

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études

**En vue de l'obtention du diplôme
d'ingénieur d'état en Génie Mécanique**

THEME

**Influence des traitements thermiques sur l'endurance des
éprouvettes avec double entaille en flexion rotative**

Présenté par :
Mr Haroune DERARDJA

Proposé par :
Mr Y.BELKACEMI
Mr B.GUERGUEB

Promotion: Juillet 2011

Ecole Nationale Polytechnique
10, Avenue Hacén Badi, El-Harrach, Alger.

ملخص

نعرض في هذا العمل نتائج تجريبية تظهر تأثير المعالجات الحرارية على فولاذ من نوع XC48 اجريث تجارب إكلال بألة الاعوجاج الدوراني على عينات مخدوشة حيث أخذنا قيم مختلفة للمسافة بين الخدشين و بحثنا على تأثير المعالجات الحرارية على العلاقة بين المسافة بين الخدشين و صلابة العينات.

كلمات مفتاحية:

إكلال, اللي الدوراني, خدش, شق, المعالجات الحرارية.

Résumé

Dans ce travail, on a étudié le phénomène de fatigue sur des éprouvettes en acier XC48 à double entailles parallèle. La machine d'essai utilisée est à flexion rotative. On a cherché l'influence des traitements thermiques sur la relation entre les distances entre les entailles et les durées de vie des éprouvettes. Cette relation est inversement proportionnelle.

Mots clés : Fatigue, flexion rotative, traitement thermique, entaille, double entaille en parallèle, fissure.

Abstract

In this work, we studied the phenomenon of fatigue of steel specimens XC48 double parallel grooves. The testing machine used is rotating bending. We sought the influence of heat treatments on the relationship between the distances between the cuts and the lifetimes of the specimens. This relationship is inversely proportional.

Keywords: Fatigue, rotating bending, heat treatment, cut, double cut parallel cracks.

Remerciements

Je tiens, avant tout, à remercier DIEU, tout clément, tout puissant, de m'avoir donné la force de réaliser ce travail.

Mes remerciements vont exceptionnellement à Messieurs Y.BELKACEMI et B.GUERGUEB pour leur aide, leur suivi, leurs conseils et directives et pour leur dévouement.

Mes remerciements vont exceptionnellement à Monsieur Halim pour son aide, son suivi, ses conseils et directives lors de la fabrication des éprouvettes.

Nous remercions tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, spécialement ceux des départements des Sciences Fondamentales et de Génie Mécanique, pour leur apport en savoir.

Nos remerciements, vont au personnel de l'Ecole et à toute personne dévouée au service de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Enfin, nos remerciements vont à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à réaliser ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ma mère, ma mère, ma mère..., à mon père et mes frères et sœurs qui m'ont soutenu sans relâche, dans toutes les circonstances, tout au long de mon parcours d'études.

Je dédie, aussi, ce travail à mes grands parents, et à toute ma famille pour leur soutien.

Je dédie ce travail à tous mes ami(e)s pour leur soutien tout au long de mon parcours.

Introduction générale	1
I. Aperçu sur le phénomène de fatigue	2
I.1. Introduction.....	2
I.2. Fatigue et endurance.....	2
I.2.1. Définitions.....	2
I.2.2. Limite de fatigue.....	2
I.2.3. Limite d'endurance.....	3
I.2.4. Durée de vie.....	3
I.2.5. Contraintes appliquées.....	3
I.2.5.1. Contrainte nominale.....	3
I.2.5.2. Cycle de contrainte.....	4
I.2.5.3. Types de cycles de contraintes.....	5
I.3. Classification des sollicitations des essais de fatigue.....	6
I.3.1. Essais sous amplitude constante.....	6
I.3.2. Essais sous amplitude variable.....	6
I.4. Diagrammes représentatifs.....	7
I.4.1. Courbe de Wöhler.....	7
I.4.2. Courbes d'équiprobabilité de rupture.....	8
I.5. Eprouvette d'essai de fatigue.....	9
I.5.1. Forme.....	9
I.5.2. Dimensions.....	10
I.5.3. Usinage des éprouvettes.....	10
II. Facteurs d'influence sur la limite de fatigue	11
II.1. Introduction.....	11
II.2. Facteurs géométriques et états de surface.....	11
II.2.1. Effet d'entaille.....	11
II.2.2. Influence de la taille des éprouvettes - Effet d'échelle.....	13
II.2.3. Influence de la géométrie.....	13
II.2.4. Coefficient de concentration de contraintes théorique.....	14
II.3. Facteurs métallurgiques.....	15
II.3.1. Influence de la composition chimique.....	15
II.3.2. Relation entre les propriétés en fatigue et la microstructure.....	16
II.3.3. Facteurs liés à la mise en forme.....	16
II.3.4. Influence des conditions de surface.....	17
II.3.5. Influence de la température.....	17
II.3.5.1. Fatigue à basse température.....	17
II.3.5.2. Fatigue à haute température.....	17
II.3.6. Influence de la fréquence de sollicitation.....	18
II.3.7. Influence du mode de sollicitation.....	18
II.3.8. Influence de la contrainte moyenne.....	18

III. Préparation des essais	19
III.1. Introduction.....	19
III.2. Choix de l'acier.....	19
III.2.1. Domaine d'utilisation de l'acier.....	19
III.2.2. Composition chimique de l'acier.....	19
III.3. Machine d'essai de fatigue.....	19
III.3.1. Description de la machine	20
III.4. Instructions.....	21
III.5. Mode de sollicitation de l'éprouvette.....	21
III.6. Les éprouvettes d'essais.....	22
III.6.1. Forme et dimensions des éprouvettes.....	22
III.6.2. Usinage des éprouvettes.....	24
III.7. Traitement thermique.....	24
III.7.1. Trempe-revenue.....	25
IV. Résultats des essais	26
IV.1. Introduction.....	26
IV.2. Observation sur les ruptures des éprouvettes.....	26
IV.2.1. Sans traitement thermique.....	26
IV.2.2. Avec traitement thermique.....	27
IV.3. Résultats des essais.....	28
IV.3.1. Résultats sans traitement thermique.....	28
IV.3.2. Résultats avec traitement thermique.....	34
IV.3.3. Comparaison des comportements des éprouvettes avec et sans traitement thermique	38
Conclusion générale	39

Fig.I.1. Cycle de contrainte de fatigue.....	4
Fig.I.2. Type de cycles de contraintes.....	5
Fig.I.3. Exemple de courbe de Wöhler.....	7
Fig.I.4. Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques).....	9
Fig.I.5. Eprouvette de section circulaire.....	9
Fig.I.6. Eprouvette de section rectangulaire.....	9
Fig.II.1. Flexion d'un cylindre de diamètre constant.....	11
Fig.II.2. Flexion d'un cylindre entaillé.....	12
Fig.II.3. Cause mécanique.....	13
Fig.II.4. Cause géométrique.....	14
Fig.III.1. Le schéma de la machine d'essai.....	20
Fig.III.2. Mode de sollicitation.....	21
Fig.III.3. Eprouvette avec double entailles parallèles.....	22
Fig.III.4. Forme de l'entaille.....	24
Fig.IV.1. Variation de la durée de vie (N) en fonction de la distance entre les entailles (X)	29
Fig.IV.2. Taux d'évolution de la flèche en fonction du Nombre de cycles pour l'éprouvette X=5mm.....	30
Fig.IV.3. Taux d'évolution de la flèche en fonction du Nombre de cycles pour l'éprouvette X=10 mm.....	31
Fig.IV.4. Taux d'évolution de la flèche en fonction du Nombre de cycles pour l'éprouvette X=15 mm.....	32
Fig.IV.5. Taux d'évolution de la flèche en fonction du Nombre de cycles pour l'éprouvette X=20 mm.....	33
Fig.IV.6. Taux d'évolution de la flèche en fonction du Nombre de cycles pour les éprouvette X=5 mm et X= 15 mm.....	34
Fig.IV.7. Variation de la durée de vie (N) en fonction de la distance entre les entailles (X) pour les éprouvettes traitées thermiquement.....	37
Fig.IV.8. Comparaison entre la variation de la durée de vie (N) en fonction de la distance entre les entailles (X) pour les éprouvettes sans et avec traitement thermique.....	38

Photo.III.1. Machine de flexion rotative « SCHENCK »	20
Photo.III.2. Variation de la distance X entre les entailles.....	23
Photo.III.3. Les éprouvettes usinées.....	23
Photo.III.4. Outils à pastille.....	24
Photo.IV.1. Faciès de rupture de l'éprouvette X = 5 mm.....	26
Photo.IV.2. Faciès de rupture de l'éprouvette X = 10 mm.....	26
Photo.IV.3. Faciès de rupture de l'éprouvette X = 20 mm.....	27
Photo.IV.4. Faciès de rupture de l'éprouvette X = 15 mm.....	27
Photo.IV.5. Faciès de rupture de l'éprouvette X = 10 mm avec traitement thermique... 28	
Photo.IV.6. Faciès de rupture de l'éprouvette X = 10 mm sans traitement thermique... 28	
Photo.IV.7. Faciès de rupture de l'éprouvette X = 20 mm avec traitement thermique... 28	
Photo.IV.8. Faciès de rupture de l'éprouvette X = 20 mm sans traitement thermique... 28	
Photo.IV.9. Vérification de l'excentricité.....	35
Photo.IV.10. Phase de Dressage.....	35
Photo.IV.11. Machine de traction	36

Tab.II.1. Limite de fatigue des aciers.....	18
Tab.III.1. Composition chimique de l'acier XC48.....	19
Tab.III.2. Propriétés mécanique de l'acier XC48.....	19
Tab.IV.1. Nombre de cycles jusqu'à rupture en fonction des distances entre les entailles.....	29
Tab.IV.2. Taux d'évolution de la flèche, par rapport a la flèche initiale, en fonction du Nombre de cycles sur l'éprouvette, X = 5 mm.....	30
Tab.IV.3. Taux d'évolution de la flèche, par rapport a la flèche initiale, en fonction du Nombre de cycles sur l'éprouvette, X = 10 mm.....	31
Tab.IV.4. Taux d'évolution de la flèche, par rapport a la flèche initiale, en fonction du Nombre de cycles sur l'éprouvette, X = 15 mm.....	32
Tab.IV.5. Taux d'évolution de la flèche, par rapport a la flèche initiale, en fonction du Nombre de cycles sur l'éprouvette, X = 20 mm.....	33
Tab.IV.6. Nombre de cycles jusqu'à rupture en fonction des distances entre les entailles avec traitement thermique.....	36

Introduction générale

La fatigue est un processus qui, sous l'action des chargements et déchargements répétés, fragilisaient les objets avec le temps, même si les contraintes induites étaient considérablement inférieures aux contraintes limites. Chaque cycle de fluctuation de contrainte affaiblit l'objet. Après un certain nombre de cycles, l'objet est affaibli au point de se rompre.

La fatigue est la cause principale de la rupture de la plupart des objets, notamment ceux fabriqués en métal. Les exemples de rupture résultant de la fatigue incluent entre autres, les machines tournantes, les boulons, les ailes d'avions, les produits de consommation, les plates-formes de forage, les bateaux, les essieux de véhicules, les ponts et les os.

Les résultats des études statiques servent de base à la définition d'une étude de fatigue. Le nombre de cycles requis pour qu'une rupture par fatigue se produise à un emplacement donné dépend des matériaux et des fluctuations de contrainte.

Ce mémoire est devisé en 4 chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur le comportement en fatigue des métaux. On parlera des définitions utilisées dans l'essai.
- Dans le deuxième chapitre, nous parlerons des facteurs d'influence sur la limite de fatigue. Nous étudierons les concentrations de contraintes du point de vue de la théorie d'élasticité et leur influence au point de vue de fatigue. Nous citerons aussi de l'influence des caractéristiques mécanique et métallurgique sur la limite de fatigue.
- Dans le troisième chapitre, nous exposerons le déroulement de nos essais.
- Les observations, les résultats des essais et leur interprétation sont présentés dans le quatrième chapitre.

