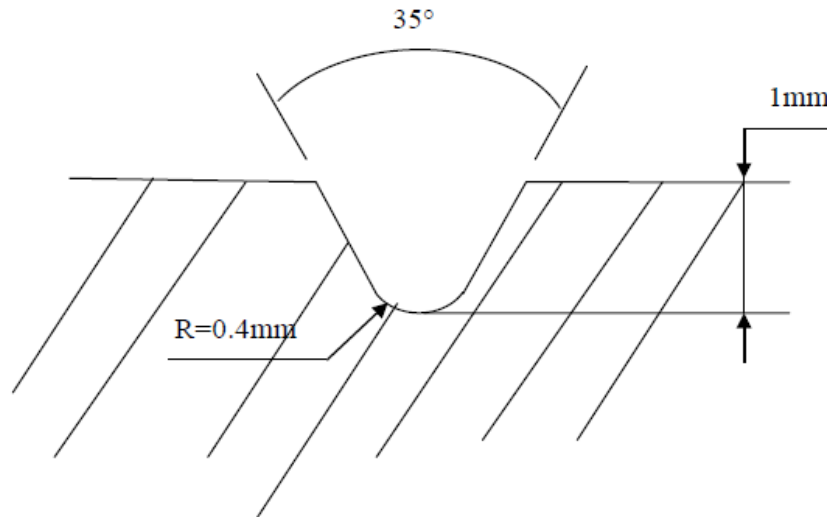


Figure 2. 4:Forme de l'entaille

L'outil utilisé est dans la photo ci-dessous



Photo 2. 2:Outil pour l'usinage des entailles.

2.2.2 Usinages des éprouvette :

Les éprouvettes ont été réalisées par un tours CNC dans l'atelier de l'entreprise SERMO MACHINE. L'usinage se fait à partir d'un tournage de barre étirée de diamètre 12 mm, qui subit deux opérations fondamentales : l'ébauche et la finition.

2.3 Machine et appareils utilisé

2.3.1 Machine de flexion rotative

La première phase d'essais, qui consistait à appliquer des contraintes de fatigue aux éprouvettes, a été réalisée sur une machine de flexion rotative de type « SCHENCK » au niveau du laboratoire de notre Département.



Photo 2. 3: Machine de flexion rotative « SCHENCK »

2.3.1.1 description de la machine

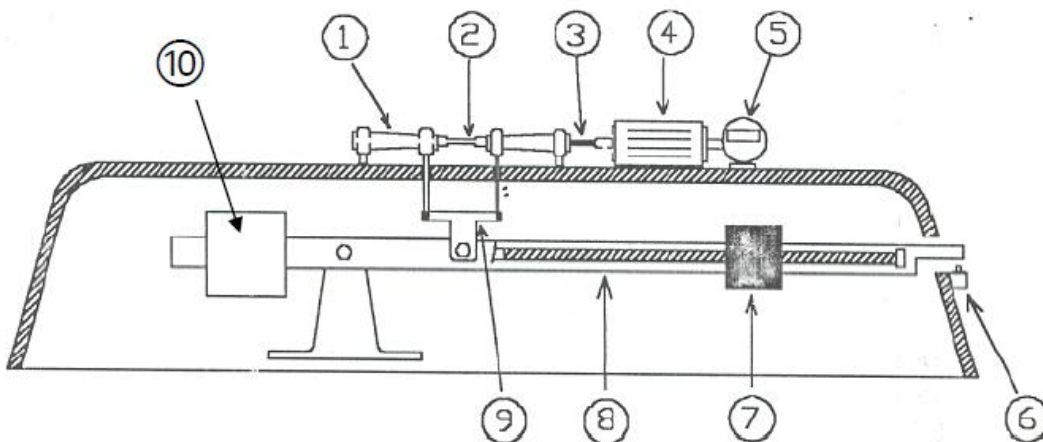


Figure 2. 5:Schéma de la machine de flexion rotative [6]

La machine est constituée de deux parties principales :

Chapitre 2 : Préparation des essais

La partie tournante :

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

La partie de chargement :

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

2.3.1.2 Mode de sollicitation de l'éprouvette

La contrainte sur la machine de flexion rotative est simulée par une flexion en quatre points de la poutre. De cette manière, l'éprouvette est soumise à un moment de fléchissant constant dans toutes sa parties utiles.

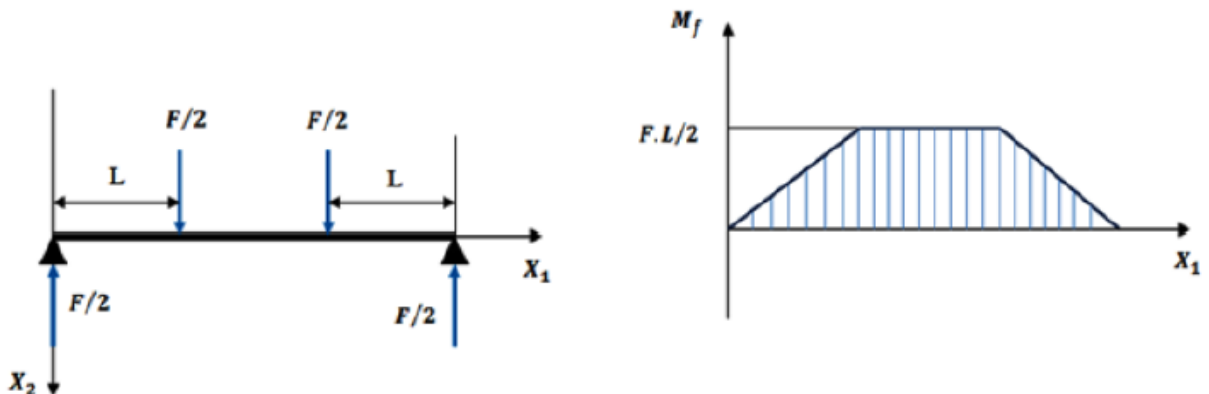


Figure 2. 6: Mode de sollicitation

Chapitre 2 : Préparation des essais

Les contraintes sont obtenues par flexion plane. L'amplitude est constante. La fatigue est créée par la rotation de la pièce. Par conséquent, toutes les fibres, à l'exception des fibres neutres, sont continuellement étirées puis comprimées. Ainsi, la contrainte sur chaque fibre varie dans le temps selon une loi sinusoïdale à valeur moyenne nulle. Chaque révolution correspond à une période ou un cycle de fatigue.

L'amplitude de la contrainte induite par la flexion est la plus élevée pour la fibre externe la plus sollicitée.

2.3.2 Machine de traction utilisée

Les essais les plus poussés sont les essais de traction simples, dans lesquels l'éprouvette (la partie utile de l'éprouvette) est soumise à un champ de contrainte uniaxial uniforme.

Pour quantifier l'endommagement par fatigue par essai de traction, objet de cette étude, nous avons utilisé une machine de traction d'une capacité de 100 kN du laboratoire au niveau de notre département



Photo 2. 4: machine de traction utilisée

2.3.3 les appareils thermiques :

On a utilisé deux appareils thermiques pour mesurer la température au niveau de l'entaille pendant les essais

Le premier appareil est de type AMPROBE IR-730-Eur thermomètre infrarouge 30 :1 , les caractéristique de cet appareille sont :

- mesure thermique de -32°C à 1250 °C
- Mémoire de mesure intégré
- Mémoire de valeur min et mac
- Eclairage de l'affichage
- Rapport de distance au point 30 :1
- Temps de réponse très rapide
- Arrêt automatique
- Emissivité réglable
- Connecteur de trépied intégré
- Mesure de la température moyenne
- Cible laser
- Design pratique et compact a poigné pistolet



Photo 2. 5: : AMPROBE IR-730-Eur thermomètre infrarouge 30 :1

Chapitre 2 : Préparation des essais

Le deuxième appareil utilisé est la caméra thermique infrarouge PCE-TC 30N , Les caméras thermiques sont idéales pour les travaux de maintenance et d'entretien. Cette caméra thermique est adaptée pour travailler dans des environnements difficiles et est idéale pour les électriciens, les serruriers et en particulier le personnel de maintenance qui utilise l'équipement pour trouver et prévenir les pannes dans les installations électriques, les équipements électromécaniques, les machines utilisées dans les processus de fabrication, et le chauffage, la ventilation, et système de climatisation.

On peut utiliser des caméras thermiques haute résolution pour la maintenance préventive et la détection de pannes ou de dysfonctionnements dans les machines et les installations. La caméra thermique est un micro bolomètre non réfrigéré avec une résolution de 160x120 pixels. La caméra thermique a un bon design ergonomique et peut être utilisée d'une seule main. Son tout petit poids de 389 grammes est idéal pour inspecter les machines et les installations. Pendant le fonctionnement et la maintenance, cette caméra thermique est utilisée pour inspecter des roulements, des échangeurs de chaleur, des séparateurs de vapeur ou pour inspecter des installations électriques. La caméra thermique a une précision maximale de ± 2 °C ou ± 2 %, une sensibilité inférieure à 0,1 °C et une plage de température de -20 à +300 °C.

L'écran de l'imageur thermique affiche automatiquement les points les plus chauds et les plus froids de l'image thermique. Les LED intégrées facilitent la localisation de la source de panne dans les endroits sombres. Grâce aux puissantes fonctions intégrées à la caméra infrarouge, vous pourrez détecter rapidement les anomalies de la machine et prendre les mesures nécessaires sur place pour prévenir les pannes. Vous pouvez transférer les images thermiques enregistrées à votre ordinateur au moyen d'un câble de connexion.



Photo 2. 6: : la caméra thermique infrarouge PCE-TC 30N la caméra thermique infrarouge PCE-TC 30N

2.3.4 Le tachymètre

Un tachymètre est un instrument de mesure utilisé pour déterminer la vitesse de rotation d'un objet en mouvement. Les capteurs peuvent être mécaniques ou optiques. Un tachymètre, utilisé pour indiquer la vitesse de rotation d'un objet en mouvement, tel qu'une poulie, un ventilateur ou un arbre de moteur. Couramment utilisé dans l'industrie et les transports, il assure le contrôle et la surveillance des machines tournantes.

Dans notre cas on a utilisé un tachymètre de type AMPROBE TACH-10 pour contrôler la vitesse du moteur de la machine de flexion rotative. On peut l'utiliser pour mesurer la vitesse rotative et la vitesse linéaire selon le besoin. Il affiche ces vitesses dans un écran numérique. Ces mesures sont basées sur adaptateur de contact pour les vitesses linéaires et optique sans contact pour les vitesses angulaires.



