
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE
Option : Construction
Laboratoire Génie Mécanique et Développement

Thèse de Magister

Présentée par :

Brahim GUERGUEB

Ingénieur d'état en Génie Mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique

Thème :

**Influence de certains paramètres sur l'endurance
sous entaille en flexion rotative**

Soutenue le 18 Décembre 2007 devant le Jury composé de:

MM	M. BOUABDALLAH	Professeur	E.N.P	Président
	Y.BELKACEMI	Dr. C.C	E.N.P	Directeur
	A.BALI	Professeur	E.N.P	Co-Directeur
	S.RECHAK	Professeur	E.N.P	Examineur
	B.BENKOUSSAS	M.C.	E.N.P	Examineur
	M.BOUAZIZ	M.C.	E.N.P	Examineur

Remerciements



Je remercie Dieu de m'avoir donné le courage et la force pour terminer ce travail.

Que mes **Amis**, le **Dr. Y.Belkacemi** et le **Professeur A.Bali** Directeurs de thèse, trouvent ici l'expression de ma reconnaissance, mon estime et mes vifs remerciements pour leurs conseils, leur grande patience et leur aide très précieuse pour terminer ce travail commencé il y'a longtemps.

Je remercie le **Professeur M.Bouabdallah** d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.

Mes remerciements vont aussi au **Professeur S.Rechak**, au **Dr. B.Benkoussas** et au **Dr. M.Bouaziz** d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je tiens aussi à remercier tous mes amis et collègues pour leur soutien et encouragements. Je ne citerai pas de noms ici pour ne pas en oublier certains.

B. GUERGUEB

Sommaire

Sommaire

Introduction	1
Chapitre 1 Présentation de quelques facteurs d'influence	3
Introduction	3
1-1-1 Entaille et effet d'entaille	4
1-1-2 Passage à la fissure- facteur d'intensité de contrainte K_I	5
1-1-3-1 Facteur de concentration de contrainte en fatigue K_f	7
1-1-3-2 Facteur de sensibilité à l'entaille q_i- différents modèles	8
1-1-4 Courbes d'endurance sous entaille	13
1-2 Influence des traitements thermiques et autres	13
1-3 Effet de l'histoire de chargement et endommagement	13
1-4 Autres facteurs d'influence	14
1-4-1 Facteurs mécaniques	15
1-4-2 Effet d'échelle	15
1-4-3 Effet de l'état de surface	16
1-4-4 Effet de la corrosion	17
Conclusion	18
Chapitre 2 Techniques expérimentales et moyens d'essais utilisés	19
Introduction	19
2-1 Historique	19
2-2 Premières machines modernes de fatigue	21
2-2-1 Machine de traction-compression	21
2-2-2 Essais de flexion plane alternée	22
2-2-3 Machine de flexion rotative	22
2-3 Machines actuelles de fatigue	23
2-4- Machines d'essais et éprouvettes utilisées	25
2-4-1 Machine de flexion rotative	25
2-4-2 Machine de traction	27
2-4-3 Types d'éprouvettes utilisées	27
2-4-4 Mode de sollicitation de l'éprouvette en flexion rotative	29
Conclusion	29
Chapitre 3 Fatigue sous entaille et traitements thermiques	30
Introduction	30
3-1 Matériaux utilisés	30
3-2 Cas de l'acier 30NC11	31
3-2-1 Eprouvettes à l'état recuit	31
3-2-1-1 Eprouvettes lisses à l'état recuit	31
3-2-1-2 Eprouvette entaillée à l'état recuit avec $\rho=0,5\text{mm}$	32
3-2-1-3 Eprouvette entaillées l'état recuit avec $\rho=0,1$	34

Sommaire

3-2-2 Eprouvettes avec traitement thermique	34
3-2-2-1 Eprouvettes lisses avec trempe-revenu	35
3-2-2-2 Eprouvette entaillées avec trempe-revenu avec $\rho=0,5$	35
3-2-2-3 Eprouvette entaillées avec trempe-revenu avec $\rho=0,1$	37
3-2-3 Etude comparative pour l'acier 30NC11	38
3-2-3-1 Effet d'entaille pour l'état recuit	38
3-2-3-2 Effet d'entaille avec trempe revenu	39
3-2-3-3 Effet du traitement thermique pour éprouvettes lisses	40
3-2-3-4 Effet du traitement thermique sous entaille $\rho=0,5$ mm	40
3-2-3-5 Effet du traitement thermique sous entaille avec $\rho=0,1$ mm	41
3-2-4 Dépouillement des résultats pour l'acier 30NC11	41
3-2-4-1 Paramètres caractéristiques	41
3-3 Cas de l'acier 16NC6	43
3-3-1 Eprouvettes à l'état recuit	43
3-3-1-1 Eprouvettes lisses à l'état recuit	43
3-3-1-2 Eprouvette entaillées l'état recuit avec $\rho=0,5$ mm	44
3-3-2 Eprouvettes avec trempe-revenu	45
3-3-2-1 Eprouvettes lisses avec trempe-revenu	45
3-3-2-2 Eprouvette entaillée ($\rho=0,5$ mm) avec trempe-revenu	46
3-3-3 Etude comparative pour l'acier 16NC6	47
3-3-3-1 Effet d'entaille pour l'état recuit	47
3-3-3-2 Effet d'entaille avec trempe-revenu	48
3-3-3-3 Effet du traitement thermique pour éprouvettes lisses	48
3-3-3-4 Effet du traitement thermique sous entaille	49
3-3-4 Dépouillement des résultats pour l'acier 16NC6	49
Conclusion	50
Chapitre 4 Endommagement sous chargements constant et variable sous entailles	51
Introduction	51
4-1 Contrainte de rupture sur éprouvettes lisses	51
4-2 Contrainte de rupture sur éprouvettes entaillées	51
4-3 Endommagement sous entailles à un niveau de contrainte avec $\sigma=162$ MPa	52
4-4 Endommagement sur éprouvettes entaillées $\rho=0,5$ mm à deux niveau de charge croissants	54
4-5 Endommagement sur éprouvettes entaillées $\rho=0,5$ mm à deux niveau de charge décroissants	56
Conclusion	58
Conclusion générale	59
Références bibliographiques	61

Introduction générale

Le terme fatigue est utilisé pour exprimer le processus d'endommagement dans le cas de sollicitations cycliques sur des organes de machines. Ce processus d'endommagement peut mener à la rupture puis la ruine de la pièce.

Historiquement, le phénomène de fatigue a intéressé les ingénieurs depuis la révolution industrielle. La cadence de fabrication de machines (grande probabilité de présence défauts) subissant des chargements cycliques de plus en plus sévères (particulièrement dans les chemins de fer) est devenue très importante.

Durant cette époque, des pièces soumises à des contraintes globales cycliques calculées par la théorie de l'élasticité ou la résistance des matériaux se sont rompues brutalement.

Des chercheurs ont commencé à prendre en compte l'effet de ce type de chargement vers la moitié du 19^e siècle. Un grave accident de chemin de fer, relaté vers 1842 provoqua plusieurs pertes en vies humaines près de Versailles en France, accident lié à une rupture par fatigue d'un axe au niveau de la locomotive. Rankine a été un pionnier dans l'étude des problèmes liés aux ruptures par fatigue. Il a pu, de par son poste en tant qu'ingénieur au niveau de la British Railways, relever les problèmes liés aux concentrations de contraintes et de leurs conséquences.

Whöler a mis au point un montage permettant de réaliser un chargement cyclique en flexion, torsion et axiale en échelle réelle pour le compte des chemins de fer prussiens vers 1860. Grâce à ces essais, il a pu mettre en évidence que la rupture par chargement cyclique est provoquée par une contrainte globale bien en deçà de la résistance à la traction.

La courbe de Whöler tracée dans le plan contrainte-nombre de cycles à rupture est devenue un outil incontournable pour mener une étude sur le phénomène de fatigue.

A partir de cette courbe, une contrainte est déduite pour laquelle l'organe de machine peut fonctionner " indéfiniment ". Whöler a donné à cette contrainte l'appellation de contrainte de service. Pour Baushinger cette contrainte est la limite élastique naturelle. Elle est généralement appelée limite de fatigue.

Le phénomène de fatigue peut englober différents facteurs. L'association de différentes sollicitations au chargement cyclique caractérise un certain processus d'endommagement. Lorsqu'une forte température est associée au chargement cyclique, on parle de fatigue thermomécanique. Lorsque la sollicitation cyclique se produit dans un milieu agressif, on parle de fatigue sous corrosion.

Les caractéristiques géométriques et métallurgiques interviennent aussi dans le processus d'endommagement. Au niveau des trous et des entailles, des localisations de déformation se forment.

La mécanique d'entaille et la fatigue sous entaille interviennent lorsque l'acuité du défaut n'est pas nulle. Les entailles peuvent provenir d'opérations d'usinage, d'accidents lors de manutention d pipeline ou peuvent simuler des nodules de graphites *Chapetti 2007*

Dans cette étude, une attention particulière est menée sur la fatigue sous entaille. Certaines pièces entaillées ont subi différents traitements thermiques ou un endommagement partiel que nous avons choisi de quantifier par des essais de traction.

Les recherches en fatigue sous entaille s'intéressent particulièrement au facteur de sensibilité à l'entaille. Certains modèles prennent en compte l'aspect géométrique, le chargement et les caractéristiques du matériau tel que *Neuber 1974* et *Peterson 1959* qui sont des modèles à un paramètre. Le modèle de *Heywood 1952* est analogue aux précédents mais utilise deux paramètres. D'autres incluent le matériau et le gradient de contrainte *Brand 1980* D'autres modèles prennent en compte le phénomène local d'endommagement *Boukharouba et al. 1995* *Qylafku et al. 1999*, Taylor 1999, *Meneghetti 2007*

Plusieurs paramètres en fatigue sous entaille, influent sur l'endurance. Les travaux de *Ding 2007* mettent en évidence l'influence du rapport de charge.

Dans cette étude, les essais de fatigue ont été menés sur une machine de fatigue en flexion rotative, soit pour un rapport de charge égal à -1.