CHAPITRE I
APERÇU SUR LE PHENOMENE DE FATIGUE

I.1. Introduction

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

Afin de préciser les différents aspects de la fatigue des métaux, nous commencerons par étudier les résultats des essais effectués généralement sur des éprouvettes de petites dimensions, sollicitées dans des conditions simples, permettant de distinguer les différents domaines où la fatigue peut apparaître ou non. Nous décrirons ensuite les modifications des propriétés physiques et structurales qui accompagnent la répétition des cycles d'efforts et qui conduisent à la fissuration du métal.

I.2. Fatigue et endurance

I.2.1. Définitions

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

Les contraintes seront définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle 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].

En général, la fatigue se produit sans déformation plastique d'ensemble, mais avec une déformation plastique très localisée, d'abord autour des défauts à fond d'entaille ou en surface, ensuite à l'extrémité de la fissure une fois que celle-ci s'est formée. Il en résulte que la mesure de cette déformation est extrêmement difficile.

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

I.2.2. Limite de fatigue

Pour une contrainte moyenne 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].

I.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 [2].

I.2.4. Durée de vie

La durée de vie est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture N. L'exécution de n cycles ($n < N$) entraîne un certain endommagement de la pièce qu'il est important de chiffrer car il détermine sa capacité de vie résiduelle et donc peut indiquer s'il faut ou non remplacer la pièce pour éviter un accident [1].

I.2.5. Contraintes appliquées

En service ou en cours d'essai de laboratoire, les efforts appliqués peuvent être des sollicitations de type simple, 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.

I.2.5.1. Contrainte nominale

La contrainte prise en charge au cours de l'essai de fatigue est une contrainte nominale. Elle est calculée par rapport à la section nette de la pièce ou de l'éprouvette considérée, à l'aide de formules usuelles de la résistance des matériaux et relative au

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

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

I.2.5.2. Cycle de contrainte

C'est la plus petite partie de la fonction contrainte-temps qui se répète périodiquement. La contrainte cyclique peut être considérée comme la superposition d'une contrainte alternée et une contrainte statique qui est la contrainte moyenne (Fig.I.1).

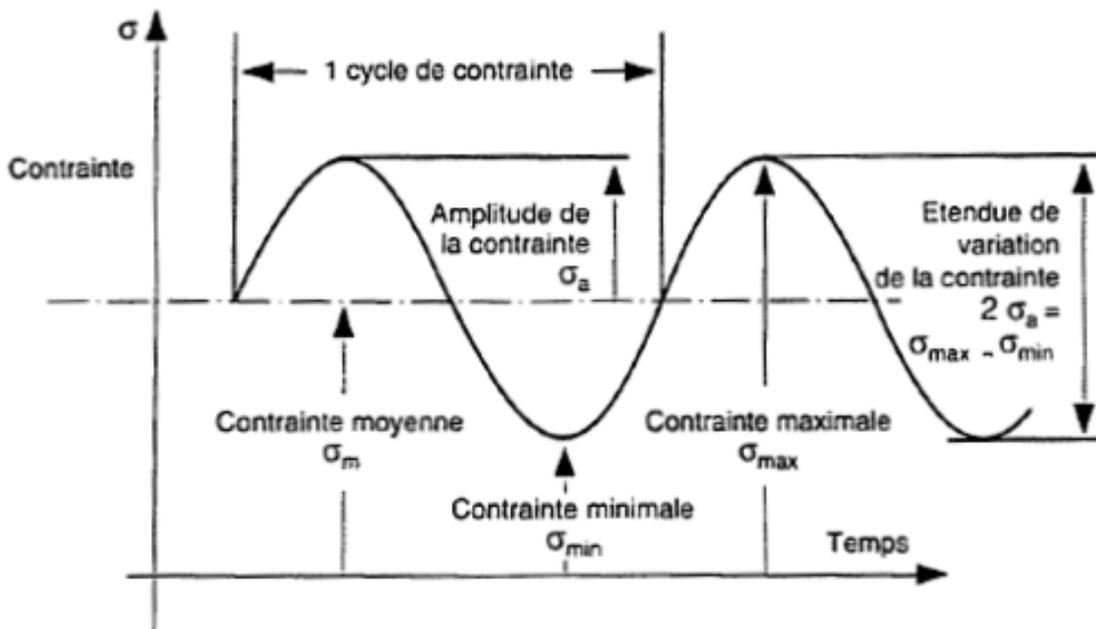


Fig.I.1. Cycle de contrainte de fatigue

Il existe plusieurs termes et symboles pour décrire le cycle de contraintes, 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 algébrique : $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$;

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

I.2.5.3. Types de cycles de contraintes

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

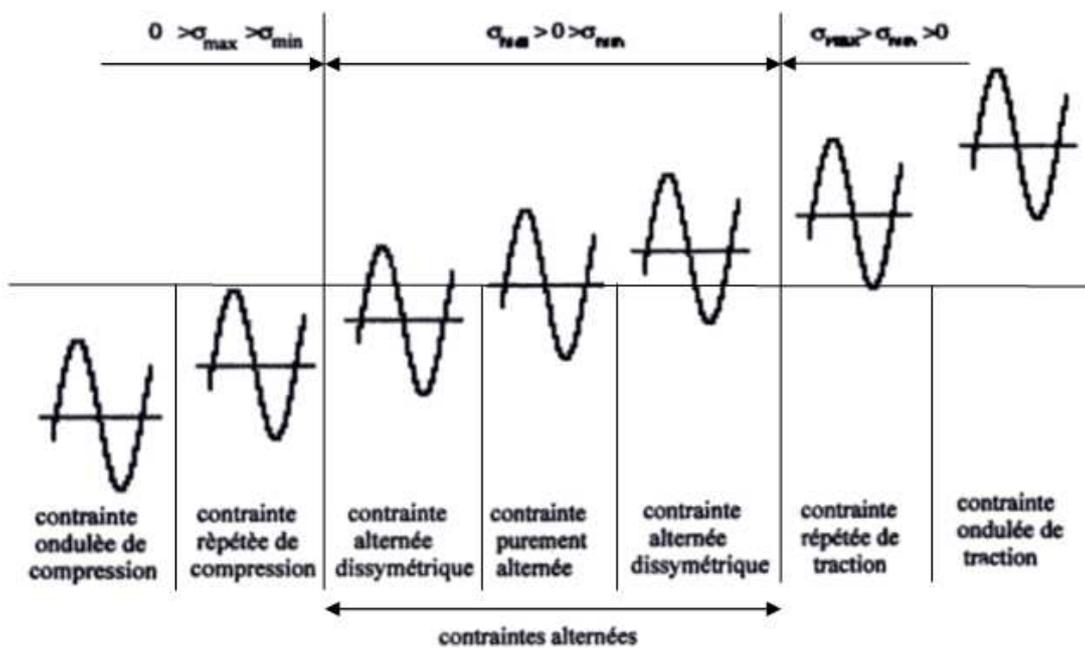


Fig.I.2. Type de cycles de contraintes

I.3. Classification des sollicitations des essais de fatigue

I.3.1. Essais sous amplitude constante

En général, les sollicitations de fatigue résultent d'efforts combinés et on peut distinguer trois cas :

- ✓ Premier cas : Sollicitations aux efforts statiques et aux efforts variables de même nature et de même direction.

On peut considérer, quelle que soit la nature des efforts agissant (traction, flexion, torsion), trois sortes de sollicitations en fonction du temps : alternées, répétées, et ondulées.

Tout effort périodique peut être considéré comme la superposition d'un effort constant ou statique σ_m et d'un effort alternatif d'amplitude σ_a .

- Pour $\sigma_m < \sigma_a$ les efforts sont dit alternés,
Si $\sigma_m = 0$ les efforts sont purement alternés ou symétriques.

Dans ce cas

- Si $\sigma_m = \sigma_a$ les efforts sont dits répétés
- Quand $\sigma_m > \sigma_a$ on parle alors d'efforts ondulés

- ✓ Deuxième cas : sollicitations aux efforts statiques et aux efforts variables de nature différente, par exemple traction statique et torsion variable, alternative ou torsion statique et traction variable, alternative.
- ✓ Troisième cas : sollicitations aux efforts combinés de nature différente, par exemple efforts de traction et de torsion alternatifs en phase.

I.3.2. Essais sous amplitude variable

Actuellement on utilise de plus en plus, en pratique, les résultats d'essais sous programme de charge, de manière à se rapprocher des conditions réelles de service [6]. Si dans le cas des essais à amplitude constante, on suppose alors que la valeur de la charge, au cours du temps, est « déterministe », c'est-à-dire qu'elle est définie par une relation mathématique, la charge en service est le plus souvent dite « *stochastique* », c'est-à-dire qu'elle ne peut pas être définie par une expression mathématique explicite. Dans ce cas, on suppose toutefois que l'évolution de la charge au cours du temps suit un processus aléatoire stationnaire, c'est-à-dire qu'on admet qu'une série de n enregistrement peut être définie par des caractéristiques statistiques appropriées (moyenne arithmétique, quadratique, ... etc.) et que ces caractéristiques ne varient pas dans le temps.

I.4. 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 pour les 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 renseignement [2].

I.4.1. Courbe de Wöhler

Cette courbe est appelée courbe SN (Stress-number of cycles) dans les pays anglo-saxons. Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule qui permette de visualiser la tenue de la pièce 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 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.

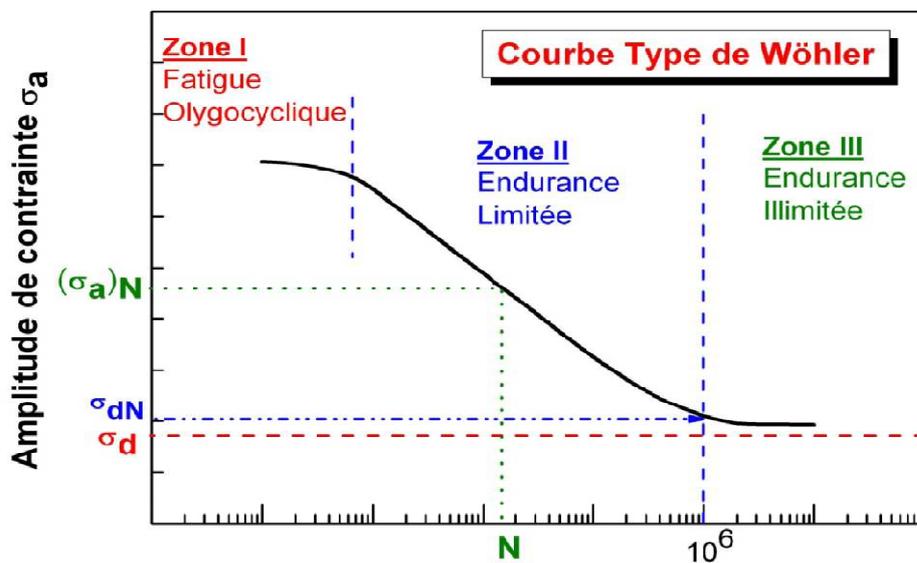


Fig.I.3. Exemple de courbe de Wöhler [2]

Ainsi, à chaque pièce essayée, correspond donc un point du plan (T, N) et à partir d'un certain nombre d'essais à contraintes généralement décroissantes, on peut tracer une courbe qui à l'allure donnée sur la *fig.I.1*.

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 ($N_R \leq 10^5$).
- le domaine d'endurance limitée ($N_R \geq 10^5$ cycles) où les ruptures surviennent systématiquement après un nombre limité de cycles croissant, avec la décroissance de la contrainte.

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

I.4.2. 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 non [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 (*fig.I.4*).