Photo 2. 7:le tachymètre

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous présentons la démarche expérimentale suivie pour nos essais. Des difficultés ont été rencontrées pour réaliser ce nombre important d'éprouvettes. La caméra thermique n'a pas été très performantes lors de la mesure des températures en fond d'entailles

Chapitre 3 :

résultat des

essais

Introduction :

Le but de cette étude était d'abord de quantifier les dommages causés par la fatigue en flexion rotative sous entailles par des essais de traction, pour lesquels nous avons utilisé des éprouvettes avec deux entailles parallèles à des distances différentes. Une série d'éprouvettes a été réalisée, toutes (sauf l'éprouvette de référence) ont été soumises au même niveau de charge en flexion rotative à une vitesse de rotation de 2760 tr/min jusqu'à ce que le nombre de cycles spécifié soit de 600000 cycles

3.1 Caractérisation de l'acier :

Tout d'abord on a monté les deux éprouvettes lisses dans la machine à traction pour caractériser l'acier utilisé. Pour cette étape on a utilisé un extensomètre pendant la traction.

L'utilisation de l'extensomètre est utile pour obtenir un module de Young correct.



Photo 3. 1: éprouvette lisse en cour de traction

On a deux éprouvettes lisses qui ont subi le test de traction. On a obtenu les graphes suivants pour la première éprouvette.

Chapitre 3 : Résultat des essais

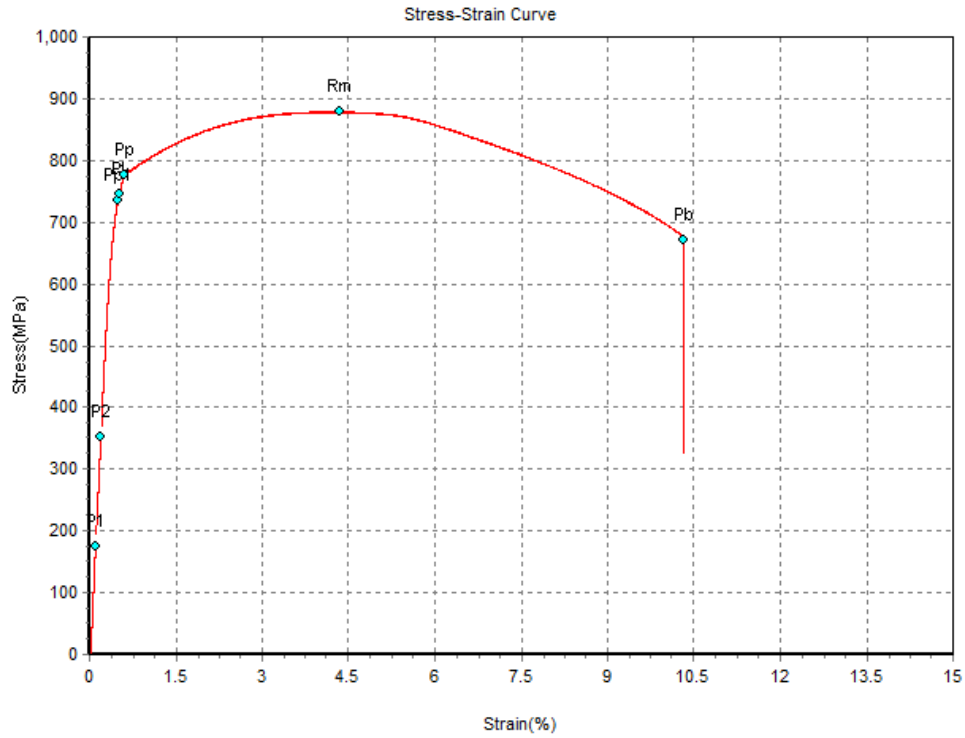


Figure 3. 1: graphe contrainte-déformation pour l'éprouvette lisse N°1

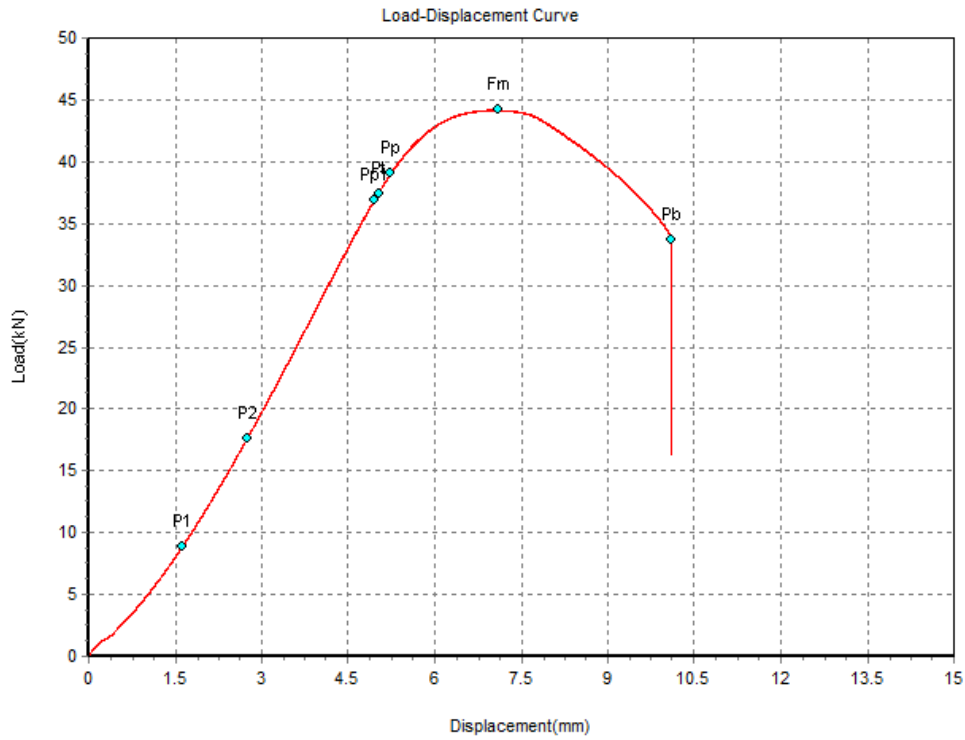


Figure 3. 2: graphe force-déplacement pour l'éprouvette lisse N°1

Chapitre 3 : Résultat des essais

Et on a obtenu pour la deuxième éprouvette les graphes suivants

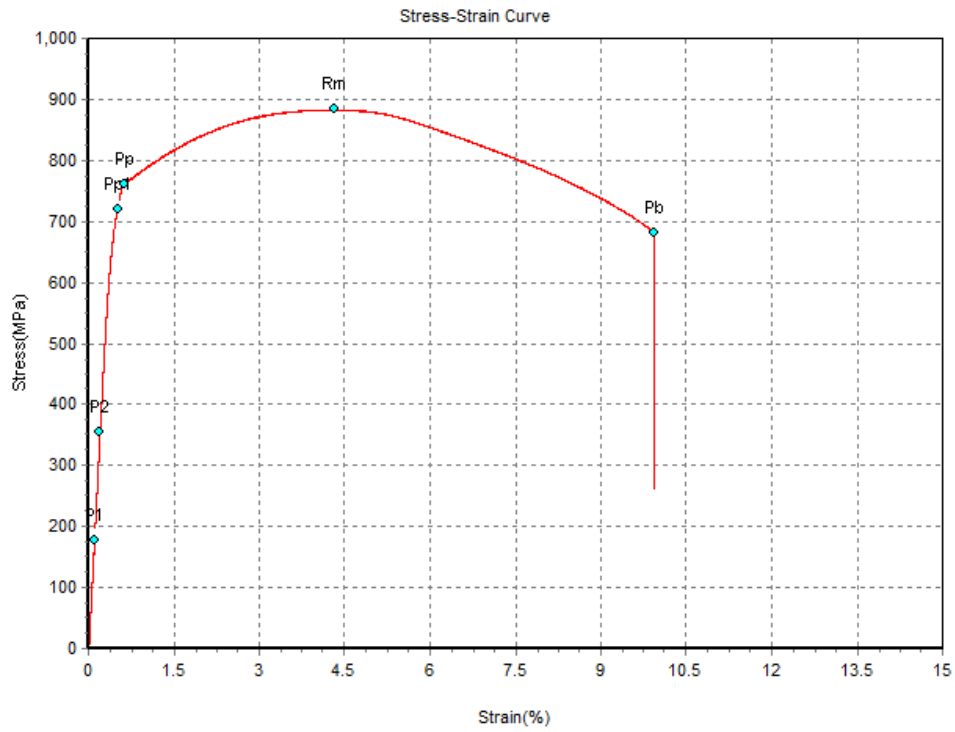


Figure 3. 3: graphe contrainte-déformation pour l'éprouvette lisse N°2

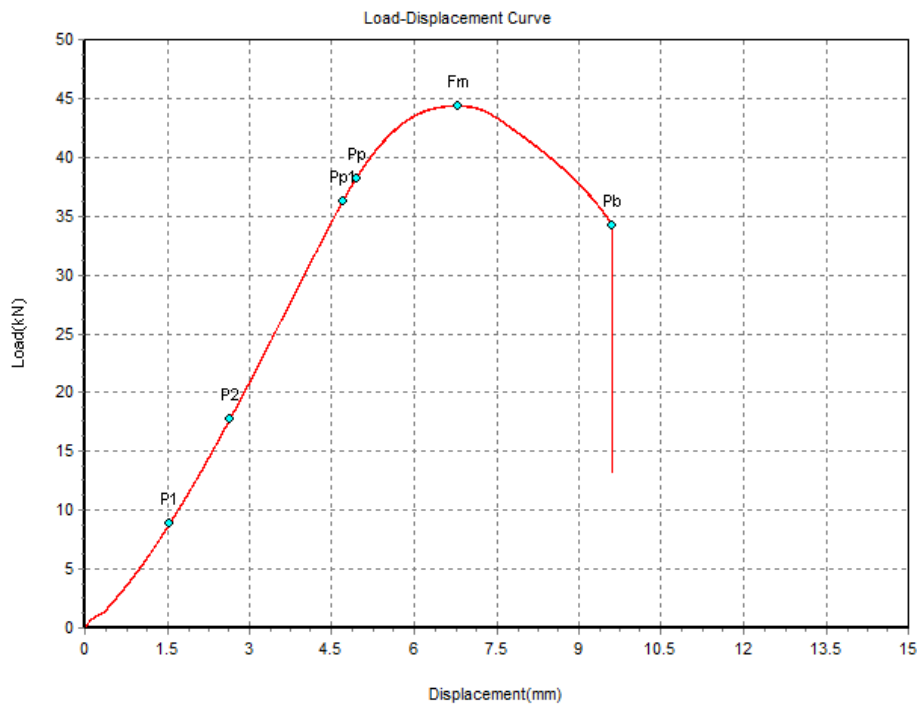


Figure 3. 4: graphe force-déplacement pour l'éprouvette lisse N°2

Chapitre 3 : Résultat des essais

Nous déduisons les caractéristiques suivantes de l'acier utilisé:

Tableau 3. 1 : propriété mécanique de l'acier d'après les essais

| Propriété Mécanique | Limite élastique | Limite de rupture | Allongement a la rupture | Module de Yong |
|---------------------|------------------|-------------------|--------------------------|----------------|
| Symbole | Re (Mpa) | Rm (Mpa) | A% | E (MPa) |
| A60 | 762 | 875 | 17 | 200000 |

On remarque qu'on a une bonne répétabilité des résultats.