Dans le premier chapitre, une recherche bibliographique est présentée regroupant les résultats fondamentaux en fatigue sous entaille.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différents moyens d'essais en fatigue. Nous détaillons l'essai de flexion rotative retenu et les moyens de réalisation des éprouvettes associées à cet essai réalisés au laboratoire de génie mécanique et développement.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats de fatigue sous entaille en utilisant différents types de traitements thermiques réalisés au laboratoire de traitement thermique. Les résultats concernent particulièrement les facteurs de sensibilité à l'entaille q_i et les paramètres du modèle de *Heywood 1952*.

Les essais à endommagement partiel menés sur des éprouvettes lisses et entaillées sont présentés au chapitre quatre. La perte de résistance en traction a été choisie pour quantifier l'endommagement. Les résultats sont présentés et discutés.

Nous terminons cette étude par une conclusion générale regroupant les principaux résultats.

Chapitre 1
Présentation de
quelques facteurs
d'influence sur
l'endurance

Introduction

De nombreux organes de machines sont soumis à des chargements cycliques. Certains éléments de machines sont soumis, par exemple, à des contraintes de traction et de compression cycliques que l'on rencontre notamment sur des éléments en rotation. C'est ce que l'on appelle une sollicitation en flexion rotative. Ces sollicitations cycliques endommagent le matériau. Les pièces, sont alors rompues à des contraintes bien inférieures à la limite élastique du matériau. On dit que la pièce a été rompue par fatigue. Il est admis donc que la fatigue est le processus d'altération des propriétés du matériau provoquant la rupture prématurée de la pièce.

Le chargement cyclique avec amplitude constante peut être représenté ci-dessous par les figures 1-1-a et 1-1-b

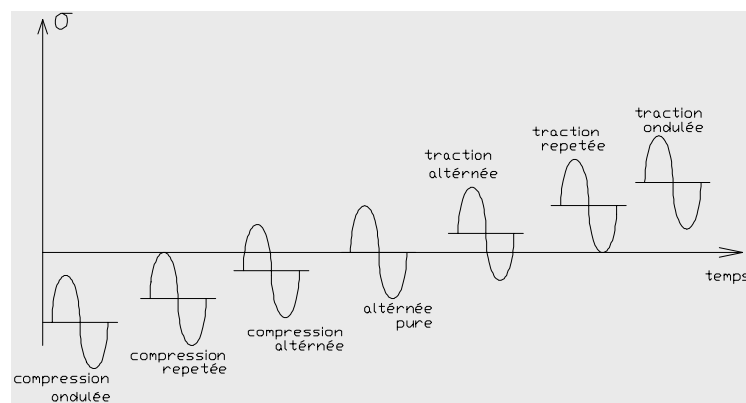


Figure 1-1-a

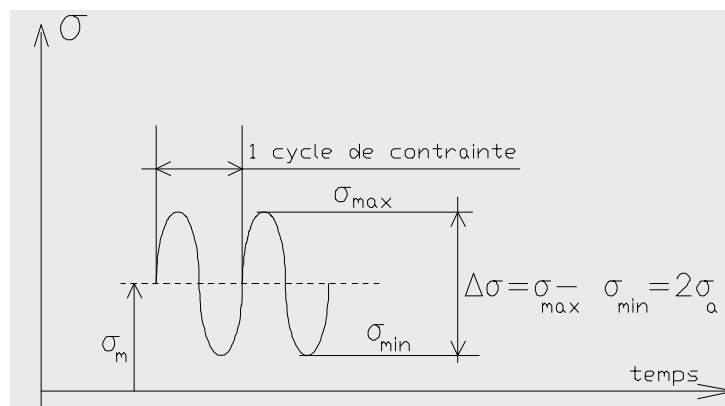


Figure 1-1-b

Figures-1-1 a et b : Différents types de cycles et paramètres de chargements

Pour le cas de la sollicitation de la figure 1-1-b, il est défini les paramètres suivants

σ_{\max} : contrainte maximale

σ_{\min} : contrainte minimale

σ_a : amplitude de contrainte $= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$

σ_m : contrainte moyenne $= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$

$$R_{\sigma} = \text{rapport de charge ou de contrainte} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad 1-1$$

Ces paramètres interviennent pour tracer les courbes d'endurance définies ci-dessus et seront traités dans la partie expérimentale.

Les caractéristiques des matériaux, pour la plupart ne sont pas des grandeurs intrinsèques. Le problème pour la formulation ou le choix de modèles de comportement macroscopiques, en tenant compte de ces propriétés, présente des difficultés.

L'ingénieur est tenu, dans des situations de service, de donner une réponse aux problèmes auxquels il est confronté. Les modèles empiriques et phénoménologiques dans la littérature aident à la décision.

Si nous faisons un inventaire assez succinct de ces modèles dans le cas d'organes de machines soumis à des chargements cycliques, nous pouvons relever plusieurs facteurs ou paramètres qui influencent la tenue en fatigue. Parmi ces facteurs ou effets citons:

- entailles
- caractéristiques du matériau et traitements thermiques
- corrosion et fatigue sous corrosion
- types de chargement etc...

1-1-1. Entaille et effet d'entaille

La plupart des ruptures en fatigue sont initialisées à partir d'entailles, trous et d'autres facteurs provoquant des concentrations de contraintes.

Le phénomène de concentration de contrainte a été mis en évidence par Rankine.

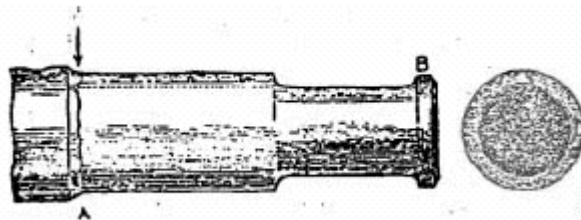


Figure 1-2 Axe de chemin de fer rompu par fatigue- d' après Glynn (1844)

Pour quantifier le taux de concentration de contrainte, un facteur dit K_t de concentration de contrainte en statique et en élasticité est défini. Deux définitions peuvent être données au facteur de concentration de contrainte. L'une utilise la contrainte globale σ_g . La deuxième la contrainte nominale σ_{nom} . Dans notre cas nous adoptons la contrainte globale.

Avec les notations de la figure 1-3, la contrainte locale σ_l est donnée par Inglis (1910) [cité par *Barthelemy 1980* par l'équation suivante

$$\sigma_l = \sigma_g \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) = \sigma_g \left(1 + \frac{2a}{b} \right) \quad 1-2$$

où a représente la demi longueur de l'entaille et ρ le rayon en fond d'entaille.

Le facteur de concentration de contrainte est défini par

$$K_t = \frac{\sigma_l}{\sigma_g} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_g} = 1 + \frac{2a}{b} \quad 1-3$$

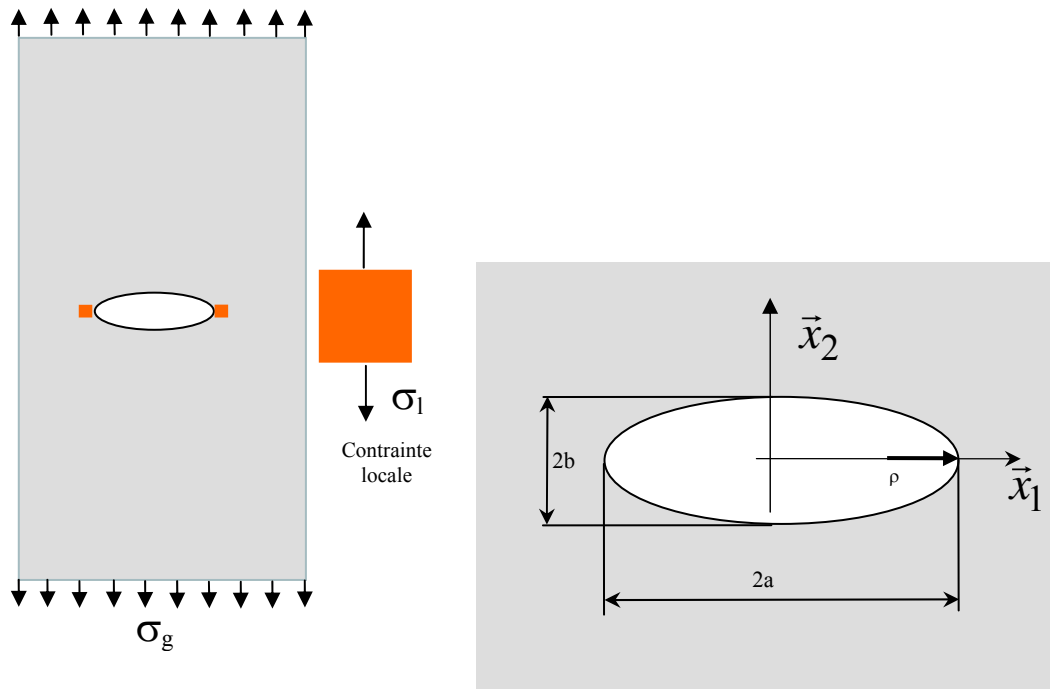


Figure 1-3 : Plaque avec entaille centrale en traction

1-1-2 Passage à la fissure - Facteurs d'intensité de contrainte K_I

Le cas extrême pour l'entaille traitée au paragraphe précédent correspond au cas où b tend vers zéro. Ce cas correspond à une entaille aplatie et sera traitée comme une fissure. Au voisinage de la tête de la fissure, le champ de contrainte est singulier. Le facteur d'intensité de contrainte K_I est le paramètre qui prend en compte cette configuration et formulé par Irwin (cité par *Lemaitre et al.1996*) pour une plaque supposée infinie par l'équation 1-4

$$K_I = \lim_{b \rightarrow 0} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sigma_l \sqrt{\rho} = \lim_{b \rightarrow 0} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(1 + 2 \frac{a}{b}\right) \sigma_g \sqrt{\frac{b^2}{a}} \quad 1-4$$

$$K_I = \sigma_g \sqrt{\pi a}$$

Un facteur de forme k est introduit pour le cas d'une plaque de dimension finie.