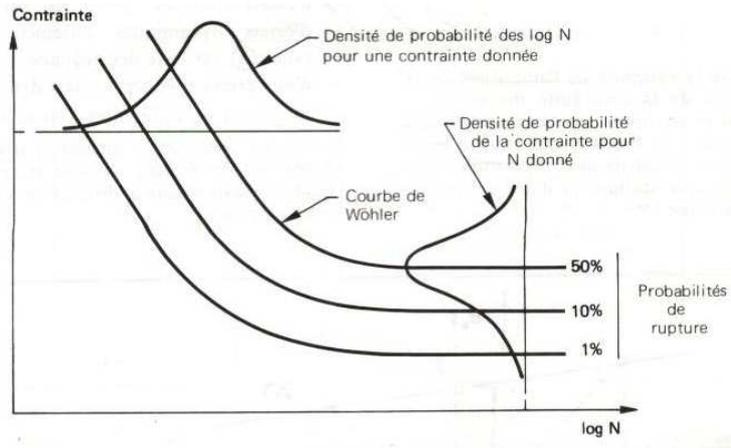


Fig.I.4. Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques) [3]

I.5. Eprouvette d'essai de fatigue

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

I.5.1. Forme

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

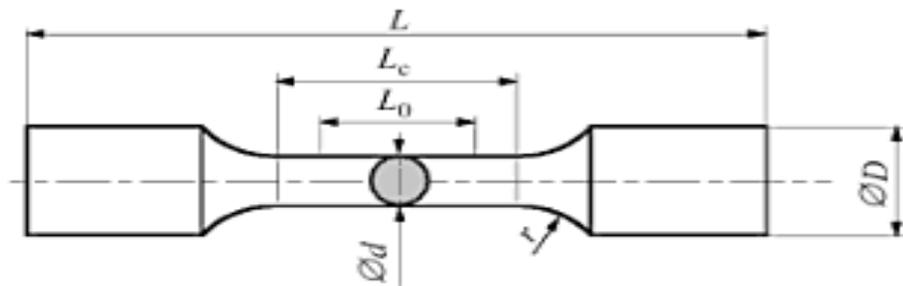


Fig.I.5. Eprouvette de section circulaire

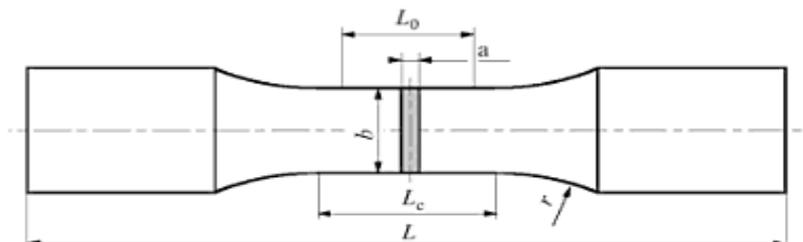


Fig.I.6. Eprouvette de section rectangulaire

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

I.5.2. Dimensions

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

I.5.3. Usinage des éprouvettes

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

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

La finition des éprouvettes par polissage manuel, même longitudinal, doit donc être évitée chaque fois que cela est possible [6]. On utilisera de préférence des éprouvettes cylindriques à profil toroïdal dont la finition sera obtenue par rectification dans le sens longitudinal.

Un contrôle de la rugosité superficielle après usinage est conseillé. Dans le cas de lots à grand nombre d'éprouvettes.

CHAPITRE II
FACTEURS D'INFLUENCE SUR LA FATIGUE

II.1. Introduction

On peut, par analyse de résultats bibliographiques, ou (cas préférable) à partir d'essais dynamiques réels, connaître la limite d'endurance d'un matériau dans des conditions bien précises (forme de l'éprouvette ou de la pièce, condition d'essai...). Mais au stade de fabrication ou 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].

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

II.2. Facteurs géométriques et états de surface

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

II.2.1. Effet d'entaille

Dans les structures, des entailles géométriques dues à des changements brusques de section (épaulements, gorge, cannelure, orifice de lubrification ...) sont souvent inévitables compte tenu de leur rôle fonctionnel. Au voisinage de ces incidents de forme, les répartitions des contraintes sont inhomogènes et conduisent à des concentrations de contraintes.

Les entailles peuvent être de trois types :

- Type mécanique ;
- Type métallurgique ;
- De service (se formant durant l'utilisation) ;

Concentration de contraintes :

Soit une pièce mécanique cylindrique de diamètre constant subissant une flexion : montrée sur la *fig.II.1*.

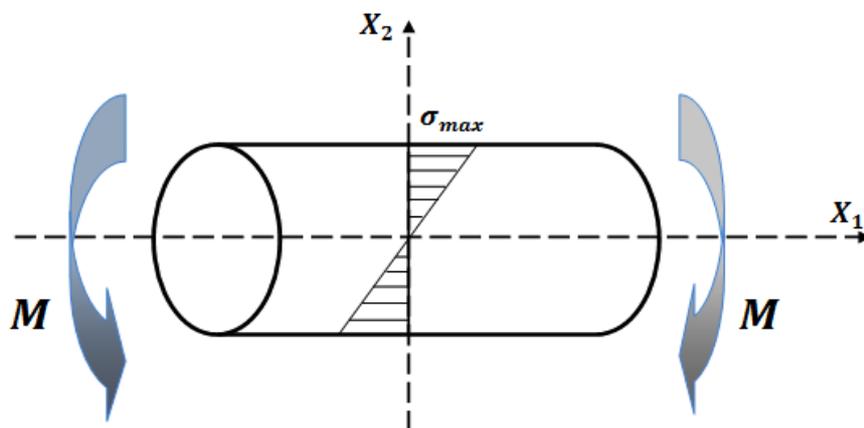


Fig.II.1 : Flexion d'un cylindre de diamètre constant

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

$$\sigma(X_2) = \frac{M_3}{I_{33}} \cdot X_2 \quad (\text{II.1})$$

Où :

M_3 : Moment de flexion

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

$$I_{33} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (\text{II.2})$$

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

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{\left(\frac{\pi \cdot d^3}{32}\right)} \quad (\text{II.3})$$

Soit une autre pièce mécanique cylindrique entaillée tel que le diamètre en fond d'entaille est le même que celui de la pièce ci-dessus et subissant la même flexion (fig.II.2).

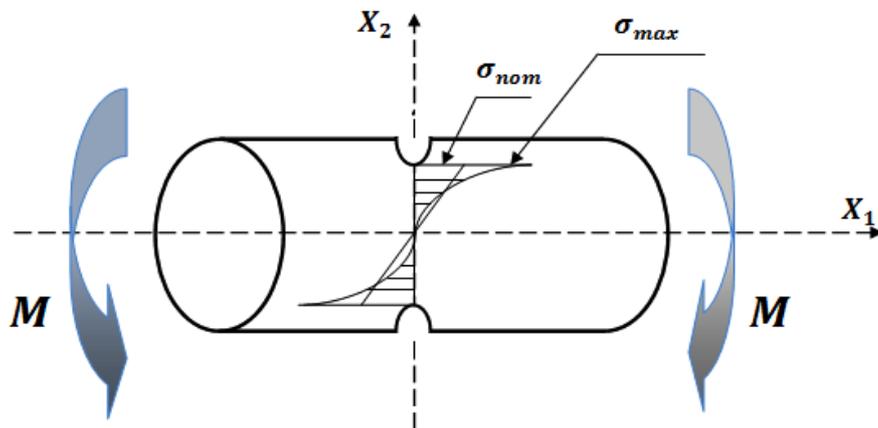


Fig.II.2 : flexion d'un cylindre entaillé

Dans ce cas la répartition des contraintes n'est plus linéaire et on observe une contrainte à fond d'entaille qui dépasse la valeur maximale correspondant à l'état linéaire. On parle dans ce cas de « concentration de contraintes ». [3]

II.2.2. Influence de la taille des éprouvettes - Effet d'échelle :

On observe que pour une contrainte nominale donnée, plus la pièce testée est grande, plus sa tenue en fatigue diminue. On peut donner deux explications possibles, une mécanique et une autre statistique.

Cause mécanique :

Lorsque la poutre est soumise à un état de contraintes non homogène, comme de la flexion par exemple, il existe un gradient de contraintes. Or, plus la pièce est fine, plus ce gradient sera important.

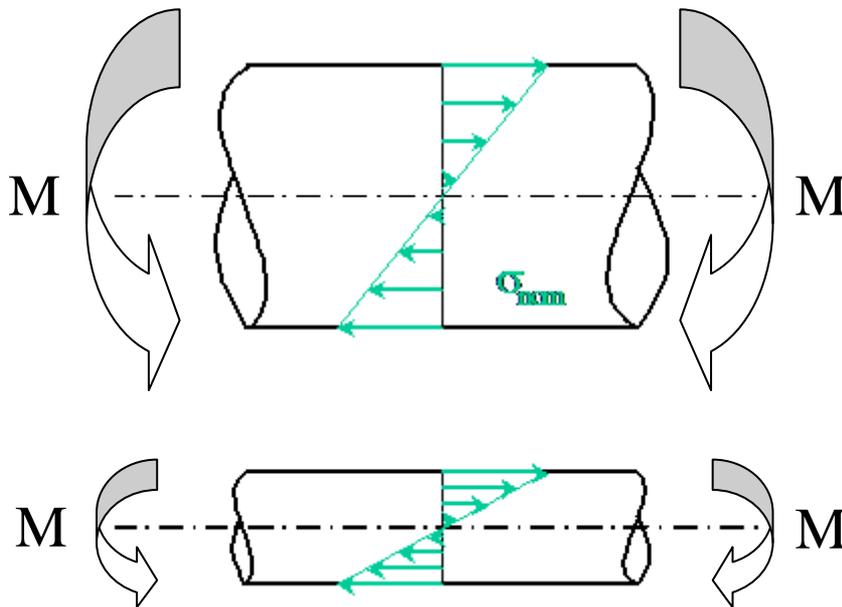


Fig.II.3 : Cause mécanique

Or, il se trouve que la présence d'un fort gradient a un effet bénéfique sur la tenue en fatigue.

Cause statistique :

Plus les dimensions d'une pièce augmentent, plus son volume et sa surface augmentent et ont statistiquement des risques de contenir des défauts (porosités ou inclusions) qui se comporteront comme autant d'amorces de fissures. Il est donc logique que l'échelle d'une pièce joue sur sa tenue en fatigue.

II.2.3. Influence de la géométrie

Des facteurs géométriques comme la présence d'entailles, et donc de concentrations de contraintes et de forts gradients, ont une influence non négligeable sur la tenue des pièces en fatigue.

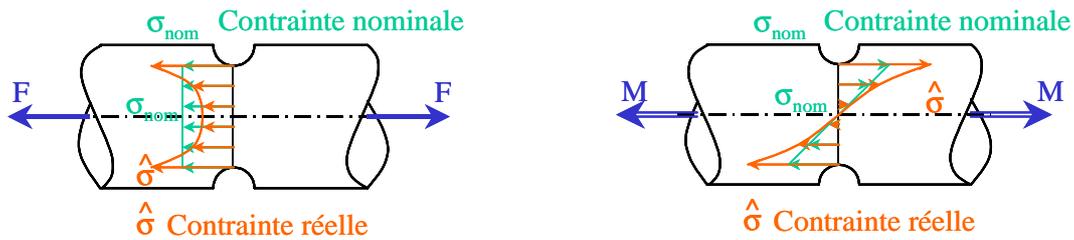


Fig.II.4 : cause géométrique

II.2.4. Coefficient de concentration de contraintes théorique

Le facteur de concentration des contraintes est le rapport de la contrainte maximale (σ_{\max}) observée à la racine de l'incident de forme sur la contrainte nominale (σ_{nom}) à laquelle la structure est soumise. Ce facteur, noté K_t , est donné par :

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (\text{II.4})$$

σ_{\max} : Contrainte maximale en fond d'entaille.

σ_{nom} : Contrainte maximale nominale calculée à partir de la section nette.