Dans les photos suivantes on peut voir l'éprouvette lisse avant et après l'essai de la traction montrant le phénomène de striction. L'allongement a la rupture est estimé a 17%.



Photo 3. 2: éprouvette lisse avant et après l'essai de traction

Des essais de traction de référence ont été réalisés sur des éprouvettes saines entaillées. Dans le cas de ce type d'éprouvettes, on ne trace que les courbes force-déplacement.

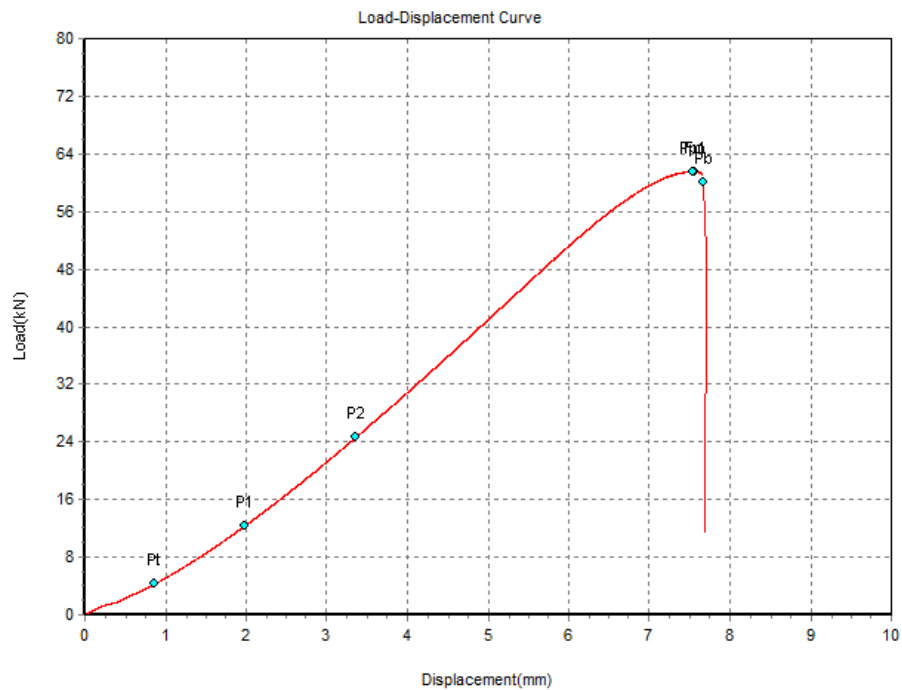


Figure 3. 5: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille N°1

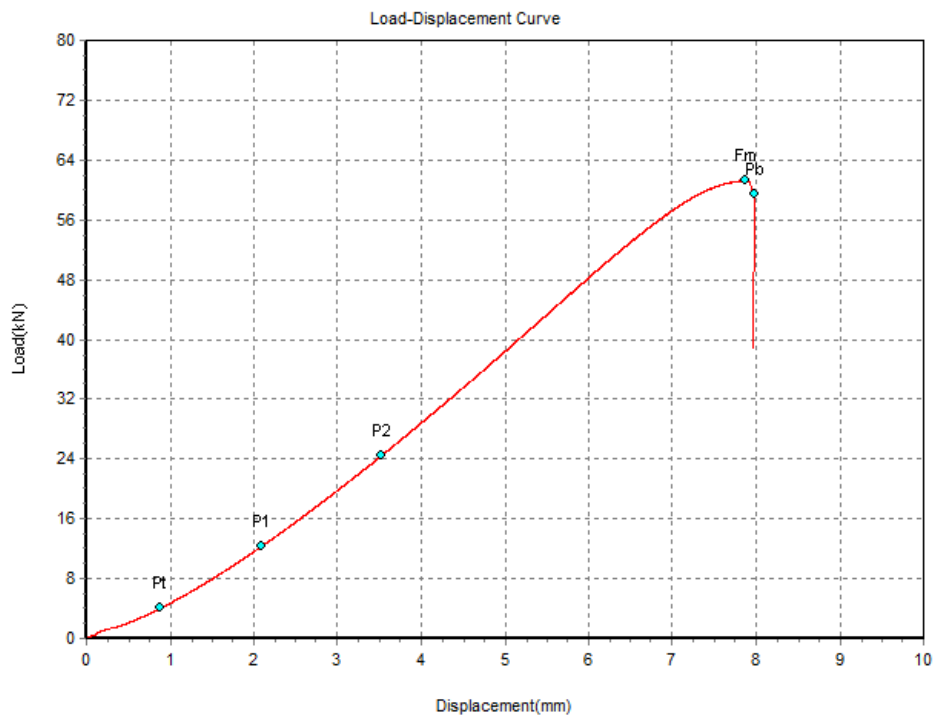


Figure 3. 6: : graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille N°2

Chapitre 3 : Résultat des essais

On remarque que les deux graphes sont identiques. Les photos des éprouvettes montrent que la rupture est au niveau de l'entaille. Dans le cas de présence d'entaille, le phénomène de striction disparaît. La charge de rupture se trouve supérieure dans le cas statique conséquence du phénomène de triaxialité des contraintes.



Photo 3. 3: éprouvette avec double entaille avant et après la traction

3.2 observations sur les ruptures des éprouvettes

D'après les résultats obtenus, la rupture de l'éprouvette s'est avérée être à l'une des entailles, quelle que soit la distance entre les entailles.

On constate que, d'une part, la plupart des zones de rupture finale pour les éprouvette rompue par fatigue se situent au centre de la section de l'éprouvette. Cela indique une charge modérée.

D'autre part, pour les éprouvettes rompue par traction après endommagement par fatigue , on a deux zones la première est une zone sombre d'une petite surface et la deuxième est une zone claire .



Photo 3. 4: : observation sur les ruptures des éprouvettes

photo. 3.4a : rupture par traction après endommagement par fatigue

photo. 3.4b : rupture par fatigue

3.3 résultats des essais

Avant de commencer nos essais on a fait un petit calcul pour estimer la contrainte qu'on doit appliquer sur les éprouvettes pendant les essais de fatigue. Le calcul est le suivant sachant qu'on trouve d'après les graphes donnant l'estimation de la limite d'endurance.

$$R_m = 875 \text{ MPa et } R_e = 762 \text{ MPa}$$

Pour estimer la limite d'endurance, nous utilisons les formules suivantes :

MAILANDER

$$\begin{aligned}\sigma_D &= (0.49 \pm 10\%)R_m \\ \sigma_D &= (0.49 \pm 10\%)875 \\ \sigma_{Dmin} &= 341.25 \text{ et } \sigma_{Dmax} = 516.25 \\ \sigma_{Dmoy1} &= \frac{\sigma_{Dmin} + \sigma_{Dmax}}{2} \\ \sigma_{Dmoy1} &= 428.75 \text{ MPa}\end{aligned}$$

ROGERS

$$\begin{aligned}\sigma_D &= 0.4 R_e + 0.25R_m \\ \sigma_{Dmoy2} &= 0.4 \times 762 + 0.25 \times 875 \\ \sigma_{Dmoy2} &= 523.55 \text{ MPa}\end{aligned}$$

HOUDREMENT ET MAILANDER

$$\begin{aligned}\sigma_D &= 0.25(R_m + R_e) + 5 \\ \sigma_{Dmoy3} &= 0.25(875 + 762) + 5 \\ \sigma_{Dmoy3} &= 414.25 \text{ MPa}\end{aligned}$$

JUNGER

$$\sigma_D = 0.2(R_e + R_m + S\%)$$

Chapitre 3 : Résultat des essais

$$\sigma_{Dmoy4} = 455.517 \text{ MPa}$$

Et pour trouver σ_D on calcule la moyenne des quatre valeurs précédentes, donc :

$$\begin{aligned}\sigma_D &= \frac{\sigma_{Dmoy1} + \sigma_{Dmoy2} + \sigma_{Dmoy3} + \sigma_{Dmoy4}}{4} \\ \sigma_D &= \frac{428.75 + 523.55 + 414.25 + 455.517}{4} \\ \sigma_D &= 455.5 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Donc d'après les calculs ci-dessus, on conclut que la contrainte d'endommagement à appliquer sur les éprouvettes entaillées est 230 MPa pendant un nombre de cycles choisi de 600000. Certaines éprouvettes se sont rompues avant ce nombre de cycles en raison du phénomène aléatoire lié au processus de fatigue. Les résultats sont groupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3. 2: Résultats de l'essai de traction des éprouvettes.

| X (mm) | Numéro de l'éprouvette | Contrainte appliquée | Cycles | Rupture avant ou après la traction |
|---------|------------------------|----------------------|---------|------------------------------------|
| 10 | 1 | 230 MPa | 600 000 | Non rompue par fatigue |
| | 2 | 230 Mpa | 600 000 | Non rompue par fatigue |
| | 3 | 230 Mpa | 336 000 | Rompue par fatigue |
| 15 | 1 | 230 Mpa | 402 000 | Rompue en fatigue |
| | 2 | 230 Mpa | 172 000 | xxxxxxxx |
| | 3 | 230 Mpa | 600 000 | Non rompue en fatigue |
| 20 | 1 | 230 Mpa | 581 000 | Rompue en fatigue |
| | 2 | 230 Mpa | 314 000 | Rompue en fatigue |
| | 3 | 230 Mpa | 600 000 | Non rompue en fatigue |
| 25 | 1 | 230 Mpa | 535 000 | Rompue en fatigue |
| | 2 | 230 Mpa | 600 000 | Non rompue en fatigue |
| | 3 | 230 Mpa | 361 000 | Rompue en fatigue |
| 30 | 1 | 230 Mpa | 600 000 | Non rompue en fatigue |
| | 2 | 230 Mpa | 378 000 | Rompue en fatigue |
| 35 | 1 | 230 Mpa | 600 000 | Non rompue en fatigue |
| | 2 | 230 Mpa | 348 000 | Rompue en fatigue |
| | 3 | 230 Mpa | 365 000 | Rompue en fatigue |
| 40 | 1 | 230 Mpa | 600 000 | Non rompue en fatigue |
| | 2 | 230 Mpa | 600 000 | Non rompue en fatigue |
| | 3 | 230 Mpa | 330 000 | Rompue en fatigue |

Chapitre 3 : Résultat des essais

D'après le tableau précédent, on remarque qu'on a deux groupes d'éprouvettes. Une partie des éprouvettes se sont rompues avant 600 000 cycles et d'autres éprouvettes ont atteint le nombre de cycles choisi.