Le facteur d'intensité de contrainte dépend donc de la géométrie et du chargement appliqué.

Le cas extrême de la figure 1-3 pour $b \longrightarrow 0$ correspond au mode d'ouverture ou mode I de rupture.

En mécanique de la rupture, les sollicitations extérieures sont décomposées en trois sollicitations fondamentales et sont définies par rapport au plan et de la tête ou front de la fissure pour définir les trois modes de rupture :

- La sollicitation est perpendiculaire au plan de la fissure. C'est le mode de traction ou d'ouverture appelé mode I,
- La sollicitation est dans le plan de la fissure et perpendiculaire au front de la fissure. C'est le mode de cisaillement plan appelé mode II,
- La sollicitation est parallèle au plan et au front de la fissure. C'est le mode de cisaillement de torsion ou mode III.

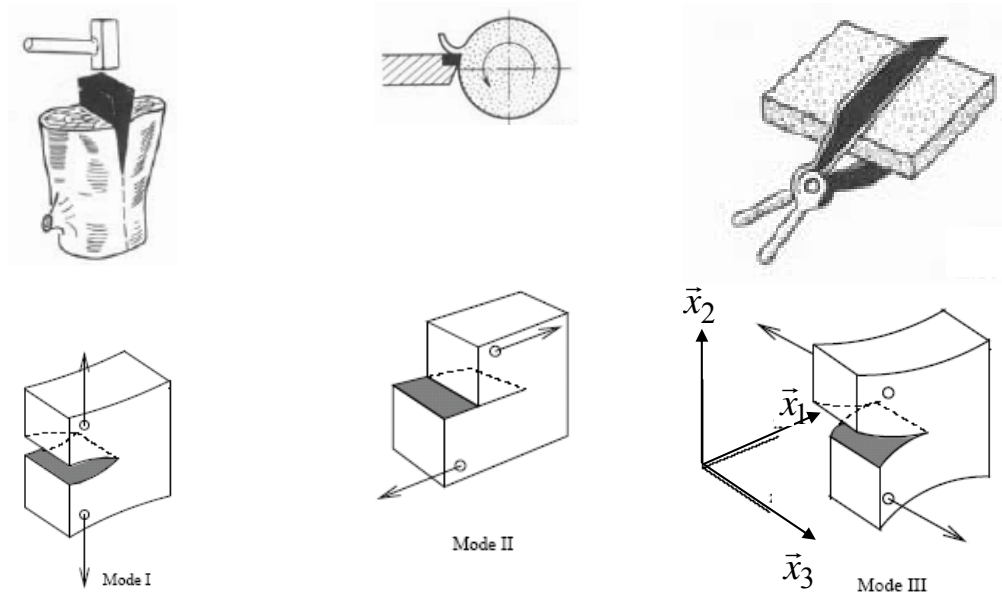


Figure 1-4 : Les trois modes fondamentaux de rupture

Le champ de contrainte est singulier en fond de fissure. La solution est due à Irwin. Le champ de contrainte au voisinage du front de fissure est donné par :

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) \quad 1-5$$

Dans notre étude, le rayon de fond de fissure ne peut être nul. Nous travaillerons dans le cadre de la rupture sous entaille adoptée dans les travaux de *Pluvinage 1998,2003*.

1-1-3 Le défaut entaille

Parmi les défauts géométriques rencontrés sur les organes de machines, les géométries en forme d'entaille constituent un facteur de concentration de contrainte où s'élabore le processus d'endommagement. Une discipline se dégage que l'on peut classer par mécanique de rupture sous entailles. Avec des sollicitations cycliques appliquées sur les organes de machines ou les éprouvettes en laboratoire à amplitude constante ou variable, le matériau se rompt par fissuration progressive.

Les résultats des essais peuvent être présentés sur une courbe dans le plan (nombre de cycle à rupture, amplitude de contrainte) appelée courbe d'endurance ou courbe de Wohler (in *Bathias et al. 1980*).

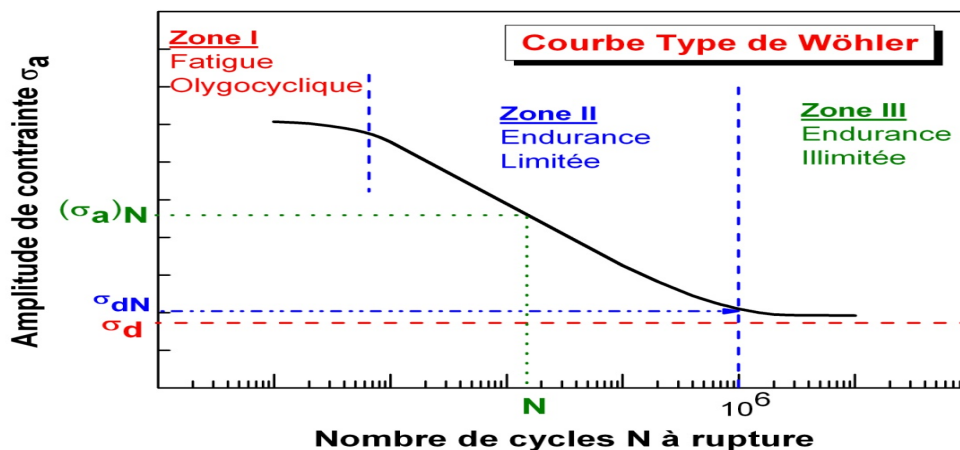


Figure 1-5 Courbe type de Wohler

Sur la courbe 1-5, nous pouvons distinguer trois zones :

Zone I : zone de fatigue oligocyclique ou de déformation plastique, zone de fortes charges provoquant la rupture après un faible nombre de cycles.

Zone II : zone d'endurance limitée ou de fatigue. Le comportement peut être supposé élastique linéaire. La courbe est linéaire et décroissante.

Zone III : zone d'endurance illimitée. Pour les aciers, la courbe admet une asymptote permettant de définir une limite de fatigue σ_d en dessous de laquelle, la pièce est supposée « vivre indéfiniment »

Dans la pratique, une limite de fatigue conventionnelle, appelée limite d'endurance est obtenue par troncature sur le nombre de cycle à rupture N , soit σ_{dN} .

1-1-3-1 Facteur de concentration de contrainte en fatigue K_f

Dans le cas de chargements statique, la contrainte en fond d'entaille est majorée par le facteur de concentration de contrainte K_t . Pour les chargements cycliques, il se produit un écoulement plastique en fond d'entaille. L'expérience montre que la limite de fatigue d'éprouvettes entaillée est réduite par un facteur K_f , par rapport à une éprouvette lisse, soit :

$$K_f = \frac{\sigma_{dN}}{\hat{\sigma}_{dN}} \quad 1-6$$

Où

σ_{dN} est la limite d'endurance pour une éprouvette lisse et

$\hat{\sigma}_{dN}$ est la limite d'endurance pour une éprouvette entaillée.

En général K_f est inférieur ou à la limite égal à K_t .

1-1-3-2 Facteur de sensibilité à l'entaille q_i - différents modèles

La limite d'endurance diminue lorsque le facteur de concentration de contrainte augmente. Plus la limite élastique est élevée, plus cette diminution est plus forte. Ce phénomène a été

traduit par un coefficient appelé facteur de sensibilité à l'entaille par **Thum et al.1950** et s'exprime par

$$q_1 = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \tag{1-7}$$

Ce premier modèle a été modifié par **Yen 1952** pour une meilleure corrélation des courbes $q=f(\rho)$ comme on peut le remarquer sur les courbes 1-6 (sur ces courbes r représente ρ dans notre texte) en proposant

$$q_2 = \frac{K_f}{K_t} \tag{1-8}$$

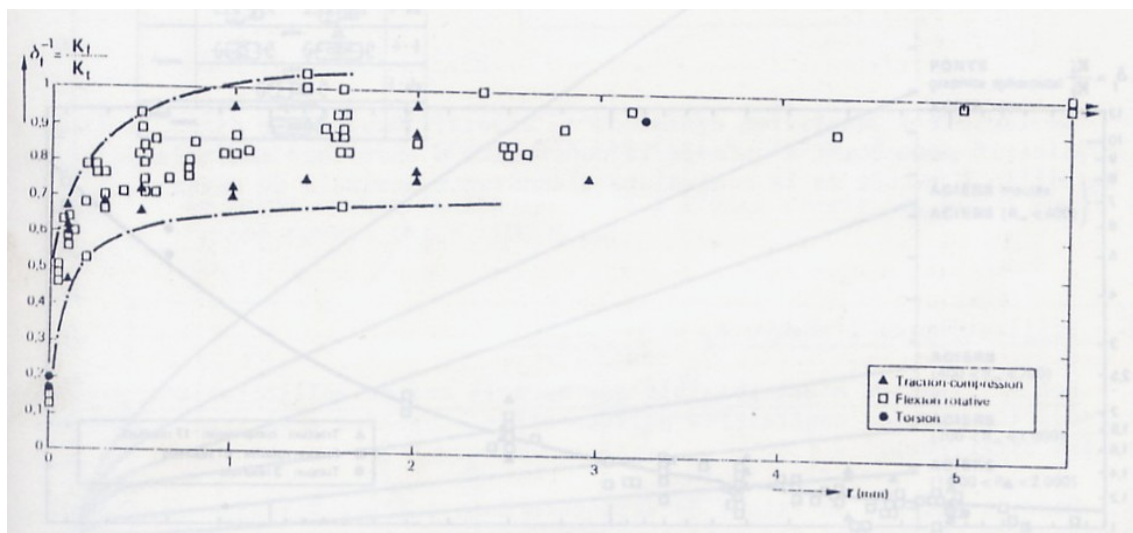
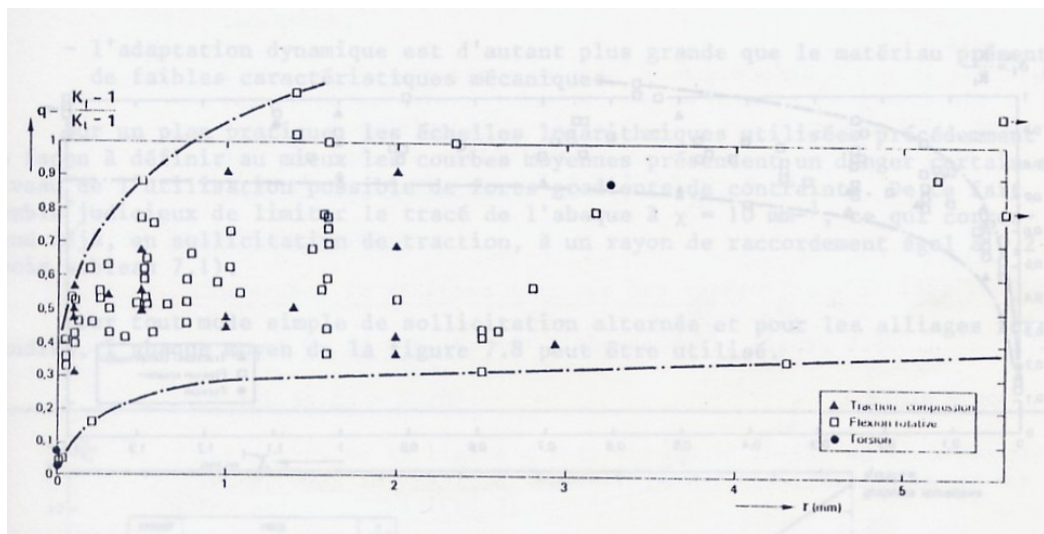