Coefficient de concentration de contraintes effectives :

On a constaté expérimentalement que le coefficient de concentration de contraintes effectif est toujours plus faible que le coefficient de concentration de contraintes théorique car la présence d'un gradient de contraintes est bénéfique sur la tenue des pièces en fatigue. Aussi a-t-on défini un coefficient effectif de concentration de contraintes K_f :

$$K_f = \frac{\text{Limite de fatigue sur éprouvette lisse}}{\text{Limite de fatigue sur éprouvette entaillée}} \quad (\text{II.5})$$

$$K_f = \frac{\sigma_D}{\sigma_{\text{dn}}} \quad (\text{II.6})$$

Coefficient de sensibilité à l'entaille :

Pour rendre compte des différences observées entre les facteurs K_t et K_f , Peterson2 définit la sensibilité à l'effet d'entaille à l'aide du paramètre :

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (\text{II.7})$$

Lorsque $K_f = K_t$, on a une forte sensibilité à l'effet d'entaille ($q = 1$). A l'inverse, lorsque $K_f = 1$ on a une insensibilité à l'effet d'entaille ($q = 0$). Une variation de q entre 0 et 1 correspond donc à une augmentation de la sensibilité à l'effet d'entaille.

Le problème de l'utilisation de tous ces coefficients, est qu'il faut réaliser des essais pour les déterminer expérimentalement. Or, si déterminer un coefficient de concentrations de contraintes théorique est relativement aisé (il ne dépend que de la géométrie de l'entaille et du mode de sollicitation), ce n'est pas le cas pour le coefficient effectif de concentration de contraintes. En effet, il nécessite la détermination de la limite de fatigue sur éprouvette lisse et sur éprouvettes entaillées.

II.3. 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.

Ceux sont 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, de la nature de la répartition des inclusions, ainsi que de leur forme par rapport à la direction des efforts.

II.3.1. Influence de la composition chimique

Il est très difficile de séparer cette influence de celle liée à la modification de la structure cristallographique, micrographique et des caractéristiques mécaniques.

On retiendra que la limite de fatigue des aciers augmente avec la teneur en carbone. D'autre part, l'addition d'éléments spéciaux tels que le nickel et le molybdène permet, après trempe et revenu, d'obtenir des augmentations de limite d'endurance particulièrement favorables par rapport aux valeurs des résistances à la traction correspondantes.

II.3.2. Relation entre les propriétés en fatigue et la microstructure

Pour un même acier, les valeurs d'endurance dépendent de la structure micrographique d'une façon légèrement différente de celle des autres propriétés mécaniques. Si l'on considère le rapport d'endurance σ_D/R_m , on obtient les valeurs suivantes :

- Structure ferritique : 0.6
- Structure perlitique : 0.4
- Structure austénitique : 0.35

Dans le cas des structures martensitiques la valeur de ce rapport peut varier dans d'assez larges limites selon les conditions de trempe et la teneur en éléments d'additions.

Un acier à grains fins aura des caractéristiques mécaniques statiques supérieures à celles du même acier à grains plus gros (sauf résistance au fluage). La résistance à la fatigue est améliorée dans des proportions légèrement supérieures (augmentation du rapport σ_D/R_m quand la taille des grains diminue). On rappelle que la taille des grains peut être modifiée par recuit, par surchauffe (grossissement) ou par écrouissage (affinage du grain).

Les inclusions diminuent la tenue en fatigue. Les inclusions dures (oxydes, silicates,...) sont plus défavorables que les inclusions malléables (sulfures...). D'autre part, l'influence des inclusions sera d'autant plus grande que la résistance du métal sera plus élevée.

II.3.3. Facteurs liés à la mise en forme

Lors des opérations de transformation à chaud : laminage, forgeage, les inclusions sont orientées dans le sens de la déformation (sens long). La comparaison des aciers coulés avec des aciers forgés de même structure montre que la limite d'endurance dans le sens long est plus élevée pour les aciers transformés à chaud (+ 25% environ pour un acier à teneur en carbone comprise entre 0.3% et 0.4%).

Lors des opérations de mise en forme à froid : étirage, frappe, emboutissage, le métal subit un écrouissage qui a pour effet de morceler les grains ce qui conduit généralement à une augmentation de la charge de rupture et des caractéristiques en fatigue.

Tous les défauts susceptibles d'entraîner une concentration de contrainte ou une diminution de la résistance du métal seront des causes d'une baisse de la limite d'endurance : retassures, criques, tapures de trempe, fibrage des pièces laminées ou forgées...

II.3.4. Influence des conditions de surface

Les fissures de fatigue sont très souvent amorcées à la surface des pièces et on recherchera en général à améliorer, dans la mesure du possible, l'endurance des couches superficielles. Les traitements superficiels (cémentation, carbonituration, trempage superficielle...) permettent en général d'obtenir, d'une part une structure de haute résistance en surface s'appuyant sur un cœur plus tenace, et d'autre part, des contraintes résiduelles de compression en surface dont l'effet est bénéfique sur la tenue en fatigue.

Les traitements purement mécaniques (galetage, martelage, grenailage...) auront un effet favorable dont l'intensité dépend du taux d'écaillage superficiel et de l'amplitude des contraintes résiduelles.

Il est important, lors de la préconisation d'un traitement de surface, de s'assurer que les zones d'arrêt du traitement, qui sont le siège de contraintes de tension, ne coïncident pas avec des zones de concentration de contraintes de service.

II.3.5. Influence de la température

De nombreux résultats d'essais montrent que le rapport d'endurance σ_D/R_m reste généralement constant lorsque la température varie. La limite d'endurance variera donc dans le même sens que les caractéristiques mécaniques des aciers lorsque ceux-ci seront soumis à des sollicitations de fatigue à une température autre que la température ambiante. On pourra donc prévoir la limite d'endurance à partir des courbes de variation de la résistance à la rupture en fonction de la température.

II.3.5.1. Fatigue à basse température

La résistance à la rupture augmente lorsque la température diminue, il en sera de même de la limite d'endurance. Il faut cependant tenir compte de la diminution, voire de la disparition du phénomène d'adaptation à fond d'entaille. A basse température, la valeur du coefficient de concentration de contraintes effectif K_f aura tendance à se rapprocher de la valeur de K_t .

II.3.5.2. Fatigue à haute température

Généralement, lorsque la température croît, on observe une baisse de la résistance à la rupture et une baisse encore plus forte de la limite d'élasticité. Cette règle générale peut cependant être contrariée par les phénomènes métallurgiques qui peuvent advenir pour certains types d'aciers ou de métaux (vieillessement et durcissement structural par exemple). Il est plus difficile de donner une règle générale pour l'évolution de la limite d'endurance en fonction de la température. On pourra retenir que dans une plage de

40°C à 200°C la limite d'endurance des aciers de construction classiques varie relativement peu.

Lorsque la température est très élevée ($T > 0.4T_f$), il se produit une interaction entre le fluage et la fatigue. La tenue en fatigue peut alors baisser rapidement, surtout lorsque les efforts appliqués ne sont pas purement alternés. Dans ce cas, la présence d'une contrainte statique permet au fluage de jouer pleinement son rôle.

II.3.6. Influence de la fréquence de sollicitation

Expérimentalement, on constate que pour des fréquences de sollicitation relativement modestes (fréquence inférieure à 100 Hz), ce facteur n'a pas d'effet sur la durée de vie des pièces sollicitées. Au delà de 100 Hz, on constate expérimentalement une amélioration de la tenue des pièces. Ce renforcement est dû au fait que la contrainte maximale est appliquée pendant moins longtemps au cours de chaque cycle. Le tableau ci-dessous illustre ce phénomène pour quelques aciers.

	Limite de fatigue (en MPa)		
	25 Hz	166 Hz	500 Hz
Acier doux	215	215	228
Acier inoxydable	414	434.5	476
Acier à rails	345	345	352

Tab.II.1 : Limite de fatigue des aciers

II.3.7. Influence du mode de sollicitation

Il est admis que le mode de sollicitation a une influence sur la tenue des pièces en fatigue. Généralement on considère les relations suivantes :

Limite de fatigue en flexion plane = 1.05 x Limite de fatigue en flexion rotative

Limite de fatigue en traction-compression = 0.9 x Limite de fatigue en flexion rotative

Limite de fatigue en torsion = 0.6 x Limite de fatigue en flexion rotative.

II.3.8. Influence de la contrainte moyenne

Généralement, lorsqu'une contrainte moyenne se superpose à la contrainte purement alternée, la limite d'endurance diminue pour une contrainte statique de traction. Par contre, elle augmente pour des contraintes moyennes faiblement négatives. L'ensemble des limites d'endurance d'un matériau en fonction de la contrainte moyenne peut être représenté sur de nombreux diagrammes. Les plus courants sont ceux de Goodman et de Haigh.

CHAPITRE III
PREPARATION DES ESSAIS

III.1. Introduction

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

III.2. Choix de l'acier

Pour déterminer le comportement d'un type d'acier sous le phénomène de fatigue, nous avons choisi l'acier XC48 de 14 mm de diamètre qui présente les meilleures dimensions pour l'usinage des éprouvettes.

Type d'acier : barre ronde étirée de Ø14 mm.

III.2.1. Domaine d'utilisation de l'acier

L'XC48 est un acier d'amélioration, livré normalement sans traitement thermique, facilement usinable et orienté vers la production des pièces de construction pour outillage à plastique, moules de soufflage et toutes sortes d'outils à main à l'état trempé (marteaux, fourches, couteaux, scies, tournevis...) [5].

III.2.2. Composition chimique de l'acier

Elément	C	MN	SI	S	P
Valeur en %	0.48	0.6	0.25	0.03	0.027

Tab.III.1. Composition chimique de l'acier XC48

Propriétés mécaniques	Limite élastique	Limite de rupture	Allongement
Symbole	Re(MPa)	Rm(MPa)	%A
XC48	375	660	15

Tab.III.2. Propriétés mécanique de l'acier XC48

III.3. Machine d'essai de fatigue

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

Le laboratoire de la résistance des matériaux (RDM) du département de génie mécanique de l'école nationale polytechnique possède une machine d'essai de fatigue en flexion rotative (**SCHENCK**) qui a les caractéristiques suivantes :

- Courant alternatif : 220 V
- Fréquence : 50 Hz
- Environnement : air ambiant
- Température : ambiante

III.3.1. Description de la machine

La figure III.1 montre la machine d'essai de fatigue en flexion rotative.



Photo.III.1 : Machine de flexion rotative « SCHENCK »

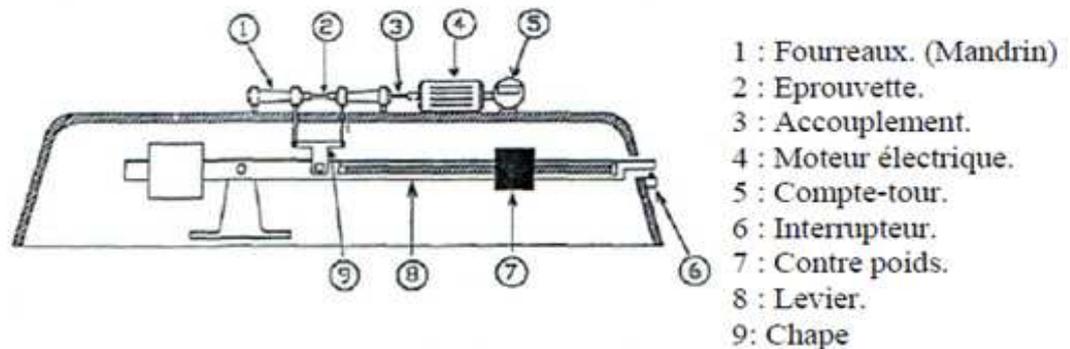


Fig.III.1 : Le schéma de la machine d'essai

On peut décomposer la machine d'essai utilisée en deux parties principales :

- Une partie tournante : composée de deux fourreaux (1), à l'intérieur de chacun est monté une pince qui permet le serrage de l'éprouvette (2). Sur chaque fourreau sont montées deux roulements rotules à deux rangés de billes qui

assurent le guidage en rotation. L'un des fourreaux (gauche) est relié à un moteur électrique (4), tournant à 2760 tr/min avec un accouplement élastique avec un ressort (3). Le moteur est relié à un compte-tours (5) qui indique le nombre de cycles effectués par l'éprouvette pendant l'essai.