Groupe 1 : éprouvette non rompue en fatigue ayant subi un essai de traction

On sait que la section pour chaque éprouvette au niveau de l'entaille est :

$$S = 4^2\pi = 50.27 \text{ mm}^2$$

Nous allons estimer le taux d'endommagement par des essais de traction en mesurant le rapport de la surface dans le processus de fatigue et la surface nette totale de l'éprouvette.

Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=10 mm

Eprouvette 1



Photo 3. 5 : observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 10 / N°1

D'après la photo on peut calculer la surface de la partie sombre correspondant au processus d'endommagement en utilisant le logiciel connu par le nom de ImageJ. D'après ce logiciel on a trouvé les deux valeurs des deux surfaces :

$$S_{sombre} = 11.27 \text{ mm}^2 \text{ et } \tau = \frac{S_{sombre}}{S} \% = 22.49 \%$$

On va faire la même chose pour toutes les éprouvettes qui ont été rompues après l'essai de traction.

La courbe charge déplacement est la suivante :

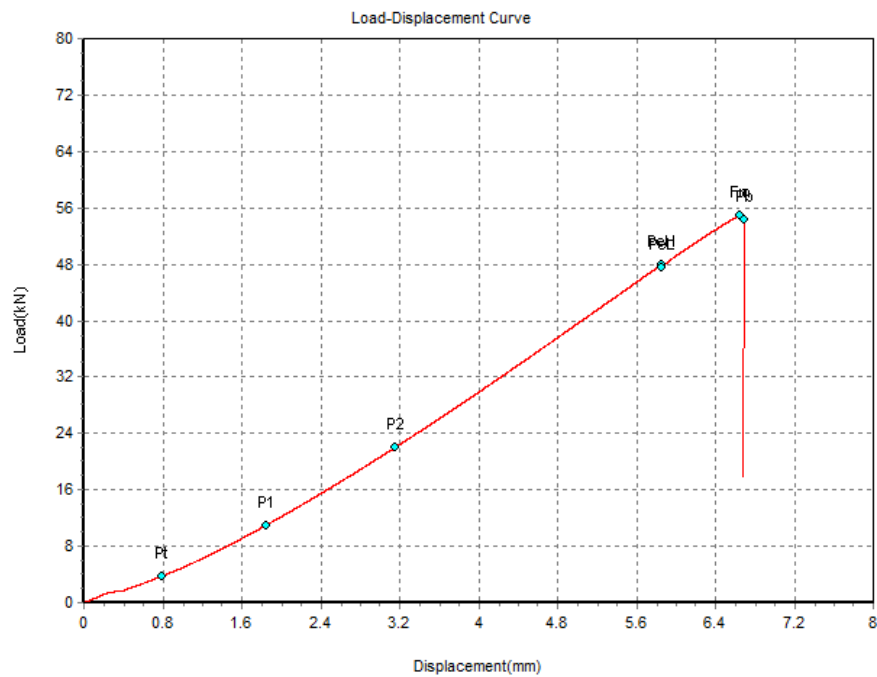


Figure 3. 7: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=10/
N°1

Eprouvette 2



Photo 3. 6: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 10 / N°2

d'après la photo on peut calculer la surface de la partie sombre et de la partie claire

$$S_{sombre} = 9 \text{ mm}^2 \text{ et } \tau = \frac{S_{sombre}}{S} \% = 17.9 \%$$

Et on a obtenu le graphe suivant

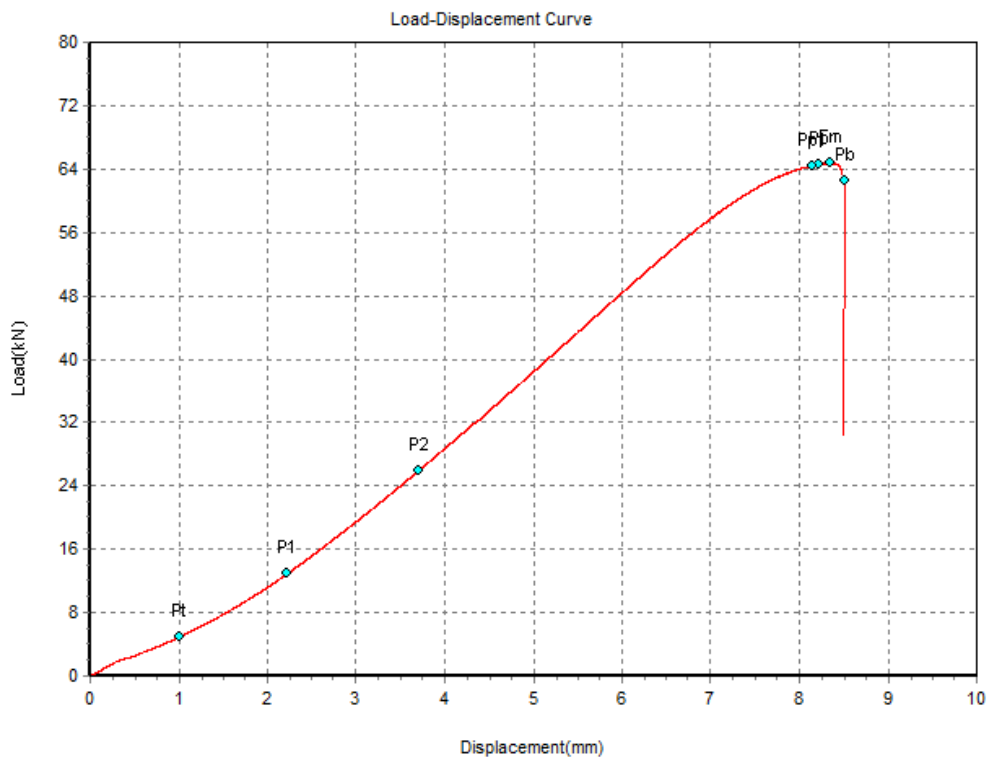


Figure 3. 8: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=10/ N°2

D'après ce graphe on remarque que on a pas la meme valeur de F_m si on compare les deux graphes

Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=15 mm
eprouvette 3

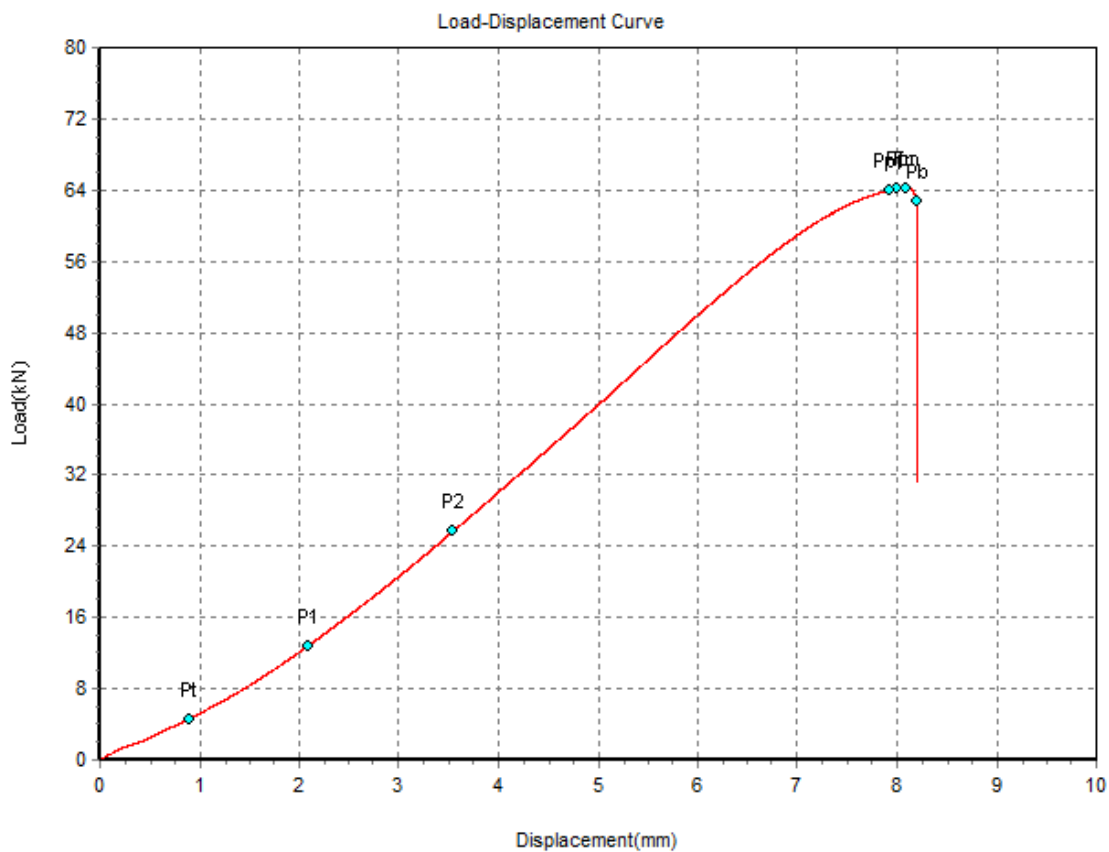


Photo 3. 7: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 15 / N°3

D'après la photo on peut calculer la surface de la partie sombre et de la partie claire

$$S_{sombre} = 14.36 \text{ mm}^2 \text{ et } \tau = \frac{S_{sombre}}{S} \% = 28.56 \%$$