Figure 1-6 : Influence du rayon du fond d'entaille sur le facteur de sensibilité q **Brand 1989**

Comme nous pouvons le remarquer, les deux facteurs définis plus haut n'intègrent pas les propriétés mécaniques du matériau.

Les premiers modèles empiriques faisant intervenir les caractéristiques mécaniques sont dues à **Peterson 1959, Neuber 1974 et Heywood 1952**.

Le modèle de **Peterson 1959** est exprimé par :

$$q_p = \frac{1}{1 + \frac{a_p}{\rho}} \quad 1-9$$

Le modèle de **Neuber 1974** donne

$$q_n = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{a_n}{\rho}}} \quad 1-10$$

Dans le modèle de **Peterson 1959**, a_p est une caractéristique du matériau et fonction de la résistance ultime σ_u et donnée par

$$a_p(mm) = \left(\frac{270}{\sigma_u(MPa)} \right)^{1,8} \quad 1-11$$

La relation valable dans le cas de la flexion, et en traction compression alors que la relation donnée par l'équation 1-11 est valable pour une sollicitation de torsion

$$a_p(mm) = 0,6 \left(\frac{270}{\sigma_u(MPa)} \right)^{1,8} \quad 1-12$$

Le paramètre a_n , caractéristique du matériau est fonction aussi de la résistance ultime du matériau. Il est donné par la courbe représentée sur la figure 1-5 ci-dessous dans le cas d'un alliage d'aluminium.

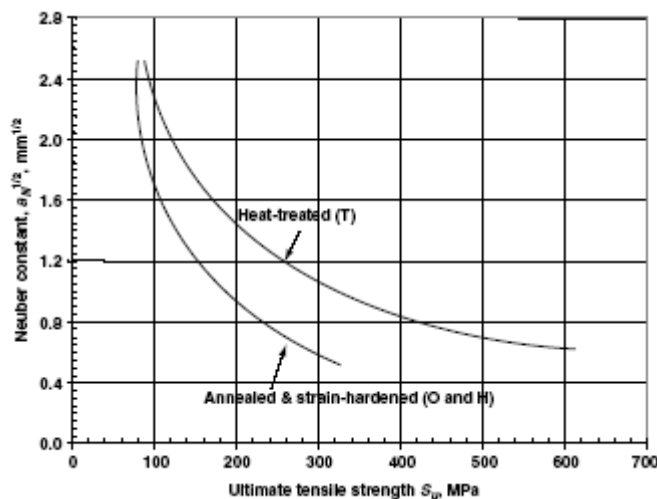


Figure 1-7 : Constante de Neuber a_n en fonction de la résistance ultime pour un alliage d'aluminium, Y.Li Lee et al 2005

Le modèle donnant le facteur de sensibilité à l'entaille q_{2H} de Heywood utilise deux paramètres exprimé par :

$$q_{2H} = \frac{1}{1 + \frac{a}{(b\rho)^{0,5}}}$$

Le paramètre a est une constante dépendant du matériau

Le paramètre b est une constante adimensionnelle dépendant de la géométrie et de la sollicitation. Pour les aciers au carbone on relève $a=0,328\text{mm}^{0,5}$ et $b=0,26$ dans le cas d'une entaille en V en flexion pure. Ce modèle est adopté dans notre étude.

Une nouvelle définition, utilisant le champ de contrainte au voisinage du fond d'entaille est due à *Boukharouba et al* et *Qylafku et al 1999*

$$q_{BP} = \frac{\sigma_l}{\sigma_{\max}(r, \Psi)} \quad 1-13$$

où: σ_l est contrainte locale, elle correspond à la limite élastique.

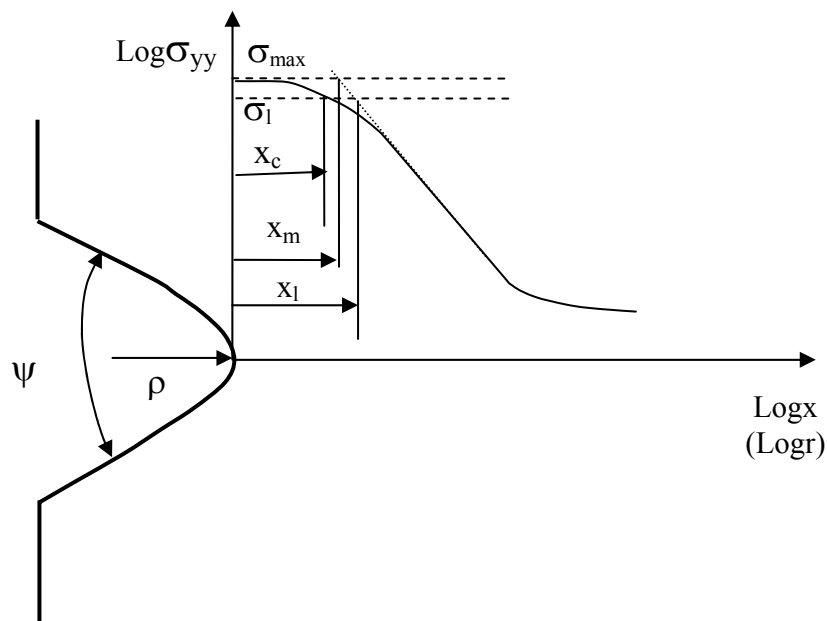


Figure 1-8: Distribution des contraintes à fond d'entaille

$\sigma_{\max}(\rho, \Psi)$: valeur maximale du champ de contrainte déterminé numériquement.

Comme le montre la figure 1-8, le champ de contrainte pour un rayon non nul peut être divisé en trois zones. Dans la première, la contrainte est sensiblement constante sur une distance X_c appelée « distance caractéristique ». X_c correspond à la zone plastique cyclique où s'élabore le phénomène de fatigue. Elle est donnée par la relation suivante:

$$X_c = \frac{1}{8\pi} \left(\frac{K(\rho, \Psi)}{\sigma_e} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad 1-14$$

où; α : exposant dépendant de la géométrie de l'entaille et du matériau.

$K_{(\rho, \Psi)}$ est le facteur d'intensité de contrainte d'entaille. Ce facteur est analogue au facteur d'intensité de contrainte de contrainte K_I défini pour une entaille à rayon nulle et définie plus haut.

Dans la deuxième zone, la distribution est linéaire et elle est décrite par la relation suivante correspondant à un rayon nul ($\rho=0$):

$$\sigma_{yy}(\rho=0, \psi) = \frac{K(\rho=0, \psi)}{\sqrt{2\pi}(r)^\alpha} \quad 1-15$$

Dans la troisième zone la contrainte rejoint rapidement la contrainte globale.

Pour reformuler la relation donnant la définition du facteur de sensibilité à l'entaille, le modèle proposé par les auteurs fait correspondre les points σ_l et $\sigma_{\max}(\rho, \Psi)$ du champ de contrainte du rayon non nul à des points de la courbe linéaire du rayon nul d'abscisses X_l et X_m , soit :

$$\sigma_l = \frac{K(\rho=0, \psi)}{\sqrt{2\pi}(X_l)^\alpha} \quad 1-16$$

$$\sigma_{\max} = \frac{K(\rho=0, \psi)}{\sqrt{2\pi}(X_m)^\alpha} \quad 1-17$$

Le facteur de sensibilité ainsi proposé devient :

$$q_{BP} = \frac{\sigma_l}{\sigma_{\max}} = \left(\frac{X_m}{X_l} \right)^\alpha \quad 1-18$$

Ce modèle a été exploité avec une simulation par éléments finis *Mecheri 1996* sur des éprouvettes entaillées permettant d'avoir un gain sur les essais à réaliser.

La figure 1-9-a montre une entaille à facteur d'intensité de contrainte plus faible que celui de la figure 1-9-b, d'où un gradient de contrainte plus faible. Néanmoins, on peut noter que la zone d'élaboration du processus d'endommagement est plus étendue.