- Une partie de chargement : composée principalement d'un levier(8) sur lequel peut glisser une masse (7) dont le déplacement est mesuré grâce à une aiguille coulissante le long d'une règle de 300 mm. Ce levier est relié aux deux fourreaux par l'intermédiaire d'une chape (9) de manière à transmettre à la partie tournante l'effort produit par la masse coulissante. Le levier peut entrer en contact avec un coupe circuit lors de la rupture de l'éprouvette ce qui permet de mesurer le nombre de cycles effectués sous une certaine charge jusqu'à rupture.

III.4. Instructions

- Connecter la machine d'essai de fatigue à l'alimentation électrique.
- Eliminer la charge en faisant tourner le levier.
- Etre sûr que l'axe du roulement et celui de l'arbre de transmission sont en alignement.
- Insérer l'éprouvette désirée.
- appliquer la charge désirée en tournant le volant.
- Allumer la machine.
- A la rupture, la fin de course arrête automatiquement la machine, changer l'éprouvette rompue et recommencer les essais.

III.5. Mode de sollicitation de l'éprouvette

La sollicitation sur la machine de flexion rotative est modélisée par une flexion à quatre points d'une poutre, voir fig.III.2. De cette manière, l'éprouvette est soumise à un moment fléchissant constant le long de la partie utile de l'éprouvette (entre les deux appuis).

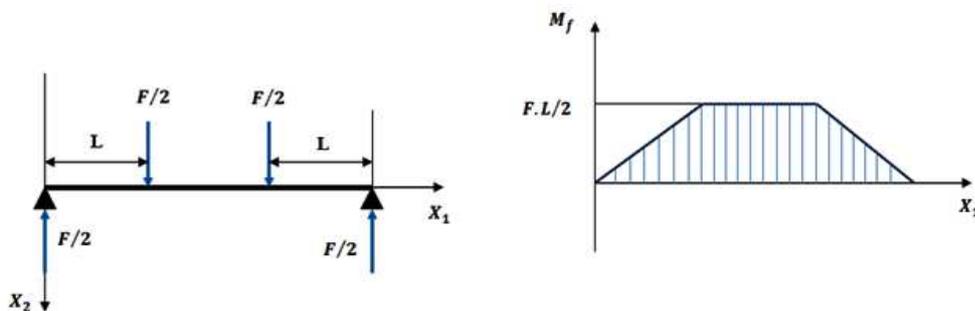


Fig.III.2 : Mode de sollicitation

La contrainte s'obtient en exerçant un effort de flexion de direction fixe et d'amplitude constante. La fatigue est engendrée par la rotation de la pièce en conservant la flexion de direction fixe. Ainsi toutes les fibres sauf la fibre neutre. Sont successivement tendues puis comprimées. Les sollicitations agissant sur chaque fibre varient ainsi en fonction du temps suivant une loi sinusoïdale avec une valeur moyenne nulle. Chaque révolution correspond à une période ou à un cycle de fatigue.

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

III.6. Les éprouvettes d'essais

III.6.1. Forme et dimensions des éprouvettes

Les éprouvettes d'essais sont de formes cylindriques de longueur 120 mm dont la partie utile est de 60mm de longueur et de 8mm de diamètre avec deux entailles parallèles de 6mm de diamètre.

X est la distance entre ces deux entailles variable de 1.5→20mm sur la partie utile.

Les extrémités de l'éprouvette sont de 12mm de diamètre.

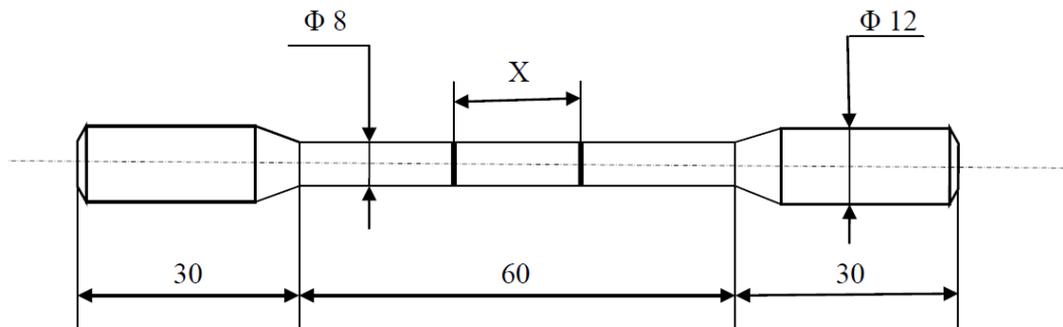


Fig.III.3 : Eprouvette avec double entailles parallèles [4].

La distance entre les deux entailles X varie d'une éprouvette à une autre de telle façon que le milieu de l'éprouvette divise toujours la distance entre les deux entailles X en deux parties égales. Voir la photo III.4.

La distance X entre deux entailles est variable d'une éprouvette à une autre. Les entailles sont à égale distance du milieu de l'éprouvette (Voir photo III.2).

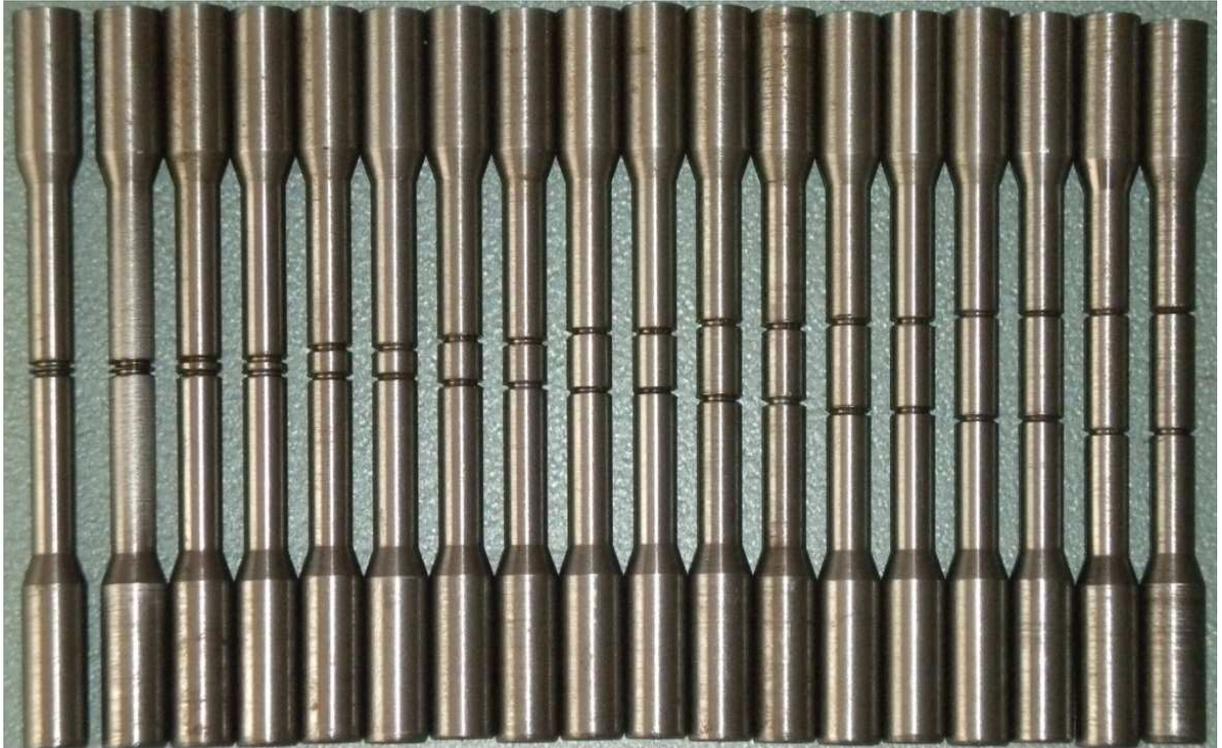


Photo.III.2 : Variation de la distance X entre les entailles

Pour chaque distance, on a usiné six (06) éprouvettes. En tout, on a réalisé 54 éprouvettes.
(Voir photo III.4).



Photo.III.3 : Les éprouvettes usinées

Les entailles sont en forme de «V» effectuées avec un outil à pastille. (PHOTO III.4) de rayon $r = 0,4$ mm, et par conséquent l'ouverture de l'entaille a un angle de 35° , une profondeur de 1 mm et un rayon au fond d'entaille $r = 0,4$ mm fixé pour toutes les éprouvettes d'essais.

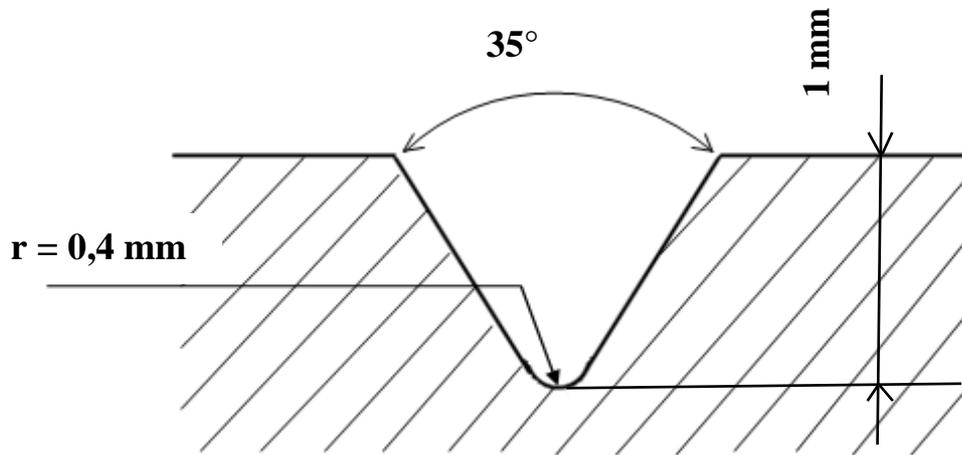


Fig.III.4 : Forme de l'entaille



Photo.III.4 : Outils à pastille

III.6.2. Usinage des éprouvettes

Dans cette présente étude, nous avons usiné nos éprouvettes dans l'atelier de fabrication par un tour à commande numérique (CNC) utilisant un programme spécifique. L'usinage a été fait en tournage à partir de trois barreaux étirés de diamètre 14 mm. Il est passé par deux opérations élémentaires : ébauche et finition.

L'usinage des éprouvettes a été effectué dans les mêmes conditions d'environnement dans le but d'avoir des éprouvettes identiques.

III.7. Traitement thermique

Le traitement thermique a été fait aux niveaux du laboratoire du traitement thermique du département de génie mécanique, où on a utilisé un four qui a une plage de température qui varie de 0 à 1200°C .

On a choisit le traitement thermique de telle façon à avoir une variation notable dans les caractéristiques mécaniques et métallurgiques.

III.7.1. Trempe-revenue

Les éprouvettes ont été trempées à l'eau après un chauffage à 810°C et un maintien à cette température pendant 20 minutes, suivie d'un revenu à 200°C avec un maintien a cette température pendant une heure.

CHAPITRE IV

RESULTATS DES ESSAIS

IV.1. Introduction

Notre but est de voir comment influent les traitements thermiques sur la relation entre la durée de vie des éprouvettes et la distance entre ses deux entailles.

En premier lieu, nous allons présenter quelques observations concernant les faciès de ruptures sur les éprouvettes. Nous allons suite à cela, commenter le processus de propagation de fissure.

En second lieu, nous allons exposer les résultats obtenus lors de nos essais, ainsi que leurs interprétations. Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre III, les essais consistent en l'étude de l'impact du traitement thermique sur la relation entre la durée de vie des éprouvettes et la distance entre leurs entailles.

IV.2. Observation sur les ruptures des éprouvettes

IV.2.1. Sans traitement thermique

Au cours de notre expérience, nous avons constaté que la rupture au niveau de l'une des entailles est aléatoire quelque soit la distance prise entre les deux entailles ce qui montre que le system de chargement est équilibré.