Et on a obtenue le graphe suivant :



**Figure 3. 9: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=15/ N°3
Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=20 mm
Eprouvette 3 :**



Photo 3. 8: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 20 / N°3

D'après la photo on peut calculer la surface de la partie sombre et de la partie claire

$$S_{sombre} = 14.13 \text{ mm}^2 \tau = \frac{S_{sombre}}{S} \% = 28.10 \%$$

Et on a obtenue le graphe suivant :

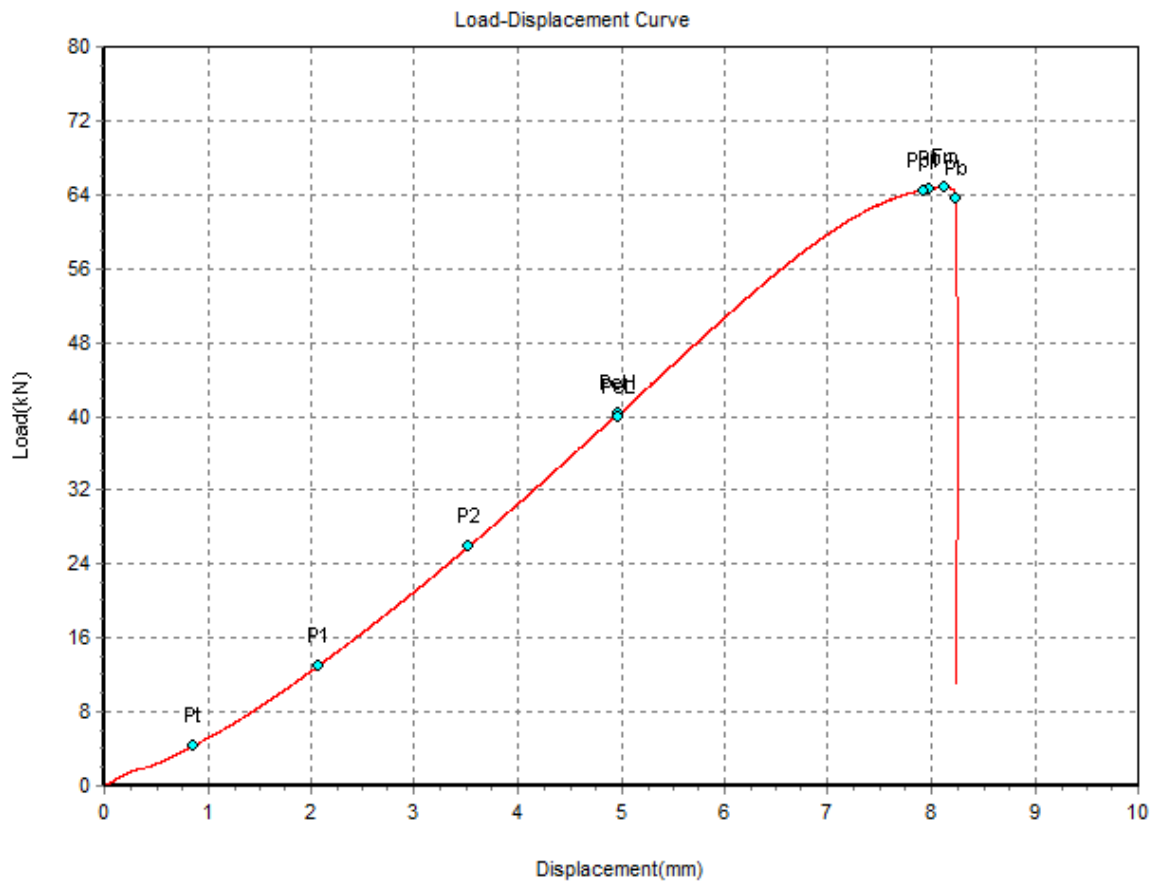


Figure 3. 10: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=20/ N°3
Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=25 mm
Eprouvette 2 :



Photo 3. 9: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 25 / N°2

D'après la photo on peut calculer la surface de la partie sombre et de la partie claire

$$S_{sombre} = 12.9 \text{ mm}^2 \text{ et } \tau = \frac{S_{sombre}}{S} \% = 25.66 \%$$

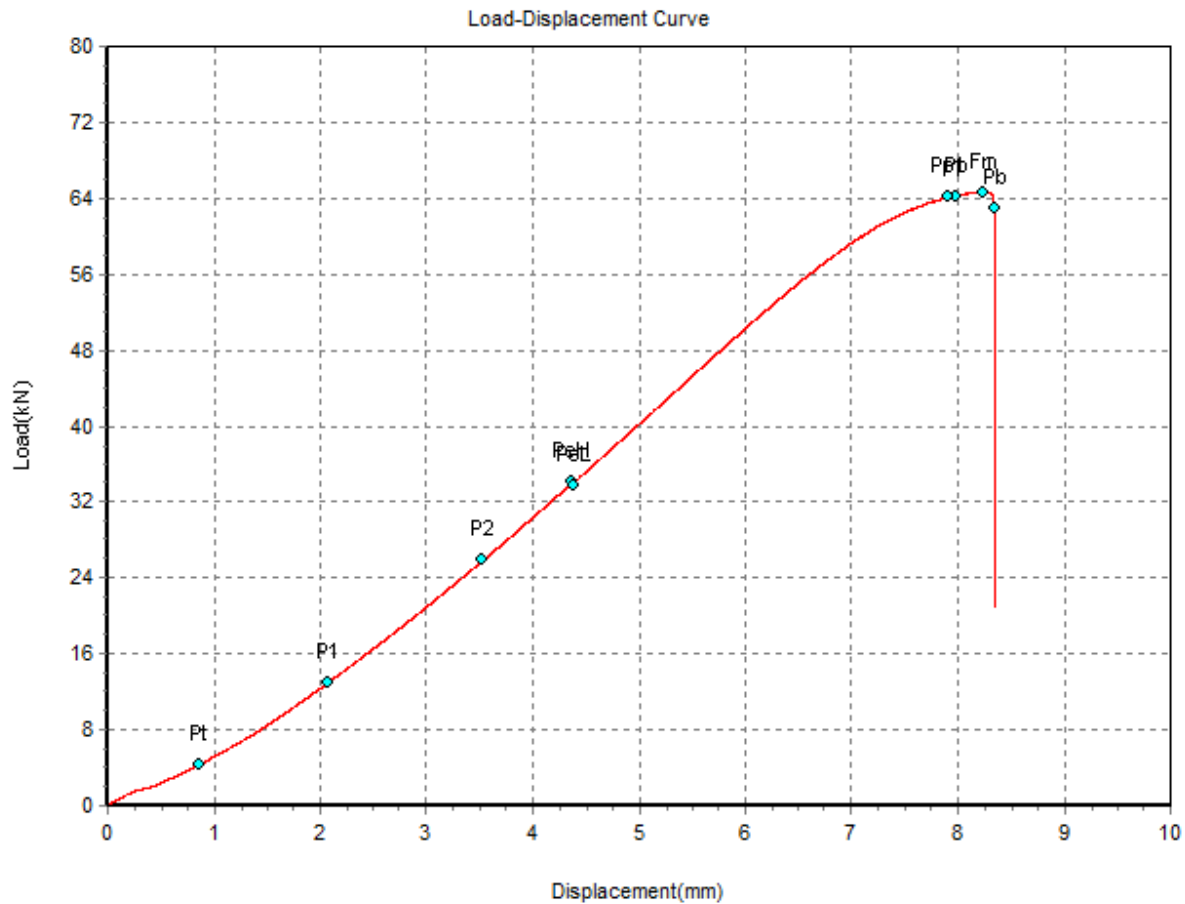


Figure 3. 11: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=25/ N°2

Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=30 mm

Eprouvette 1



Photo 3. 10: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 30 / N°1

d'après la photo on calcule la surface de la partie sombre et de la partie claire

$$S_{sombre} = 9.52 \text{ mm}^2 \text{ et } \frac{S_{sombre}}{S} \% = 18.93 \%$$

Et on a obtenu le graphe suivant

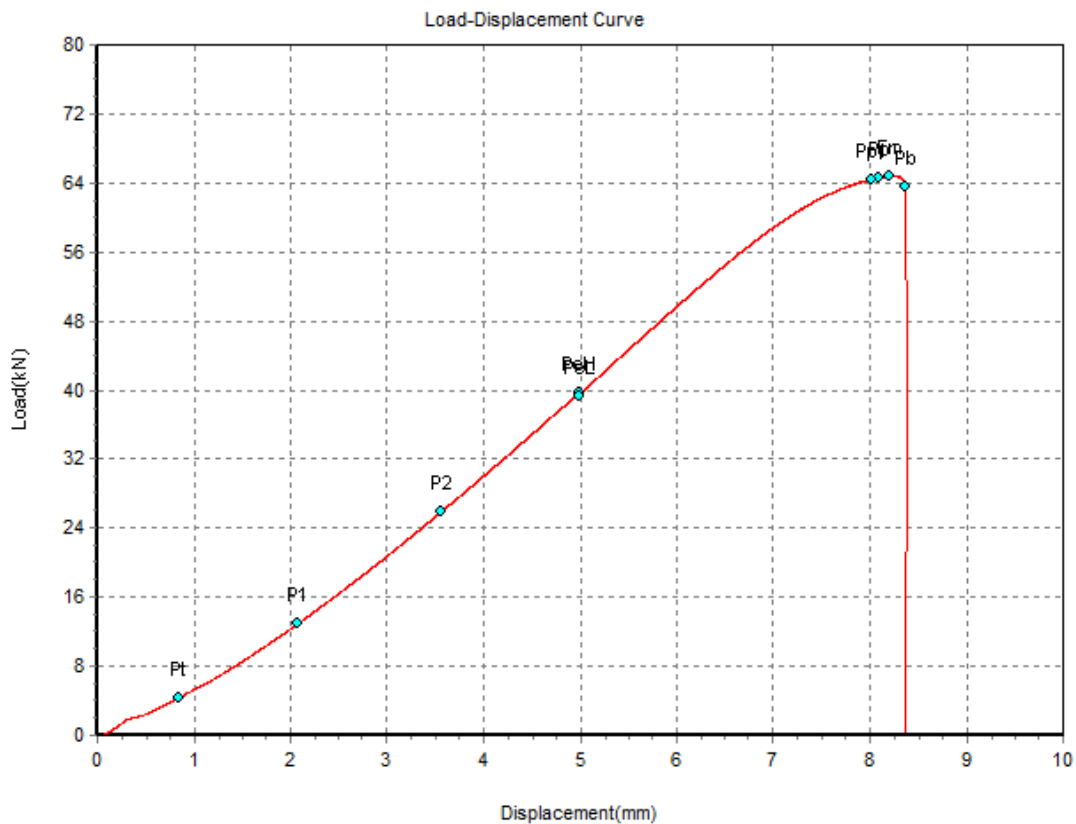


Figure 3. 12: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=30/ N°1

Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=35 mm

Éprouvette 1



Photo 3. 11: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 35 / N°1

D'après la photo on calcule la surface de la partie sombre et de la partie claire

$$S_{sombre} = 8.98 \text{ mm}^2 \text{ et } \frac{S_{sombre}}{S} \% = 17.86 \%$$