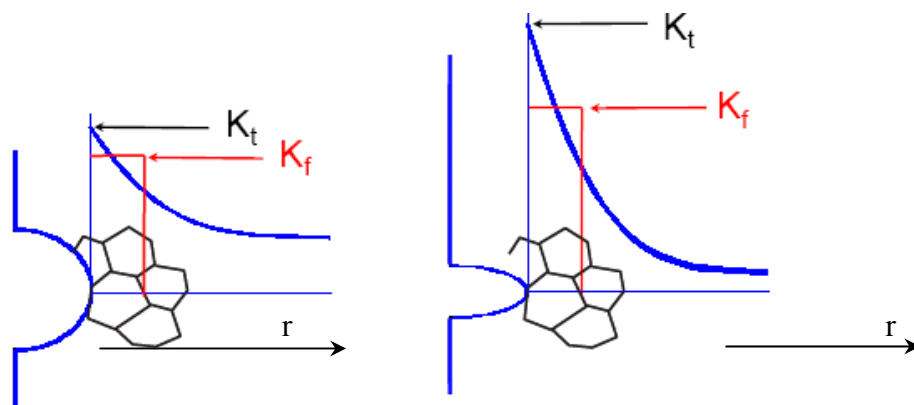


Figure 1-9-a: K_t faible

Figure 1-9-b: K_t grand

Figure 1-9 : Types de gradients de contraintes
d'après Darrell F.Socie 2002

Parmi les modèles du facteur de sensibilité à l'entaille utilisant le gradient de contraintes, nous pouvons citer celui de *Buch 1974* et *Switech 1967*.

Dans ce modèle, une fissure de fatigue apparaît lorsque la contrainte maximale à fond d'entaille dépasse une valeur critique σ_I sur épaisseur critique h . Le gradient de contrainte est défini par

$$\frac{d\sigma}{dr} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_I}{h}$$

La formule théorique de concentration de contrainte donne

$$\frac{d\sigma}{dr} = C \frac{\sigma_{\max}}{\rho + X_0}$$

C est un facteur de proportionnalité donnée par la théorie de l'élasticité et fonction des différents types de sollicitation.

X_0 est un paramètre géométrique "de valeur très petite" introduit pour éviter la singularité du

champ de contrainte, ce qui permet de proposer le facteur de sensibilité à l'entaille dans le modèle de **Buch 1974** et **Switeck 1967** sous la forme:

$$q_{BS} = 1 - \frac{h}{\rho + X_0} C \tag{1-19}$$

Ces auteurs adoptent une hypothèse supplémentaire concernant la contrainte locale et la limite d'endurance permettant de poser la relation suivante

$$\sigma_g = H \sigma_d \tag{1-20}$$

Avec $\sigma_g = \hat{\sigma}_{dN}$ et $\sigma_d = \sigma_I$

et déduire le facteur de sensibilité à l'entaille sous la forme

$$q_{BS} = \frac{1 - \frac{h}{\rho + X_0} C}{H} \tag{1-21}$$

Terminons cet inventaire de modèle par celui de **Brand 1980**, basé aussi sur le gradient de contrainte défini par

$$\chi = r \lim_{0} = \frac{1}{\sigma_{\max}} \frac{d\sigma}{dr} \tag{1-22}$$

σ_{\max} représente la contrainte en fond d'entaille. Le modèle proposé après l'analyse d'un grand nombre de données de fatigue sous entailles est donné par

$$\hat{\sigma}_{dN} = a \log \chi + b \tag{1-23}$$

a et b sont des constantes du matériau.

1-1-4 Courbe d'endurance sous entaille

Dans la suite du travail, nous aurons à tracer des courbes d'endurance sous entaille. Nous terminons cette recherche bibliographique en présentant une courbe d'endurance pour des éprouvettes lisses et entaillées. En général, l'effet des concentrations de contraintes n'est pas prépondérant pour les faibles nombres cycles comme le présente la figure 1-10. Les essais que nous aurons à réaliser seront donc menés à partir de dizaines de milliers de cycles

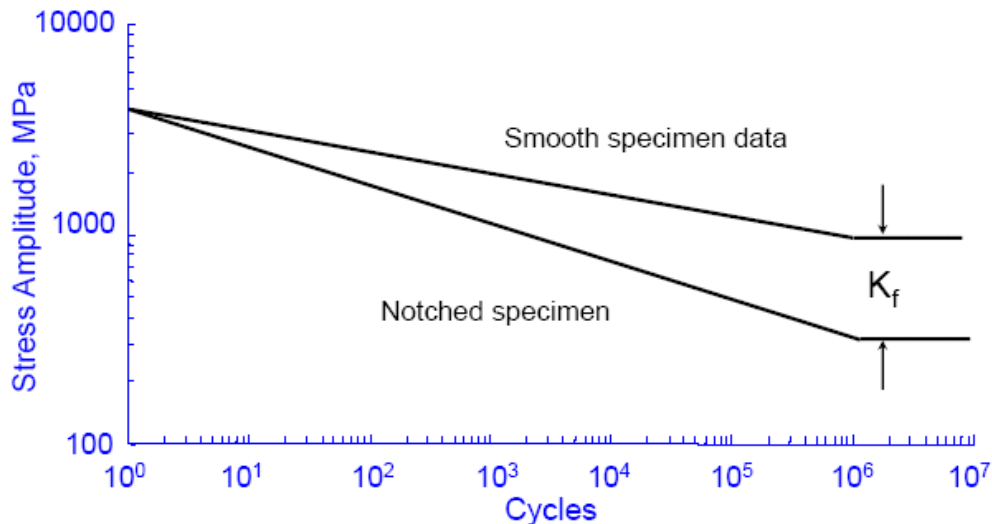


Figure 1-10 : Courbes d'endurance d'après *Darrell F.Socie 2002*.

1-2 Influence des traitements thermiques et autres

La majorité des pièces mécaniques subissent des traitements thermiques.

La limite de fatigue est liée à la contrainte de rupture, donc toute modification dans la composition métallurgique, agit sur cette grandeur. Certains éléments d'addition tels que chrome, molybdène, vanadium etc... augmentent la contrainte de rupture.

Pour l'acier extra-doux, la limite d'endurance est voisine de la limite élastique *Cazaud 1969*. A l'état recuit, la limite d'endurance augmente avec la teneur en carbone mais moins rapidement que la contrainte de rupture en traction de sorte que le rapport d'endurance est plus petit pour les aciers durs que pour les aciers doux.

Pour les aciers à l'état trempé-revenu, la tenue en fatigue mesurée sur des éprouvettes lisse est sensiblement proportionnelle à la limite de rupture. Cette proportionnalité est valable jusqu'à 1200 daN/mm² *Cazaud 1969*. Pour les éprouvettes entaillées, on note une augmentation du facteur de sensibilité à l'entaille q avec la résistance à la traction pour des structures martensitiques trempé-revenu. Certains traitements thermiques rentrent dans le cadre de ce travail et concernent des éprouvettes entaillées de différents rayons d'entaille.

1-3 Effet de l'histoire de chargement et Endommagement

Les essais cycliques provoquent une dégradation du matériau définie aussi par l'endommagement. L'accès à la quantification de l'endommagement peut être réalisé avec plusieurs moyens. De plus, le processus d'accumulation de l'endommagement pendant l'histoire du chargement peut être réalisée avec plusieurs modèles ou lois de cumul de dommage. Le modèle linéaire de Palmgren-Miner (cité par *Lemaitre 1996*) datant de 1945 offre le meilleur compromis entre la simplicité et la qualité des résultats. Le modèle linéaire est défini par :

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad 1-24$$

où n_i est le nombre de cycles imposé sous une contrainte donnée σ_i et N_i le nombre de cycle entraînant la rupture pour le niveau de contrainte considéré. Le cumul des cycles génère un cumul du dommage. Le processus se termine par la ruine de la structure pour $D_c=1$

$$D_c = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad 1-25$$

D_c représente le dommage critique

Ce modèle suppose que si une certaine fraction $\frac{n_1}{N_1} = \beta$ de la durée de vie est accomplie à un certain niveau d'amplitude de la contrainte σ_1 , l'endurance restante $\frac{n_2}{N_2}$ à un autre niveau σ_2 est (Figure 1-11) :

$$\frac{n_2}{N_2} = 1 - \beta \quad 1-26$$

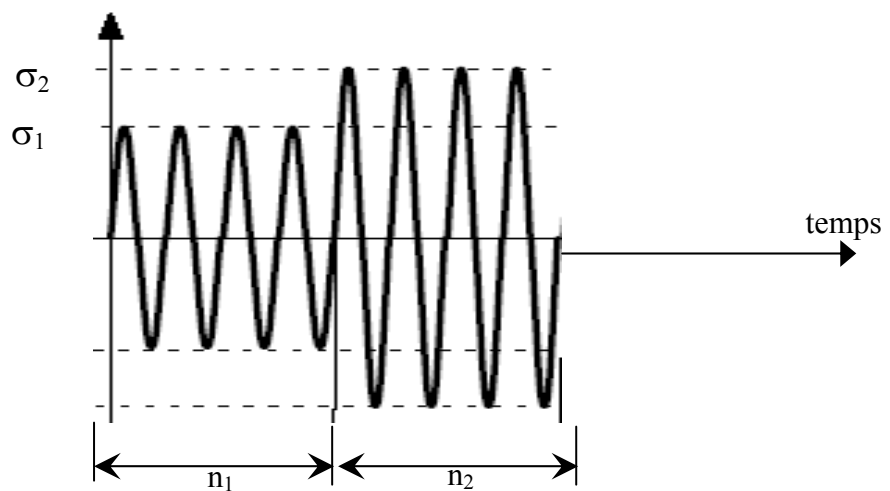


Figure 1-11 Chargement à deux niveaux de contrainte

Ce modèle ne distingue pas, néanmoins, l'ordre des niveaux de contrainte. Ceci se répercute sur une surestimation de l'endommagement dans le cas d'un ordre croissant des niveaux de contrainte.

1-4 Autres facteurs d'influence

La fatigue est un phénomène très complexe qui dépend de nombreux paramètres. Certains de ces paramètres, rentrant dans le cadre de cette étude, ont été donnés ci-dessus. D'autres facteurs, tels que l'état de surface, l'effet de l'environnement, pondèrent la limite d'endurance et aboutissant à la définition de certains facteurs de correction dans le calcul de la limite d'endurance.