Photo.IV.1 : Faciès de rupture de l'éprouvette X=5 mm



Photo.IV.2 : Faciès de rupture de l'éprouvette X=10 mm

On remarque qu'il existe deux zones distinctes sur les faciès de rupture.

- Une zone de cassure brutale est plus ou moins centrée qui présente une surface rugueuse et sombre.
- Une zone de propagation de fissure qui présente une surface plutôt lisse et soyeuse par rapport à la zone de rupture brutale (finale).

Cette fissure s'amorce à la surface dont il ya concentration de contrainte (entaille, état de surface) et se propage au cœur de la section, cela est due au gradient de contrainte et l'entaille guide cette fissure.



Photo.IV.3 : Faciès de rupture de l'éprouvette X=20 mm



Photo.IV.4 : Faciès de rupture de l'éprouvette X = 15 mm

La taille de la zone de rupture est proportionnelle à la distance entre les deux entailles. Cela est expliqué par la vitesse de diminution de la résistance à la rupture. Cette dernière est d'autant plus rapide pour des distances entre entailles plus grande.

IV.2.2. Avec traitement thermique

On constate que la surface de rupture est plus rugueuse pour l'acier à l'état initial que pour l'acier à l'état trempé-revenu.

On remarque également que la zone de rupture pour les éprouvettes qui ont subi le traitement thermique est plus petite que celles qui ne l'ont pas subi. Ceci s'explique par le fait que le traitement thermique augmente la durée de vie des éprouvettes.



Photo.IV.5 : Faciès de rupture de l'éprouvette X=10 mm avec traitement thermique



Photo.IV.6 : Faciès de rupture de l'éprouvette X = 10 mm sans traitement thermique



Photo.IV.7 : Faciès de rupture de l'éprouvette X=20 mm avec traitement thermique



Photo.IV.8 : Faciès de rupture de l'éprouvette X = 20 mm sans traitement thermique

IV.3. Résultats des essais

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats des essais réalisés sur la machine de fatigue en flexion rotative.

IV.3.1. Résultats sans traitement thermique

Le niveau de chargement choisi est fixé, pour toutes les éprouvettes d'essais, à une valeur de 180 MPa.

Nombre de cycles jusqu'à rupture				
σ (MPa)	X (mm)	Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3
180	1.5	570100	609500	/
	2.5	108300	668200	850200
	5	103800	814000	/
	7.5	602500	474400	75400
	10	298100	333500	/
	12.5	321100	185200	241500
	15	141400	235300	181500
	17.5	105400	143800	260200
	20	81200	169600	93800

Tab.IV.1. Nombre de cycles jusqu'à rupture en fonction des distances entre les entailles.

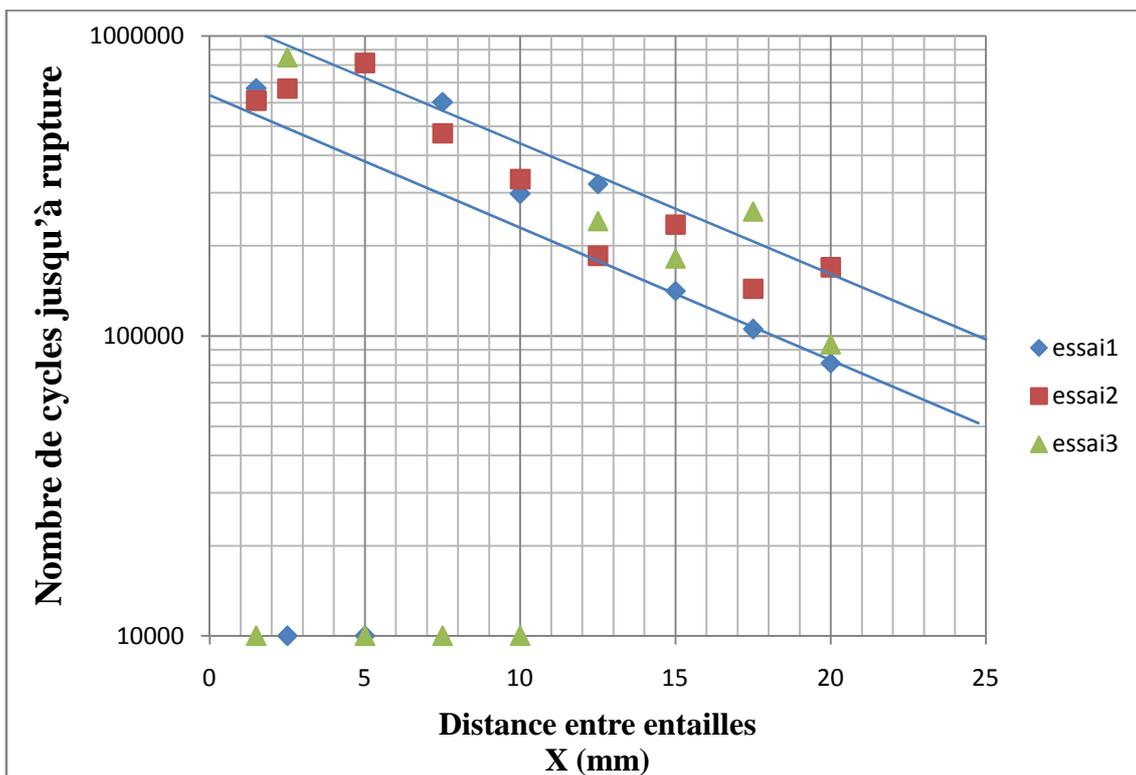


Fig.IV.1 : Variation de la durée de vie (N) en fonction de la distance entre les entailles (X)

Le graphe montre que la durée de vie est inversement proportionnelle à la distance entre les entailles. En augmentant la distance entre les deux entailles, le nombre de cycles jusqu'à ce que l'éprouvette se rompe diminue.

σ (MPa)	Distance entre les entailles X (mm)	La flèche δ (10^{-2} mm)	Nombre de cycle N	Taux d'évolution de la flèche (%)
180	5	7	0	0
		8	13200	14.28
		9.5	28500	35.71
		10	37200	42.85
		11	71400	57.14

Tab.IV.2. Taux d'évolution de la flèche, par rapport a la flèche initiale, en fonction du Nombre de cycles sur l'éprouvette, X = 5 mm.

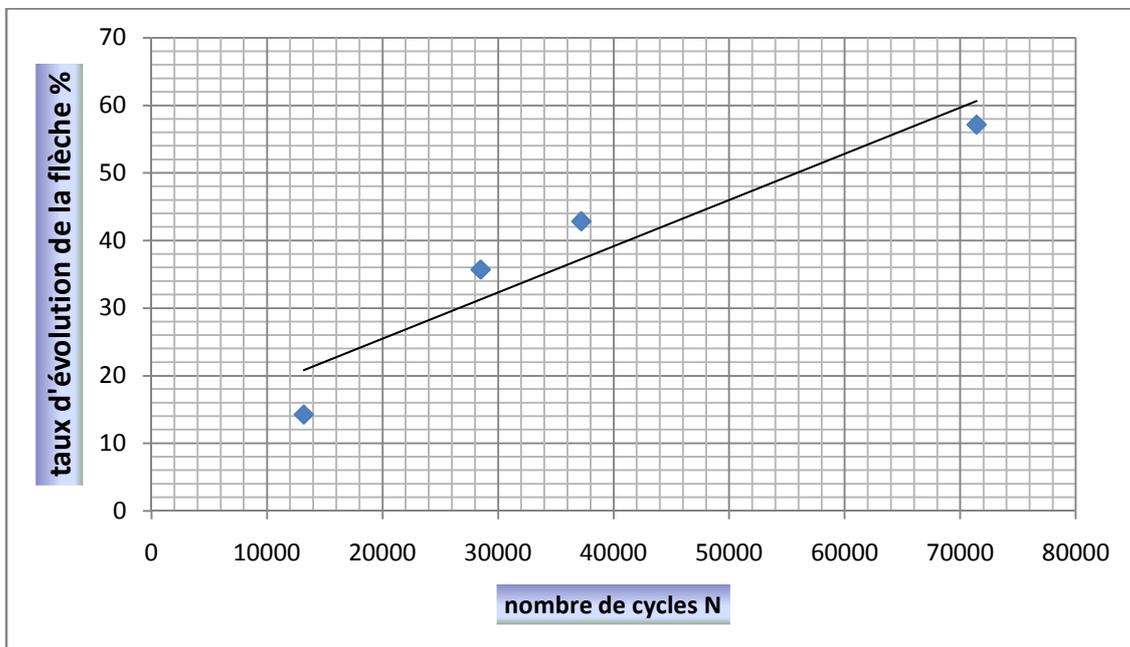


Fig.IV.2 : Taux d'évolution de la flèche en fonction du Nombre de cycles pour l'éprouvette X=5mm.

D'après le graphe, on remarque que le taux d'évolution de la flèche est proportionnel à la durée de vie des éprouvettes.

σ (MPa)	Distance entre les entailles X (mm)	La flèche δ (10^{-2} mm)	Nombre de cycle N	Taux d'évolution de la flèche (%)
180	10	8	0	0
		9	24800	12.5
		10.5	147400	31.25
		11.5	252700	43.75
		12	302900	50
		13	526600	62.5

Tab.IV.3. Taux d'évolution de la flèche, par rapport a la flèche initiale, en fonction du Nombre de cycles sur l'éprouvette, X = 10 mm.

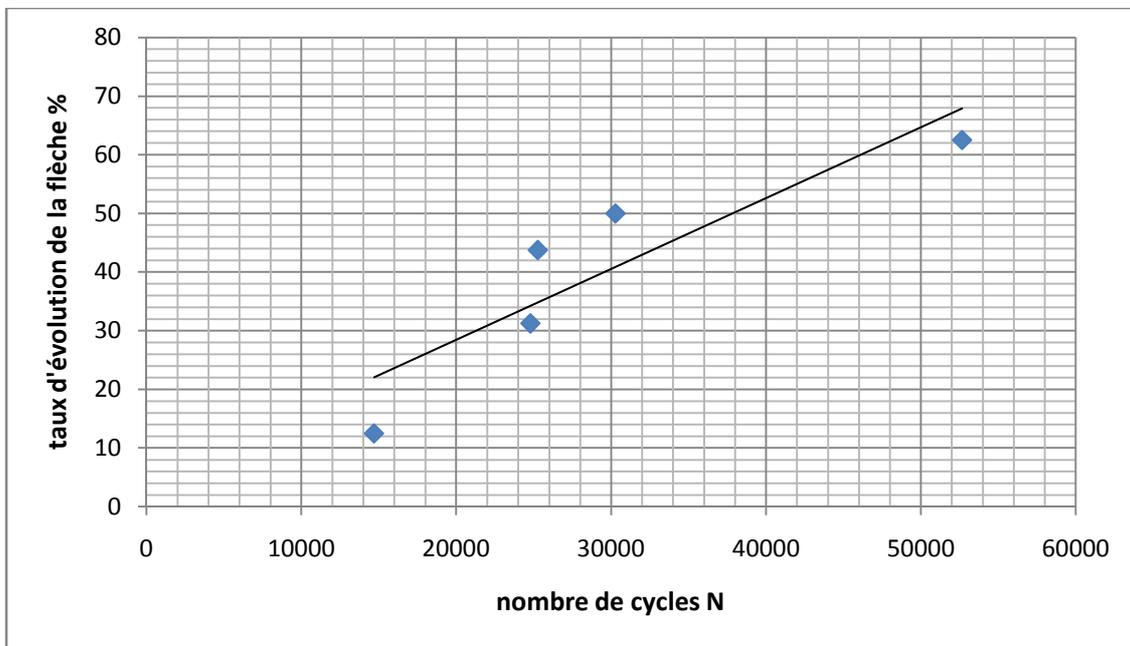


Fig.IV.3 : Taux d'évolution de la flèche en fonction du Nombre de cycles pour l'éprouvette X=10 mm.

D'après le graphe, on remarque que le taux d'évolution de la flèche est proportionnel à la durée de vie des éprouvettes.