Et on a obtenue le graphe suivant

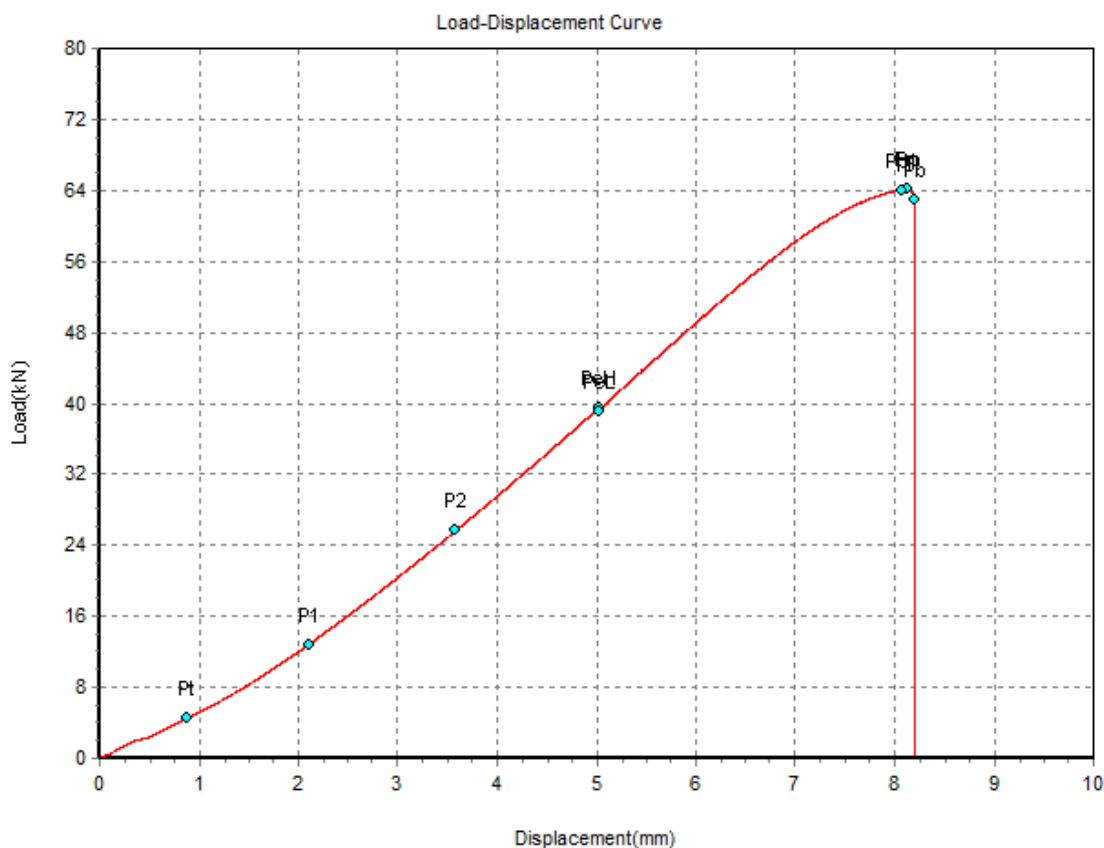


Figure 3. 13: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=35/ N°1

Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=40 mm

Eprouvette 1



Photo 3. 12: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 40 / N°1

D'après la photo on calcule la surface de la partie sombre et de la partie claire

$$S_{sombre} = 12.22 \text{ mm}^2 \cdot \frac{S_{sombre}}{S} \% = 24.31 \%$$

Et on a obtenu le graphe suivant

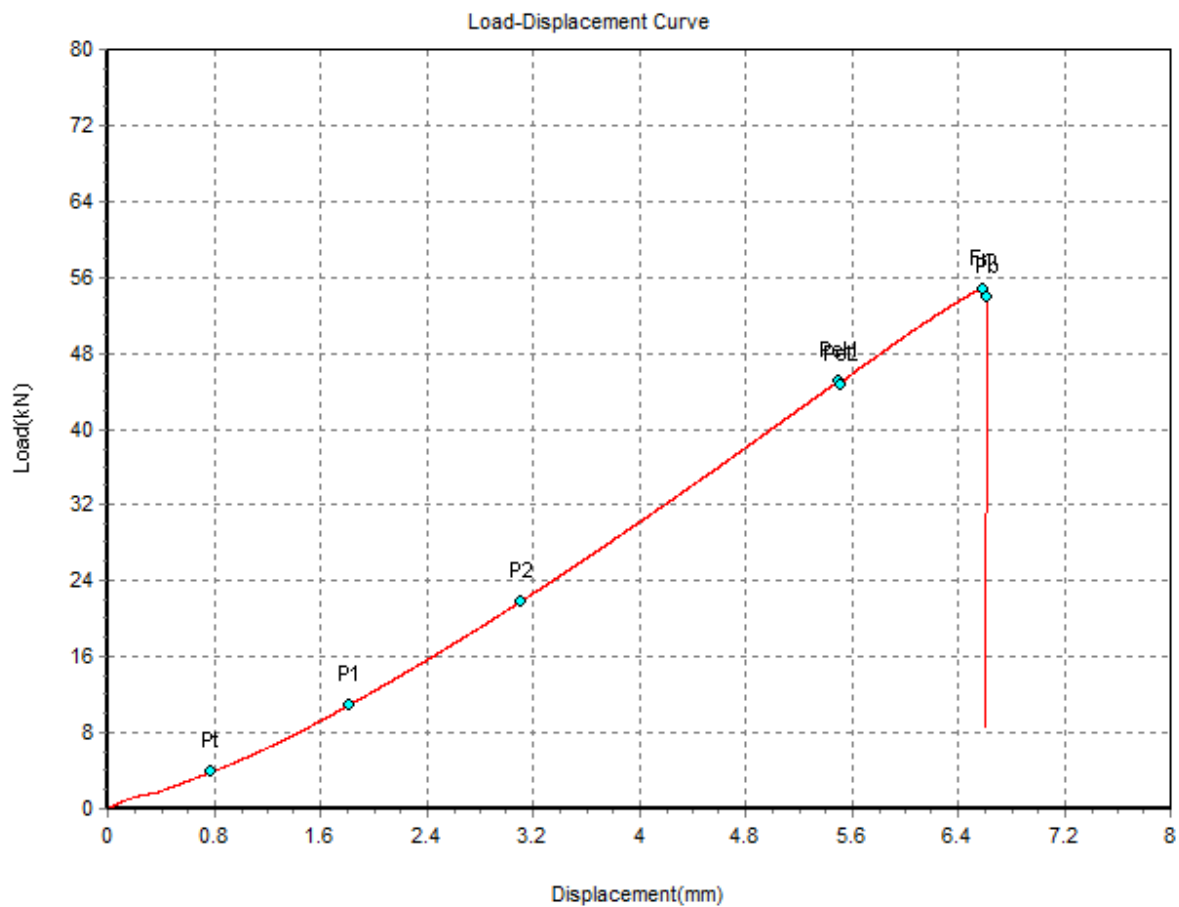


Figure 3. 14: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=40/ N°1
Éprouvette 2



Photo 3. 13: observation de la rupture en traction de l'éprouvette double entaille X= 40 / N°2

d'après la photo on calcule la surface de la partie sombre et de la partie claire

$$S_{sombre} = 12.02 \text{ mm}^2 \text{ et } \frac{S_{sombre}}{S} \% = 23.91 \%$$