1-4-1 Facteurs mécaniques

L'acier travaillé à froid (étirage, laminage, etc...) subit un écrouissage provoquant une augmentation sensible de la charge de rupture qui est liée à la limite de fatigue. Selon **Cazaud 1969**, on obtient avec une barre de diamètre 23,5 mm étirée à 20,0 mm une limite de fatigue de 290 MPa, alors qu'une barre de même diamètre (20,0 mm) recuite a une limite de fatigue de 230 MPa.

1-4-2 Effet d'échelle

Les défauts de microstructure et de surface influencent fortement la durée de vie en fatigue. La probabilité de trouver de tels défauts dans une éprouvette augmente avec la taille de celle-ci (plus grand volume et plus grande surface). Donc, la dispersion des résultats en fatigue est expliquée par les dimensions des échantillons. Il est noté, qu'à contrainte nominale égale, la résistance à la fatigue diminue avec l'augmentation des dimensions.

On définit un facteur d'échelle K_e comme étant le rapport de la limite d'endurance d'une éprouvette de dimension donnée σ_{dN} à la limite d'endurance σ_{dNo} d'une éprouvette de référence.

$$K_e = \frac{\sigma_{dN}}{\sigma_{dNo}} \quad 1-27$$

On trouve dans la littérature, plusieurs lois empiriques prenant en compte le gradient de contrainte et les dimensions. Néanmoins, les caractéristiques du matériau ne sont pas prises en compte.

On peut citer les travaux de Endo (cité par **Brand 1989**) et al sur les éprouvettes en aciers alliés et au carbone, sollicitées en flexion rotative.

Pour l'acier allié Ni Cr Mo avec une limite d'endurance de référence $\sigma_{do} = 37 \text{ daN/mm}^2$, l'expression de σ_d est donnée par :

$$\sigma_d = \frac{61,9}{1+0,304d^{0,11}} \quad 1-28$$

Pour l'acier au carbone (0,22% C) avec une limite d'endurance de référence $\sigma_{do} = 27,5 \text{ daN/mm}^2$, l'expression de σ_d est donnée par:

$$\sigma_d = \frac{34,3}{1+0,140d^{0,24}} \quad 1-29$$

Pour l'acier au carbone (0,44% C) avec une limite d'endurance de référence $\sigma_{do} = 25 \text{ daN/mm}^2$, l'expression de σ_d est donnée par:

$$\sigma_d = \frac{33,9}{1+0,270d^{0,22}} \quad 1-30$$

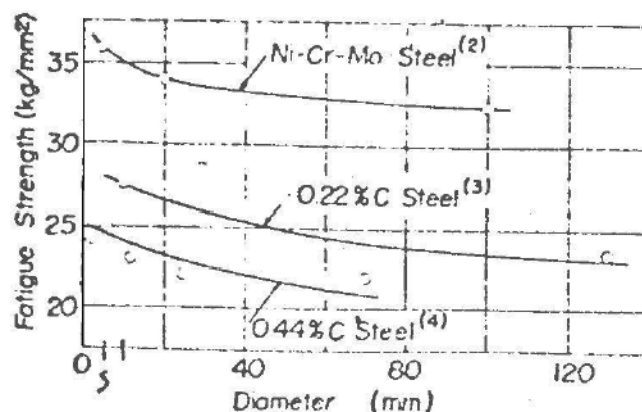


Figure 1-12 : Effets d'échelles sur l'endurance en flexion rotative, **Brand 1989**

Dans le cas de la torsion, Endo et al proposent l'expression suivante :

$$\tau_d = \frac{17,2}{1 + 0,070d^{0,24}} \quad 1-31$$

relation valable pour un acier au carbone (0,22 % C) avec une limite d'endurance de référence $\tau_{do} = 15 \text{ daN/mm}^2$

On remarque une faible influence des dimensions sur la tenue en fatigue en torsion comme il est montré sur la figure contrairement au cas de la flexion.

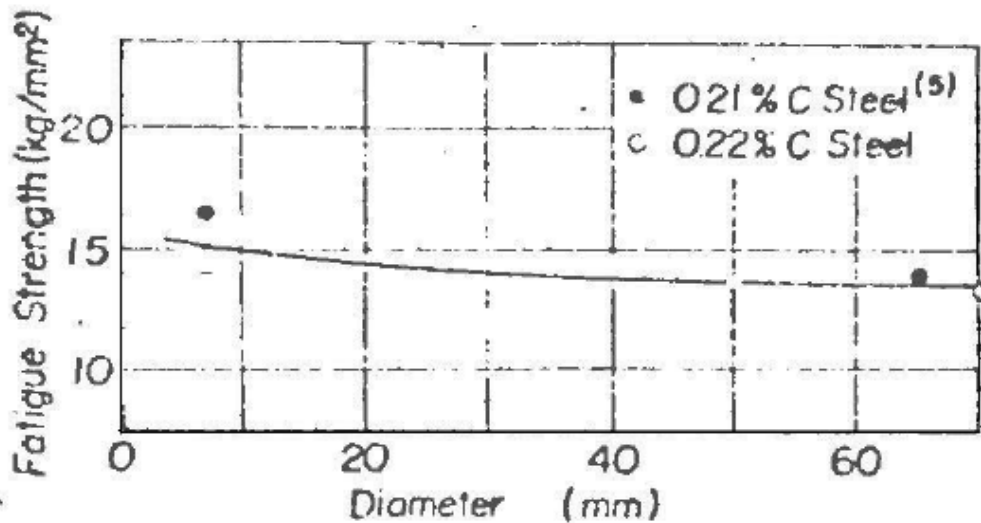


Figure 1-13 : Effet d'échelle sur l'endurance en torsion, (Brand 1989)

Il est à signaler que le gradient de contrainte joue un rôle significatif dans l'effet d'échelle. Donc les pièces entaillées sollicitées en traction-compression ou en flexion sont les plus sensibles à cet effet.

1-4-3 Effet de l'état de surface

L'état de surface est particulièrement lié au mode d'usinage dont l'effet sur la durée de vie n'est pas négligeable. Cet effet, comparable à l'effet d'entaille, peut être quantifié sur le tracé des courbes de Wohler et représenté sur la figure N° 1-14 ci-dessous, **Dorlot et Bailon 2000**.

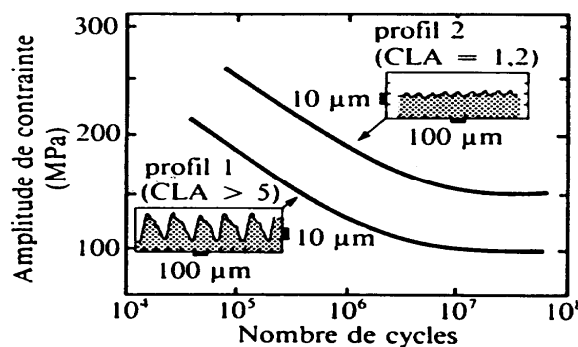


Figure 1-14 Influence de la rugosité sur la limite d'endurance, *Dorlot et Bailon 2000*

L'état de surface est quantifié par sa rugosité R_t : une surface rugueuse présente des aspérités qui sont le siège de concentrations de contrainte.

Plusieurs études ont été consacrées à l'effet de l'état de surface sur la limite d'endurance et ont permis de dégager des modèles empiriques prenant en compte la rugosité. Niemann et al (cité par **Brand 1989**), à partir de résultats expérimentaux, ont dégagé une relation entre la limite d'endurance σ_{do} pour une éprouvette de référence caractérisée par une rugosité R_t de $1\mu\text{m}$, la limite d'endurance pour une éprouvette de rugosité R_t exprimée par :

$$\sigma_d = \frac{\sigma_{do}}{R_t^n} \quad 1-32$$

Par analogie, le facteur de l'état de surface K_s , est donné par

$$K_s = \frac{\sigma_d}{\sigma_{do}} = \frac{1}{R_t^n} \quad 1-33$$

n est une valeur empirique dépendant du matériau

Pour les aciers de haute résistance, **Itoga et al. 2003** ont mis en évidence que les aspérités caractérisant l'état de surface jouent le rôle de micro-entaille et influencent particulièrement le domaine de faible nombre de cycles. Cet effet ne sera pas pris en compte dans cette étude. Cela peut se justifier par le fait que dans le cas d'entaille, l'état de surface n'est pas l'élément le plus prépondérant.

1-4-4 Effet de la corrosion

Plusieurs organes et structures en aciers sont soumis à l'action séparée ou combinée des contraintes et de l'environnement. Lorsque ces deux phénomènes sont combinés, on parle de fatigue sous corrosion. La fatigue sous corrosion est le phénomène le plus dangereux.

La courbe de Wohler dans ce cadre n'admet pas d'asymptote assimilable à certaines courbes d'endurance relatives aux alliages d'aluminium. Les fissures sont généralement initialisées à partir de piqûres de corrosion à la surface de la pièce siège de l'interaction avec le milieu agressif. Celles-ci jouent le rôle d'entailles.

Le processus d'endommagement en fatigue sous corrosion en présence d'entaille a fait l'objet de travaux dus à **Dmytrakh et al. 2001** et mettent en évidence une densité critique de fissure dans les premiers stades du processus de corrosion. Cette étude concerne la corrosion électrochimique. Ce type de corrosion se manifeste dans le cas d'une hétérogénéité, soit dans le métal, soit dans le réactif. D'après **Dmytrakh et al. 2001**, le même principe se passe au fond d'entaille. La figure (1-15) illustre ce type de corrosion au fond d'entaille.