σ (MPa)	Distance entre les entailles X (mm)	La flèche δ (10^{-2} mm)	Nombre de cycle N	Taux d'évolution de la flèche (%)
180	15	8	0	0
		10	28500	25
		12.5	50300	56.25
		13.5	74600	68.75

Tab.IV.4. Taux d'évolution de la flèche, par rapport a la flèche initiale, en fonction du Nombre de cycles sur l'éprouvette, X = 15 mm.

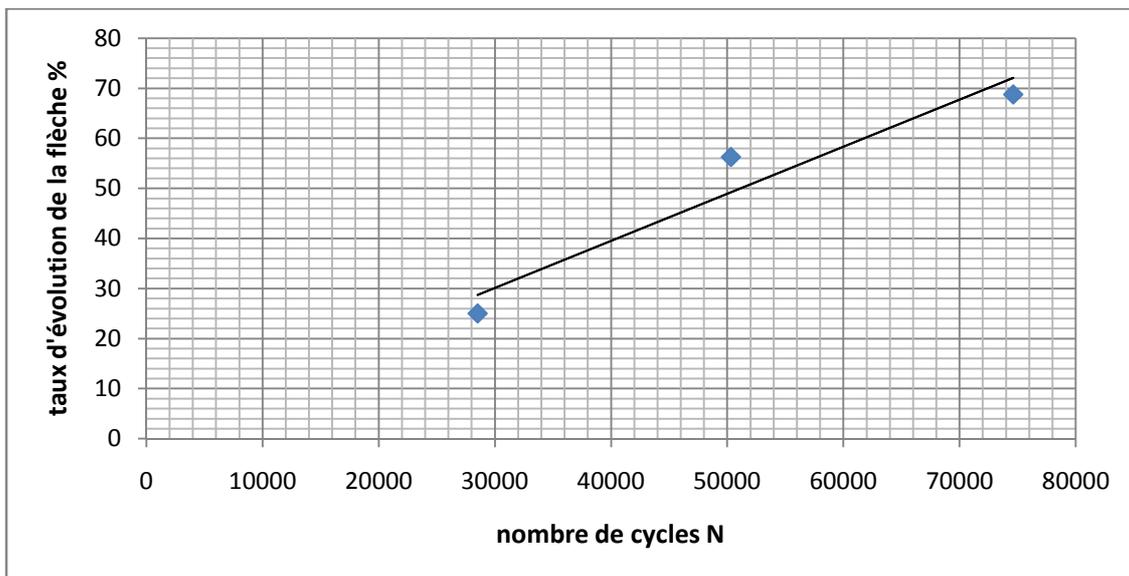


Fig.IV.4 : Taux d'évolution de la flèche en fonction du Nombre de cycles pour l'éprouvette X=15 mm.

D'après le graphe, on remarque que le taux d'évolution de la flèche est proportionnel à la durée de vie des éprouvettes.

σ (MPa)	Distance entre les entailles X (mm)	La flèche δ (10^{-2} mm)	Nombre de cycle N	Taux d'évolution de la flèche (%)
180	20	7.5	0	0
		9.5	17500	26.66
		11	54000	46.66
		12.5	78900	66.6
		13	105900	73.33
		13.5	168900	80

Tab.IV.5. Taux d'évolution de la flèche, par rapport a la flèche initiale, en fonction du Nombre de cycles sur l'éprouvette, X = 20 mm.

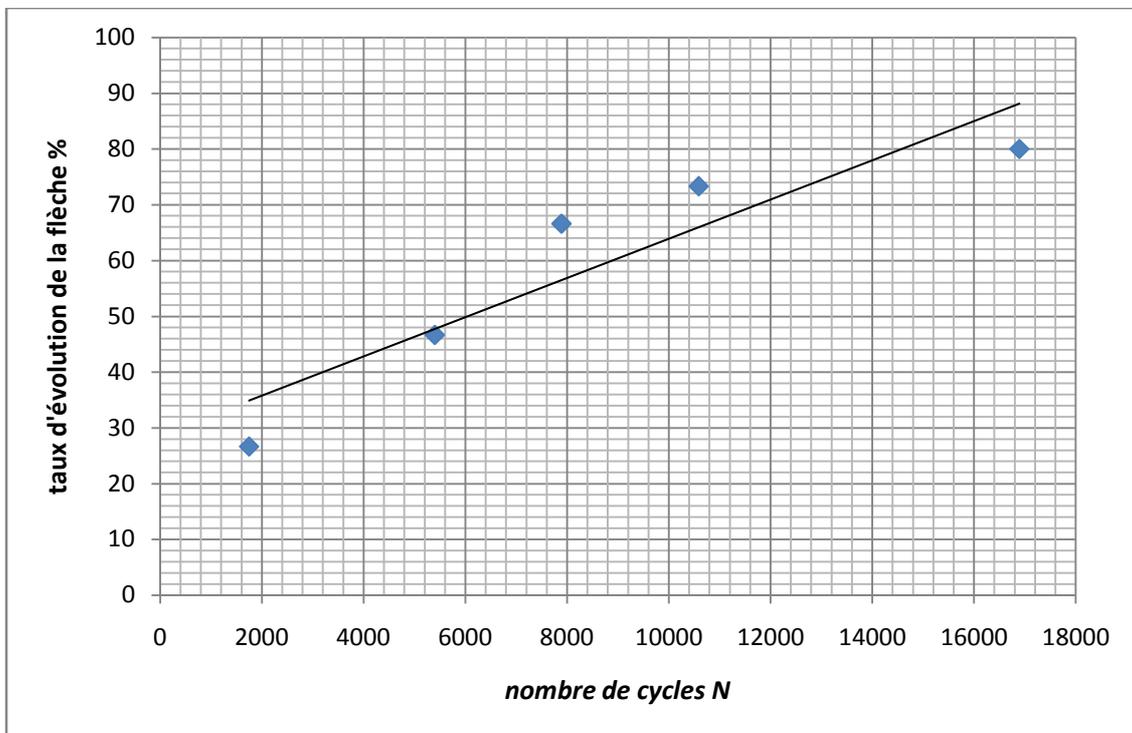


Fig.IV.5 : Taux d'évolution de la flèche en fonction du Nombre de cycles pour l'éprouvette X=20 mm.

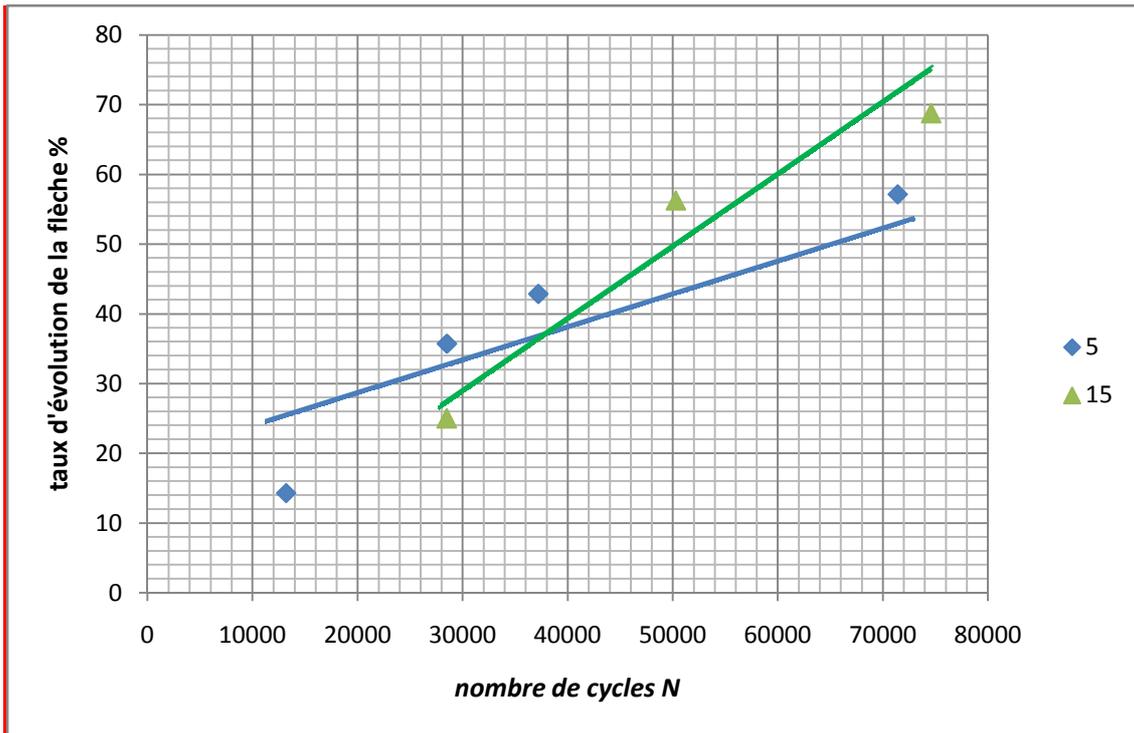


Fig.IV.6 : Taux d'évolution de la flèche en fonction du Nombre de cycles pour les éprouvette X=5 mm et X= 15 mm.

La vitesse de variation de la flèche est proportionnelle à la distance entre les deux entailles. Par conséquent les éprouvettes perdent plus rapidement leur rigidité flexionnelle si la distance entre les deux entailles est grande.

IV.3.2. Résultats avec traitement thermique :

Durant la préparation des éprouvettes traitées thermiquement, on a rencontré un problème de déformation des éprouvettes. Il s'agit de la déformation de la partie utile des éprouvettes lors de leur chauffage. Durant ce dernier, les éprouvettes se sont fléchies. Pour remédier à ce problème, on a tenté de récupérer le maximum d'éprouvettes, et ce pour les éprouvettes dont la flèche ne dépassent pas 20 cm.

- On cherche d'abord le plan de flexion, en tournant l'éprouvette sur son axe de révolution, la flèche maximale correspond au plan de flexion recherché. L'éprouvette repose sur deux pièces de forme V. la rotation de l'éprouvette est manuelle. La mesure de la flèche est effectuée via un comparateur (voir photo. IV.9)
- Ensuite, sur un tour conventionnel (voir photo IV.10), on fixe l'éprouvette entre le mandrin et la poupée mobile, afin d'assurer l'alignement de l'éprouvette.

- Sur le porte-outil du tour, on fixe une pièce cylindrique (voir photo IV.10). On fait tourner l'éprouvette sur son axe de révolution de manière à avoir le plan de flexion horizontalement et la flèche maximale du côté de la pièce cylindrique.
- A chaque déflexion correspond une force à appliquer. Cette force appliquée au sens inverse de la flèche, vise à rattraper la déformation plastique de l'éprouvette. La valeur de la force est proportionnelle à la flèche à laquelle il faut déformer l'éprouvette.

On a réussi à rattraper huit (08) éprouvettes, ayant des déflexions modérées, ne dépassant pas 0,27 mm. C'est pour cela qu'on a effectué un seul essai pour chaque distance entre les entailles.



Photo.IV.9 Vérification de l'excentricité



Photo.IV.10 Phase de Dressage

Afin de rattraper les éprouvettes ayant la flèche supérieure à 40 centièmes de millimètre, on a procédé de la même manière que pour les éprouvettes rattrapées sur le tour. Sauf qu'on a mis l'éprouvette dans une machine de traction (voir photo IV.11), générant une force plus importante. Les éprouvettes n'ont pu être à cause de la grande déflexion.