Et on a obtenu le graphe suivant

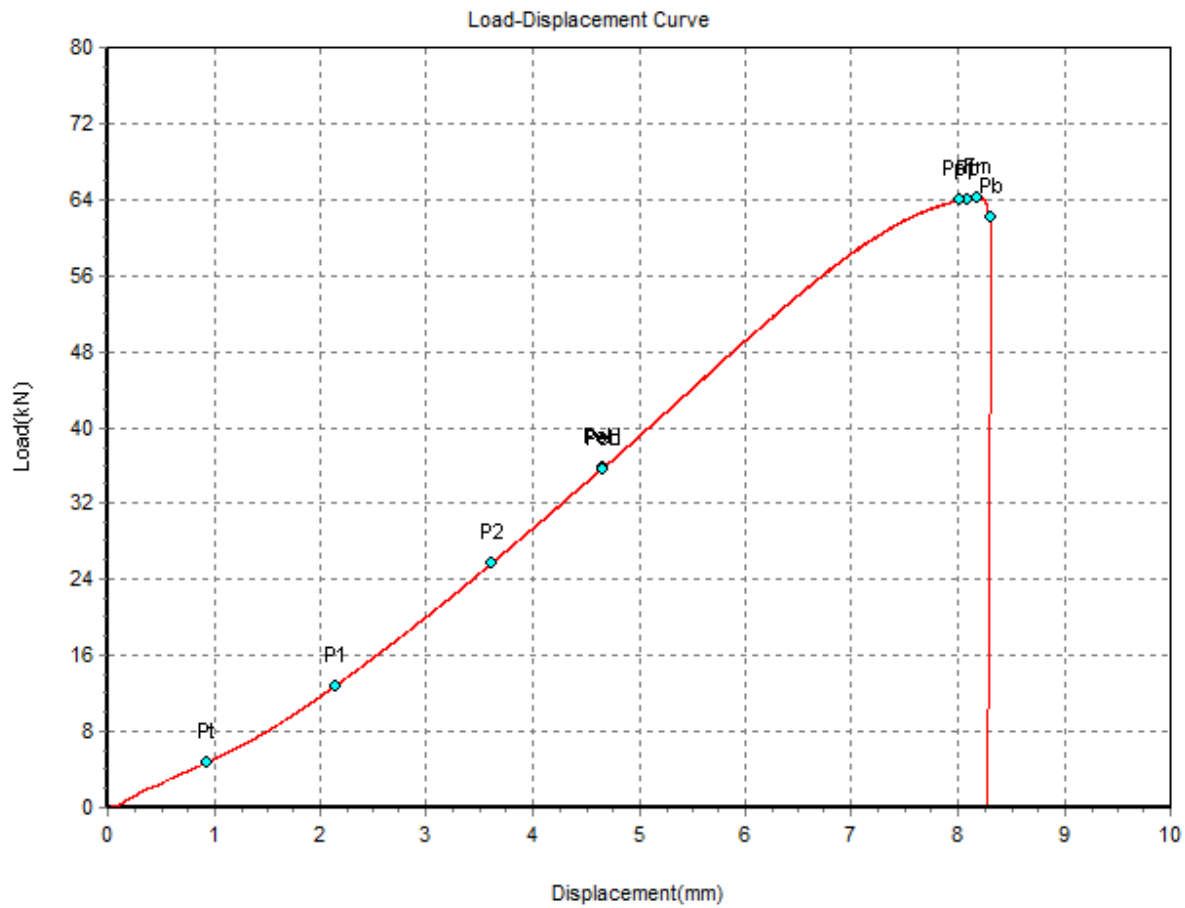


Figure 3. 15: graphe force-déplacement pour l'éprouvette avec double entaille X=40/ N°2

Pour ce groupe d'éprouvette on peut faire la comparaison suivante

Tableau 3. 3: Les valeurs de F_m et de rapport de surface pour chaque éprouvette.

| X (mm) | Numéro de l'éprouvette | F_m (kN) | τ |
|---------|------------------------|------------|---------|
| 10 | 1 | 56 | 22.49 % |
| | 2 | 65 | 17.9 % |
| 15 | 3 | 64 | 28.56% |
| 20 | 3 | 65 | 28.10 % |
| 25 | 2 | 65 | 25.66% |
| 30 | 1 | 65 | 18.93% |
| 35 | 1 | 64 | 17.86% |
| 40 | 1 | 55 | 24.31% |
| | 2 | 64 | 23.91% |

D'après les données de tableau ci-dessus on a tracé le graphe suivant qui nous représente la variation de F_m en fonction de la distance entre les entailles

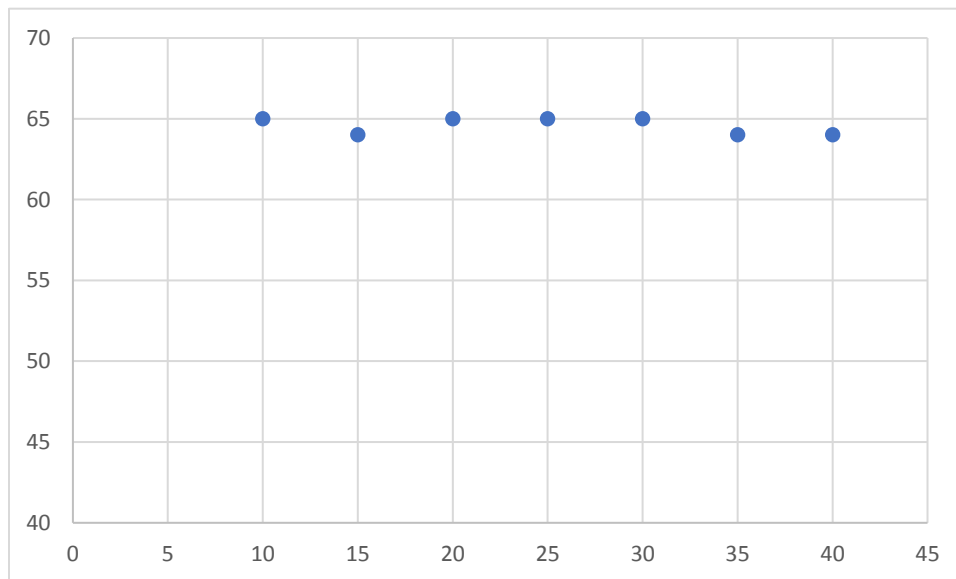


Figure 3. 16: variation de F_m (kN) en fonction de la distance entre les entailles X(mm)

D'après la figure, on remarque qu'il n'y a pas d'influence de la distance entre les entailles sur la charge F_m .

Chapitre 3 : Résultat des essais

Le graphe ci-dessous nous donne la variation de rapport des surfaces en fonction de la distance entre les entailles

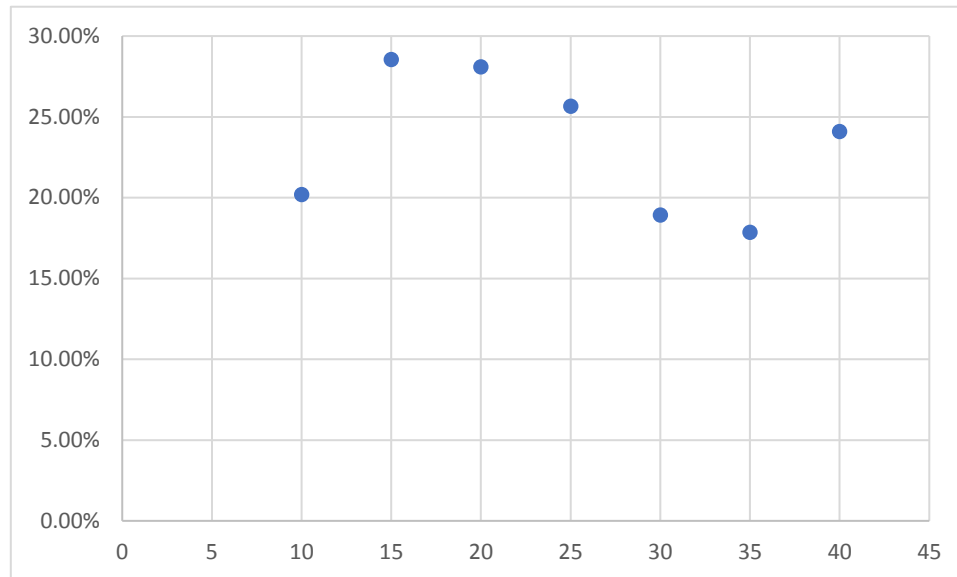


Figure 3. 17: variation de τ (%) en fonction de la distance entre les entailles X (mm)

D'après la figure ci-dessus, la courbe de tendance on remarque le taux d'endommagement semble diminuer en augmentant la distance entre entailles. Ceci n'est pas bien révélé par la mesure de la charge de rupture.

Groupe 2 : éprouvette rompue en fatigue

La durée de vie peut être aussi utilisée pour mesurer l'endommagement en fonction de la distance entre entaille.

Pour les éprouvettes de distance entre entaille $X=10$ mm

Eprouvette 3 :

Cette éprouvette a été rompue après 336 000 cycles sous une contrainte appliquée de 230 MPa.

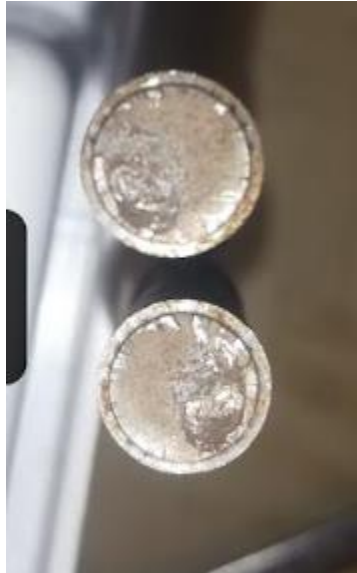


Photo 3. 14: observation de la rupture de l'éprouvette en fatigue double entaille $X=10$ / N°3

Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=15 mm

Eprouvette 1 :

Cette eprouvette a été rompue après 402 000 cycles sous une contrainte appliqué de 230 MPa



**Photo 3. 15: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille
X= 15 / N°1**

Eprouvette 2

Cette eprouvette a été rompue répturé après 172 000 cycles sous une contrainte appliqué de 230 MPa



Photo 3. 16: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 15 / N°2

Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=20 mm

Eprouvette 1 :

Cette eprouvette a été rompue après 581 000 cycles sous une contrainte appliqué de 230 MPa



Photo 3. 17: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 20 / N°1

Epprouvette2 :

Cette eprouvette a été rompue après 314 000cycles sous une contrainte appliqué de 230 MPa

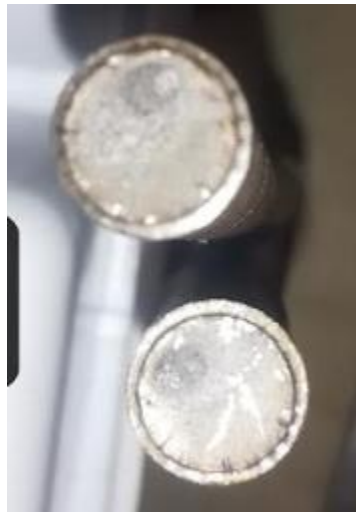


Photo 3. 18: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 20 / N°2

Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=25 mm

Eprouvette 1 :

Cette eprouvette a été rompue après 535 000 cycles sous une contrainte appliqué de 230 MPa



Photo 3. 19: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 25 / N°1

Eprouvette 3

Cette eprouvette a été rompue après 361 000 cycles sous une contrainte appliqué de 230 MPa



Photo 3. 20: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 25 / N°3

Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=30 mm

Eprouvette 2

Cette eprouvette a été rompue après 378 000 cycles sous une contrainte appliqué de 230 MPa



Photo 3. 21: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 30 / N°3

Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=35 mm

Eprouvette 2

Cette eprouvette a été rompue après 348 000 cycles sous une contrainte appliqué de 230 MPa