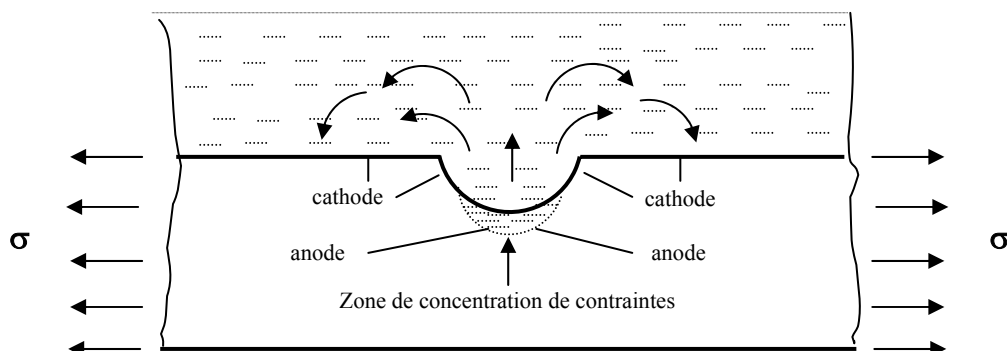


Figure I- 15 : Schéma représentatif du processus de corrosion en fond d'entaille **Dmytrakh et al. 2001**

La figure 1-16 montre l'influence de l'environnement sur la limite d'endurance, *Dorlot et Bailon 2000*

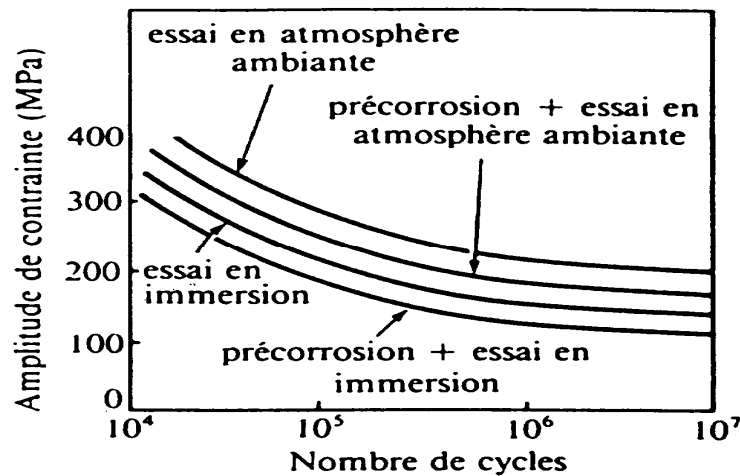


Figure 1-16 : Influence de l'environnement, *Dorlot et Bailon 2000*

Pour matérialiser aussi le phénomène de corrosion, on peut noter qu'il est établi une proportionnalité entre la limite de fatigue et la résistance ultime *Cazaud 1969* dans un certain intervalle des contraintes dans le cas de la fatigue à l'air libre. *Kitagawa in De la Cruz 1998* a montré que cette proportionnalité est perdue en fatigue sous corrosion. Une étude a été réalisée au département de mécanique consacrée à la fatigue sous corrosion sous entaille Doumi-Adamou 2006.

Conclusion

La connaissance du facteur de sensibilité d'entaille peut être utilisée pour estimer le facteur de concentration de contrainte en fatigue K_f . Pour la configuration d'une entaille donnée et caractérisée par son facteur de concentration de contrainte K_t , cela conduit à la connaissance de la limite d'endurance sous entaille. Plusieurs modèles donnant le facteur de sensibilité à l'entaille ont été présentés. Les modèles prenant en compte le gradient de contrainte et les caractéristiques des matériaux sont des modèles améliorés. Le modèle nécessitant le calcul de contrainte locale demande une modélisation par éléments finis que nous écartons. Dans notre

cas, nous allons calculer le facteur de sensibilité à l'entaille q avec $q = \frac{K_f}{K_t}$ et le modèle de Heywood q_{2H} . Les résultats qui en découlent seront présentés au chapitre 3.

Chapitre 2
Techniques
expérimentales et
moyens d'essais
utilisés

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter un historique sur les techniques d'essais en mécanique et particulièrement en mécanique de la rupture et en sollicitations cycliques. Nous pourrions apprécier l'évolution des moyens d'essais avec l'introduction des machines asservies. La machine de fatigue en flexion rotative et la machine de traction utilisées dans cette étude sont présentées. Les caractéristiques géométriques des éprouvettes sont données.

2-1 Historique

La taille du silex a donné à l'homme préhistorique une première connaissance intuitive des problèmes de la rupture fragile. La taille du silex conduit à le débiter selon les plans de clivage. Ceux ci sont les plans de densité atomique maximale, plans qui nécessitent le minimum d'énergie pour la rupture. **Pluvinage**

Les premiers travaux et approches mathématiques sur la rupture débutent au 16ème siècle. Les travaux de Léonard de Vinci (15/04/1452-2/05/1519) sur la résistance de fil de fer intitulé «Expérience de la résistance d'un fil à une masse » où il découvrit que la résistance à la rupture décroît avec la longueur du fil. Ceci peut être retenu comme le premier travail sur le phénomène d'échelle. Figure 2-1, **Pluvinage**

Galiléo Galilée (5/02/1564 – 29 /12/1641) a déterminé la résistance à la rupture de poutre encastree possédant différentes longueurs et sections droites. La figure 2-2 présente le dispositif réalisé. Figure 2-2, **Pluvinage**

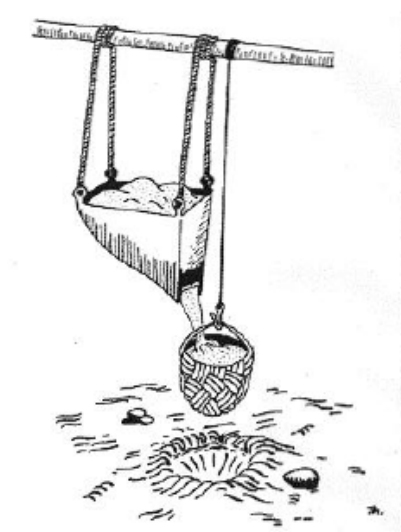


Figure 2-1 : Schéma de l'expérience menée par Léonard de Vinci, d'après **Pluvinage**

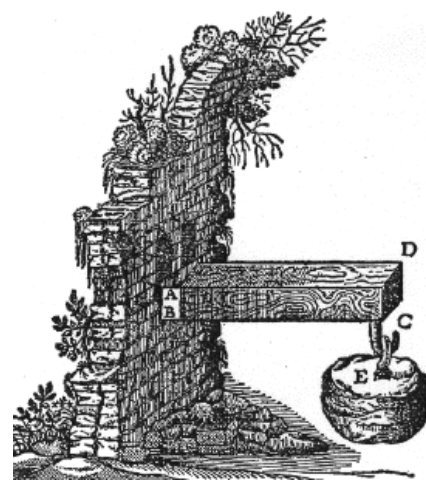


Figure 2-2 : Dispositif expérimental utilisé par Galilée, d'après **Pluvinage**

Robert Hooke (18/07/1635-3 /03/1703) publia en 1675, des résultats d'essais sur des ressorts en spirales ou hélicoïdaux. En effet à cette époque, il y avait un débat passionné entre plusieurs fabricants de montres (Tompion à Londres, Turet à Paris). Hooke pour savoir quels allongements peuvent supporter les ressorts en spirales ou hélicoïdaux en tant que force motrice des montres, énonça ses résultats de la théorie de l'élasticité.

Georges Louis Leclerc qui prit le nom de Buffon (7/09/1707- 16/04/1788) conçut une machine pour réaliser ses expériences sur le bois (Figure 2-3). Malgré la complexité du matériau due à l'anisotropie, il a mis en évidence le phénomène du fluage caractérisant le bois

vert humide et le phénomène de concentration de contrainte localisé au niveau des nœuds.
Pluvinage .

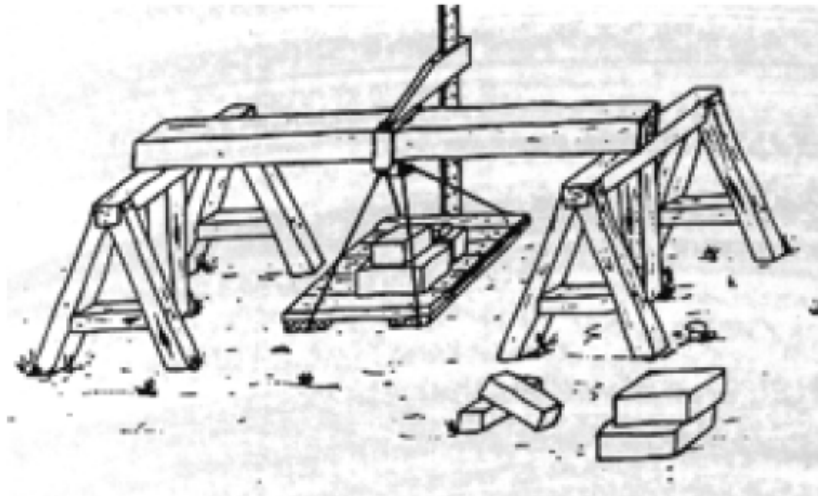


Figure 2-3 : Schéma de l'expérience en flexion menée par Buffon sur la résistance du bois

Franz Carl Achard (1753-1821) réalisa des essais de traction, flexion et de dureté sur différents matériaux. A cette époque, on considérait principalement la résistance des matériaux en traction, flexion, compression (Figure 2-4) et la résistance au flambage de colonnes élancées.

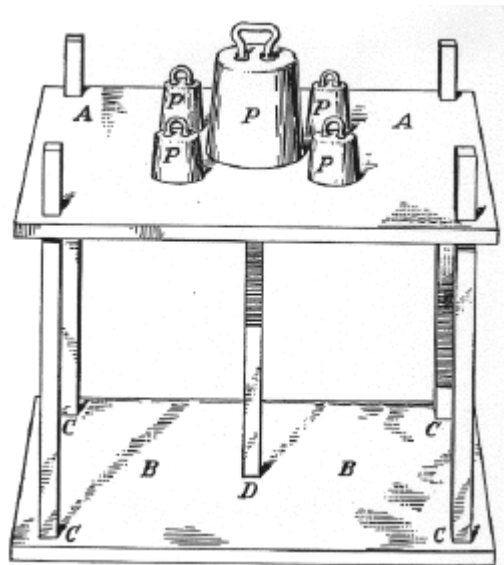


Figure 2-4 : Machine d'essai de compression utilisée par Franz Carl Achard., d'après
Pluvinage

Les travaux de Charpy sur les essais d'impact sur barreaux entaillés ont été présentés pour la première fois au congrès de Budapest de l'Association Internationale pour les Essais de Matériaux en 1901 *Pluvinage 2003*

Le pendule réalisé par Charpy est présenté dans la figure N° 8. Le poids du pendule était de 50 Kg et la distance entre l'axe de rotation et le couteau était de 4 m. Le pendule était enchâssé dans un bloc de maçonnerie de cinq mètres cubes. L'éprouvette était placée sur deux supports réalisés à partir d'une tôle de 1600 Kg. La hauteur après impact était mesurée directement grâce à la vitesse très lente du pendule au niveau de la remontée maximale. L'essai dynamique Charpy utilise une éprouvette entaillée.