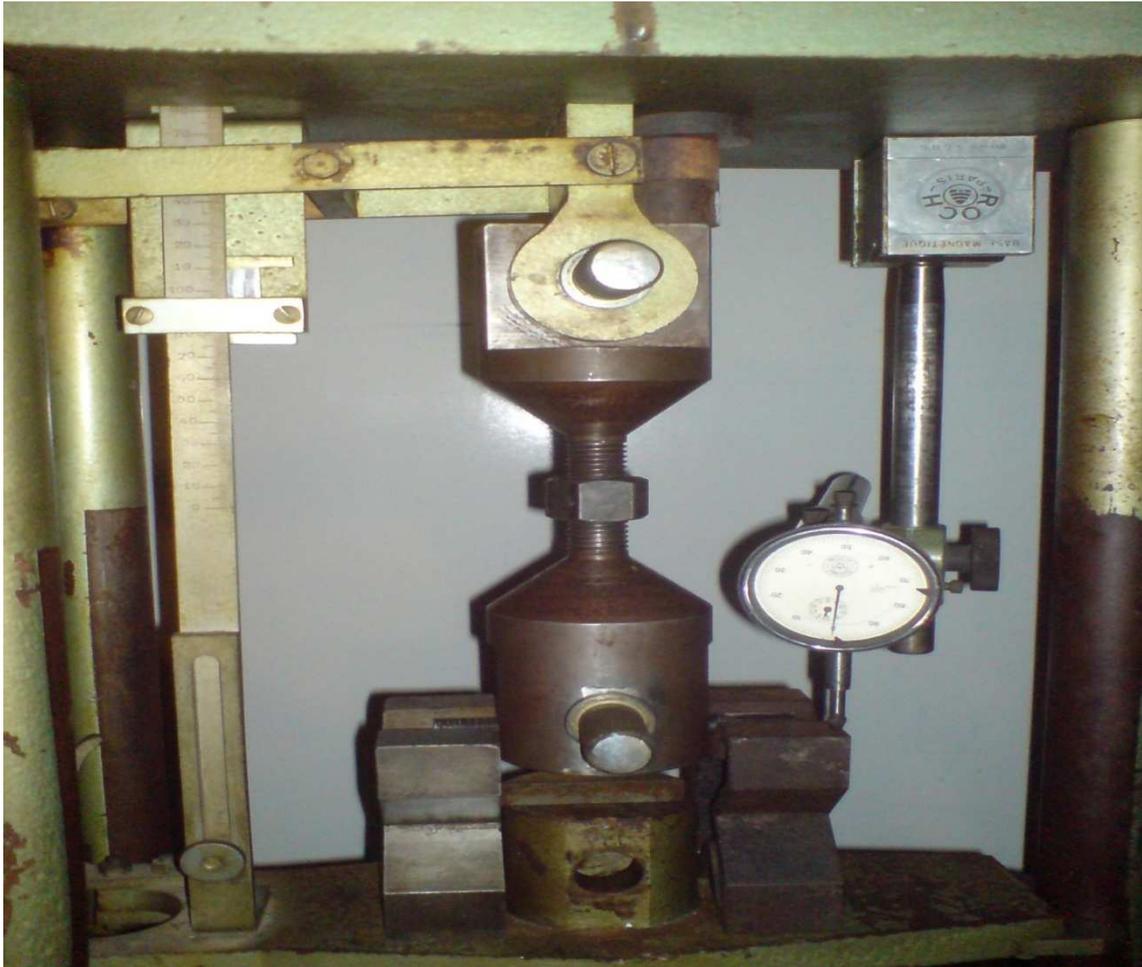


Photo.IV.11 : Machine de traction

Nombre de cycles jusqu'à rupture		
σ (MPa)	X (mm)	Essai N°1
180	1.5	570100
	2.5	108300
	5	103800
	7.5	602500
	10	298100
	12.5	321100
	15	141400
	20	81200

Tab.IV.6. Nombre de cycles jusqu'à rupture en fonction des distances entre les entailles avec traitement thermique.

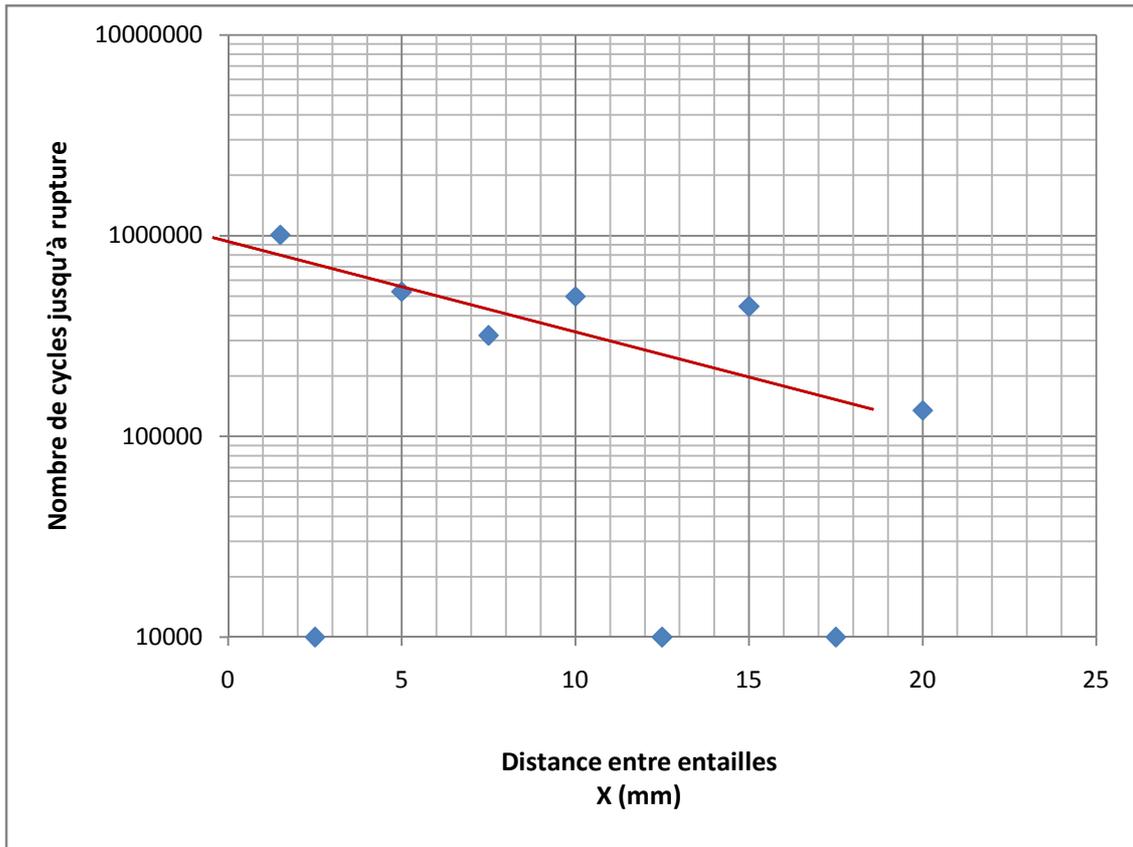


Fig.IV.7 : Variation de la durée de vie (N) en fonction de la distance entre les entailles (X) pour les éprouvettes traitées thermiquement.

IV.3.3. Comparaison des comportements des éprouvettes avec et sans traitement thermique

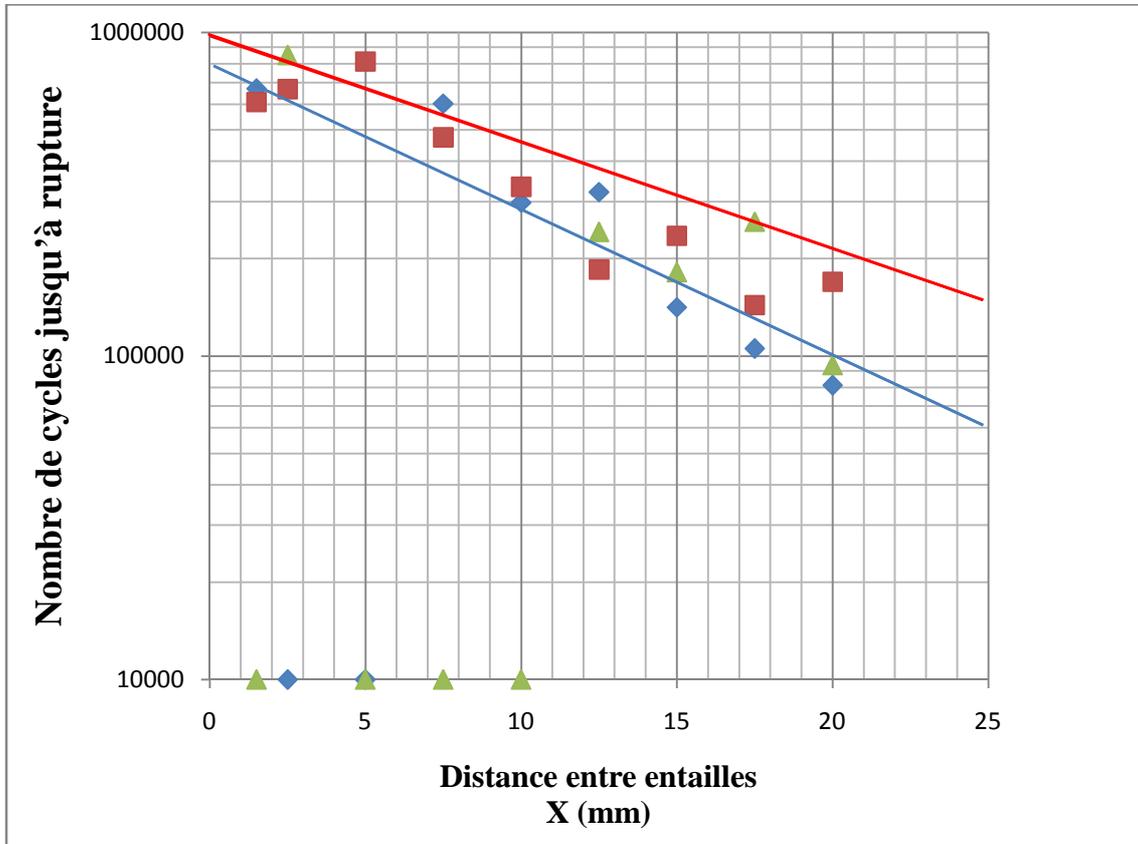


Fig.IV.8 : Comparaison entre la variation de la durée de vie (N) en fonction de la distance entre les entailles (X) pour les éprouvettes sans et avec traitement thermique.

Le traitement thermique fait gagner une durée de vie supérieure à 150 000 cycles en moyenne.

Conclusion générale

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

Pour ce faire, nous avons donc réalisé des essais dynamiques sur des échantillons d'éprouvettes cylindriques traitées thermiquement et d'autres laissées à l'état initial avec double entailles de diamètre 6 mm, de forme «V» et de rayon en fond d'entaille égal à 0,4 mm.

Ces derniers ont permis les conclusions suivantes :

- La durée de vie est inversement proportionnelle à la distance entre entailles,
- L'évolution de la flèche est proportionnelle à la durée de vie,
- La perte de rigidité est proportionnelle à la distance entre entailles,
- On a distingué deux zones sur la surface de rupture, une zone de propagation de fissure et une zone de rupture finale,
- La taille de la zone de rupture est proportionnelle à la distance entre les deux entailles,
- La taille de la zone de rupture pour les éprouvettes qui ont subi le traitement thermique est plus petite que celles qui ne l'ont pas subi,
- Le traitement thermique fait augmenter la durée de vie des éprouvettes.

Bibliographie

- [1] C. BATHIAS, JEAN-PAUL. BAÏLON, *La fatigue des matériaux et des structures*, Hermes, Paris, 2^e édition (1997).
- [2] A. BRAND, J-F. FLAVENOT, R. GREGOIRE et C. TOURNIER, *Donnés technologiques sur la fatigue*, CETIM 3^e édition (1992).
- [3] A. BRAND, *Calcul des pièces à la fatigue*, CETIM (1980).
- [4] N.BELOUADAH, Quantification de l'endommagement par fatigue en flexion rotative d'éprouvettes avec double entailles à l'aide de l'essai de traction, Projet de fin d'étude, ENP, Juin 2010.
- [5] C. W. WEGST, *La clé des aciers*, STAHLSCHÜSSEL (1989).
- [6] G. BARATTO, J-J. GUERIN, J. MONGIS, C. TOURNIER et A. VIEU, *Analyse morphologique des défaillances d'organe de machines*, CETIM (1996).