Photo 3. 22: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 35 / N°2

Eprouvette 3

Cette éprouvette a été rompue après 365 000 cycles sous une contrainte appliquée de 230 MPa



Photo 3. 23: observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 35 / N°3

Pour les éprouvettes de distance entre entaille X=40 mm

Eprouvette 3

Cette éprouvette a été rompue après 330 000 cycles sous une contrainte appliquée de 230 MPa



Photo 3. 24 : observation de la rupture en fatigue de l'éprouvette double entaille X= 40 / N°3

Pour ce groupe d'éprouvette on a le graphe suivant qui nous représente la variation du nombre de cycle jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les entailles

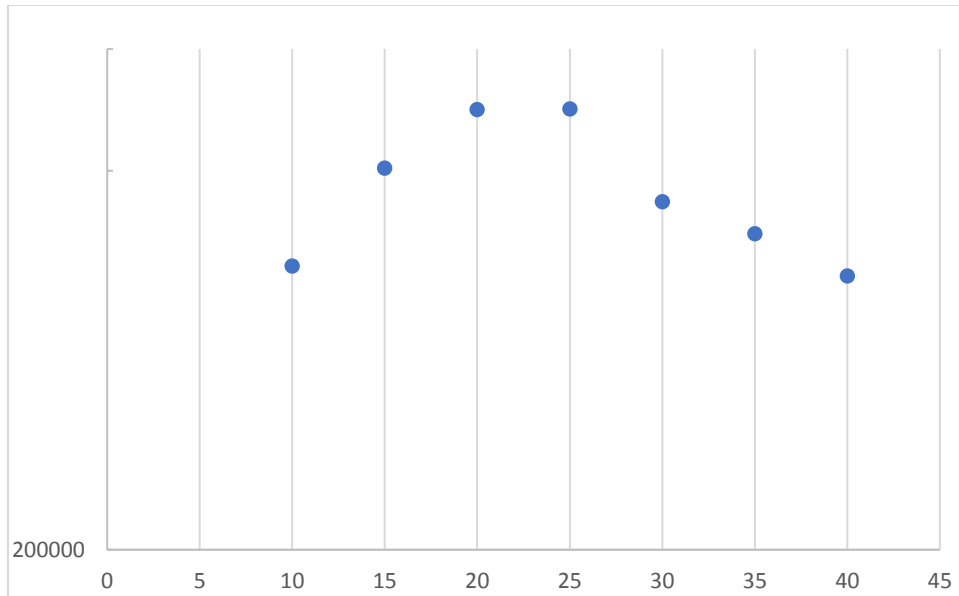


Figure 3. 18: Variation du nombre de cycles jusqu'à la rupture en fonction de la distance entre les deux entailles X

D'après la figure, on remarque qu'il y a une petite influence de la distance entre les entailles sur le nombre de cycle de rupture. Des essais complémentaires sont nécessaires pour pouvoir conclure que la durée de vie est inversement proportionnelle à la distance entre les entailles.

3.4 évolutions de la température en tête d'entaille

Une tentative de mesure de la température au niveau des entailles a été faite pour révéler l'influence de la distance sur le phénomène de fatigue. Pour étudier l'évolution de la température on a utilisé les deux appareils mentionnés dans le chapitre III. Pour le premier appareil on a utilisé un trépied pour sa fixation de telle manière que le laser de cette appareil soit pointée au niveau de l'une des deux entailles .



Photo 3. 25: fixation de l'appareil thermique

Chapitre 3 : Résultat des essais

Nous n'avons pas pu fixer la caméra thermique. De ce fait, des images au niveau des entailles sont prises chaque 100 000 cycle pour connaître l'évolution de la température pour la comparer avec la mesure du premier. Un exemple de photos prises par photo prise par la caméra thermique est représenté ci-dessous.

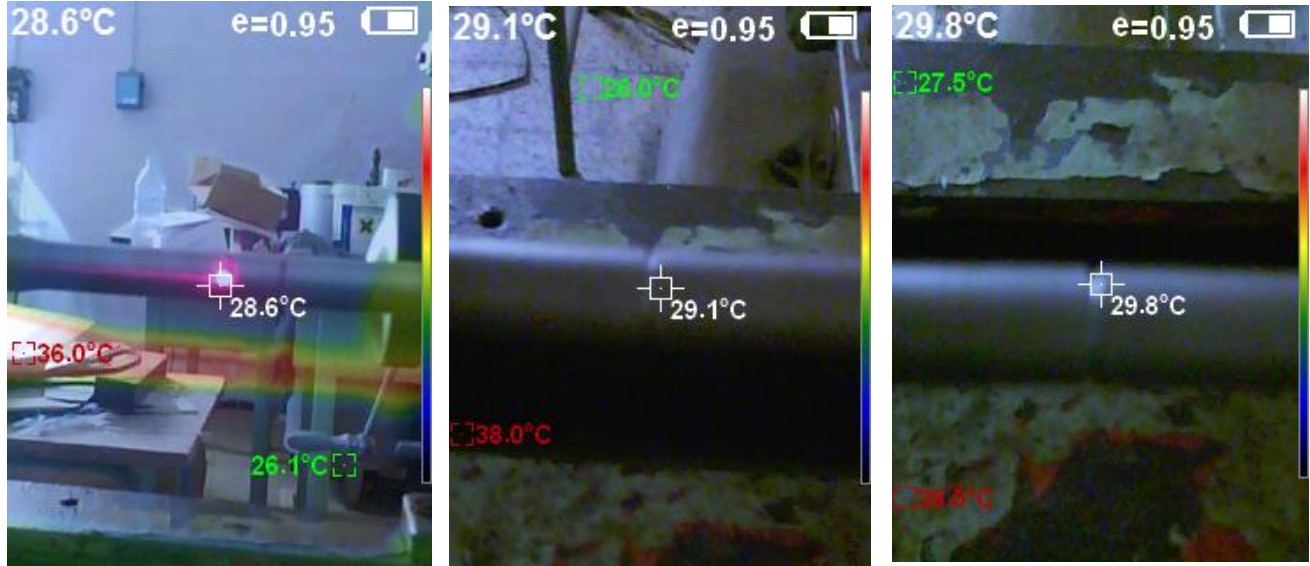


Photo 3. 26: photo prise par caméra thermique

le tableau suivant donne l'évolution de la température pour chaque éprouvette.

Tableau 3. 4: Evolution de la température au niveau de la tête d'entaille

| X (mm) | Numéro de l'éprouvette | T ₀ | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ |
|---------|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 10 | 1 | 27 | 28.6 | 29.2 | 29.3 | 29.4 | 29.5 | 29.5 |
| | 2 | 28.1 | 29 | 29.2 | 29.2 | 29.2 | 29.3 | 29.3 |
| 15 | 3 | 27.2 | 28.8 | 29.2 | 29.5 | 29.7 | 30.4 | 30.7 |
| 20 | 3 | 28.5 | 29.4 | 30.1 | 30.3 | 30.4 | 30.5 | 30.5 |
| 25 | 2 | 28 | 29.1 | 29.6 | 29.8 | 30.2 | 30.3 | 30.4 |
| 30 | 1 | 27.4 | 27.9 | 28.2 | 29 | 29.4 | 29.5 | 29.5 |
| 35 | 1 | 27.3 | 27.8 | 28 | 28.4 | 28.9 | 29 | 29.1 |
| 40 | 1 | 27 | 31.6 | 31.9 | 32 | 32.1 | 33.3 | 33.4 |
| | 2 | 28 | 28.5 | 28.7 | 29.1 | 29.5 | 29.7 | 29.8 |

Chapitre 3 : Résultat des essais

D'après le tableau précédent on remarque que toutes les températures évoluent de manière identique quelque soit la distance entre les éprouvettes.

Les deux appareils nous donnent le même résultat de mesure.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté et expliqué les différents résultats obtenus.

Ces résultats permettent de conclure que la durée vie et le rapport des surface sont inversement proportionnelle à la distance entre les entailles pendant la phase de mesure choisie.

Par contre la charge F_m n'a aucune relation avec la distance entre entaille

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude a porté sur le phénomène de la fatigue en flexion rotative sur des éprouvettes comportant deux entailles. Les essais de fatigue en flexion rotative ont été réalisés sur l'acier A60. L'éprouvette présentait une double entaille en "V" de diamètre 8 mm avec un rayon en fond d'entaille égal à 0,4 mm. Le taux d'endommagement est mesuré par des essais de traction et la mesure de température au niveau des entailles. Ce travail a conduit aux conclusions suivantes :

- La force de rupture par traction après endommagement de 600 000 cycles reste quasi constante en fonction de la distance entre entailles.

- La variation du rapport entre la surface de la zone de fatigue et la surface nette de l'éprouvette quantifiant le taux d'endommagement en fonction de la distance entre entaille reste quasi constante.

- La surface de rupture au niveau de l'entaille reste plane.

- Deux zones sont distinguées sur la surface de rupture, une zone de propagation de fissure et une zone de rupture finale.

- L'évolution de la température est identique quel que soit la distance entre les entailles.

Ces résultats restent quelque peu différents qualitativement avec ceux obtenus par [5] et [9]. Ce travail doit être complété par d'autres essais.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] C. Bathias, J.P,Bailon, « la fatigue des matériaux et des structures » , presse de l'université de Montréal ,1980
- [2] Cazaud , « la fatigue des matériaux » , Edition Dunod , 1969
- [3] A.Brand , « fatigue des alliages ferreux », technique d'ingénieur ,BM5042
- [4] C.W.Richards « la science des matériaux de l'ingénieur » , Edition Dunod,1965
- [5] A. BRAHIMI «Les essais de fatigue par flexion rotative sur éprouvette avec double entailles parallèles », PFE/E.N.P, 2009
- [6] S, DOUMI «quantification de l'endommagement en fatigue sous corrosion sous entaille par essais de traction », magister/U.S.T.H.B, 2006
- [7] A.Brand , « fatigue des alliages ferreux », technique d'ingénieur ,B5050
- [8] A.SAIFI «Conception et réalisation d'un système de fixation d'éprouvette pour la machine de flexion rotative et validation expérimentale», PFE/E.N.P, 2008
- [9] A.BOUMEZIANE , « Influence de la distance entre entaille dans les essais de fatigue en flexion rotative » , PFE/ENP, 2010