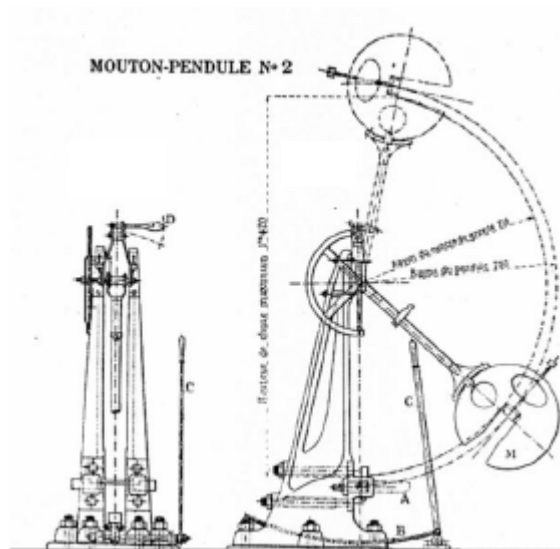


Figure 2-5 : Mouton pendule Charpy

2-2 Premières Machines modernes de fatigue

Les premières machines modernes d'essais de fatigue offraient des sollicitations approchant le chargement réel des organes de machines à étudier.

Les essais in situ constituent le cas idéal. Mais la complexité du phénomène de fatigue et l'existence de plusieurs paramètres a obligé les chercheurs à mettre au point des essais de fatigue assez simples où n'est étudié que l'influence d'un seul paramètre de manière à déterminer des modèles simples pouvant être généralisés.

2-2-1 Machine de traction-compression

La majorité des machines utilisées dans ce type d'essais sont constituées de bâtis particulièrement lourds et rigides et de masses oscillantes. Ces masses oscillantes sont mises en mouvement mécaniquement par l'intermédiaire d'une masse tournante dont l'excentricité est réglable.



Photo 2-1 Machines hydrauliques pour essais statique et dynamique

2-2-2 Les essais de flexion plane alternée

Dans ce type d'essais, des éprouvettes de tôle sont mises en flexion dans un plan fixe. Le moment fléchissant est alternatif. Certains pulsateurs verticaux et tables vibrantes, avec des montages spécifiques, permettent d'effectuer des essais de flexion plane. En général, les machines d'essais en flexion plane sont composées de leviers coudés: un des leviers est fixe tandis que l'autre est fixé à un arbre soumis à une torsion alternative.

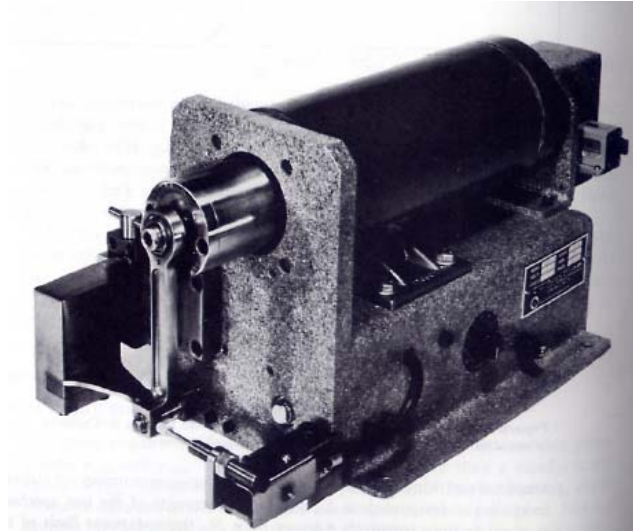


Photo.2-2 . Machine de flexion plane alternée Shenck « Webi ». *Deuschman et al 1975*

2-2-3 Machine de flexion rotative

Ce type de machine permet de réaliser des essais de fatigue en flexion rotative. Pour la machine représentée sur la photo 2-3, dont une version plus récente a été utilisée dans notre étude, le système de chargement est réalisé grâce à des masses ajoutées au fur et à mesure de l'essai. L'éprouvette est entraînée par un moteur grâce à un accouplement élastique. Le nombre de cycles est mesuré avec un compte tour relié au moteur.

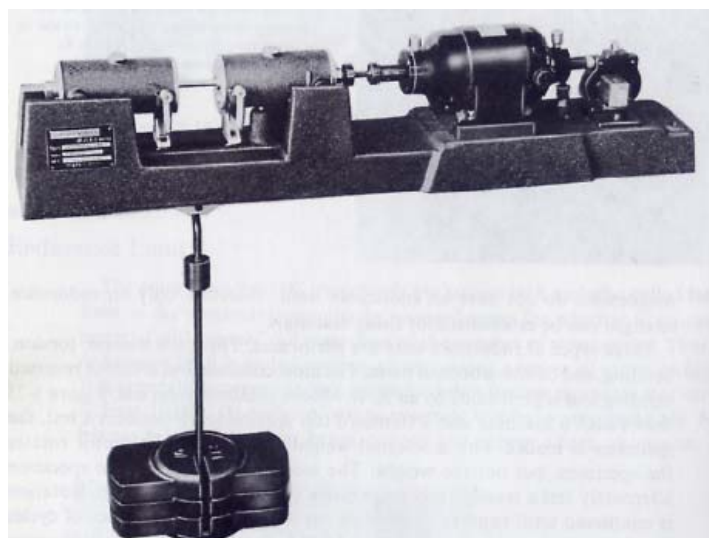


Photo. 2-3. Machine de flexion rotative *Deuschman et al. 1975.*

2-3 Les machines actuelles de fatigue

Lorsque Wöhler proposa la courbe d'endurance en fatigue, les applications du moment étaient celles de la machine à vapeur destinée aux locomotives ou aux bateaux. Ces machines lentes fonctionnaient à quelques dizaines de cycles par minute, avec des durées de vie comprises entre 10^6 et 10^7 cycles. Il était tout à fait justifié au plan pratique de considérer une limite de fatigue mégacyclique, d'autant qu'au plan expérimental les machines de tests de fatigue de l'époque ne permettaient pas de dépasser la dizaine de Hertz.

Les premières machines servo-hydraulique sont apparues dans les années 1950.

La vitesse de rotation des moteurs actuels étant de l'ordre de plusieurs milliers de cycles par minute, la durée de vie d'un moteur à explosion se compte en centaines de millions de cycles et celui des turbines en milliards de cycles. Reste que les essais de fatigue au-delà de 10^7 cycles sont assez rares pour des questions de coûts liés au fonctionnement des machines de tests conventionnelles.

Avec l'avènement et l'apport de l'électronique, de l'informatique et des systèmes d'acquisition de données, les machines de fatigue modernes actuelles sont des machines complètement asservies par ordinateur. De plus, les essais peuvent être menés sous atmosphère contrôlée en cours d'essai avec des systèmes optiques et de traitement d'images. Certaines machines peuvent atteindre des fréquences allant jusqu'à 1000 Htz. Avec le pilotage par ordinateur et l'existence de capteurs à réponse très rapide, Il existe des machines de fatigue capables de produire 10^{10} cycles en moins d'une semaine alors que les systèmes conventionnels conduisent à plus de trois ans d'essais pour une seule éprouvette.

Ces machines peuvent réaliser des essais multiaxiaux vrais. Elles sont parfaitement adaptées maintenant pour prendre en charge des essais sur les nouveaux matériaux.

Sur la figure ci dessous représente un schéma de principe d'une machine servo-hydraulique.

Le cœur de ce type de machine est constitué par la servo-valve qui contrôle électroniquement L'écoulement sous haute pression de l'huile.

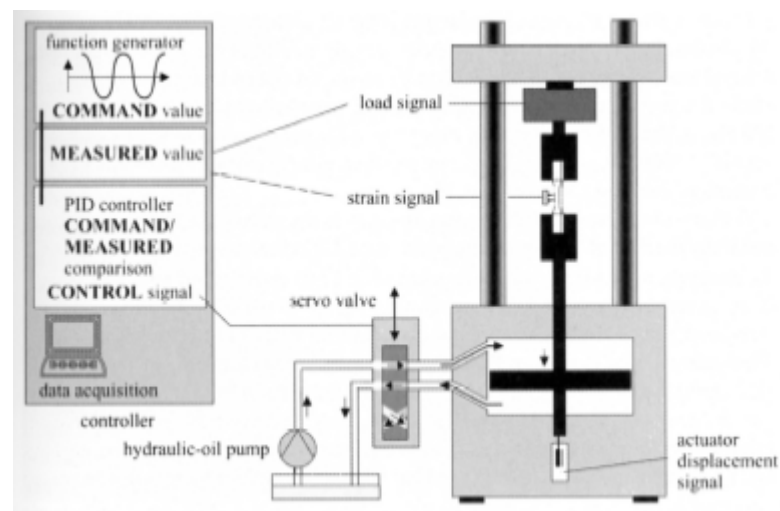


Figure 2-6 Schéma de principe d'une machine de fatigue servo-hydraulique, Krupp 2007

Les moyens d'essais pour agir sur les conditions de l'essai peuvent être apportés. Sur la photo 2-4 ci-dessous, nous pouvons remarquer une enceinte sous atmosphère contrôlée dans laquelle l'éprouvette est montée et chauffée par induction.



Photo 2-4 Fatigue en traction compression – éprouvette chauffée par induction, Krupp 2007

Sur la photo 2-5, l'éprouvette est sollicitée dans une enceinte et chauffée par lampe à quartz.

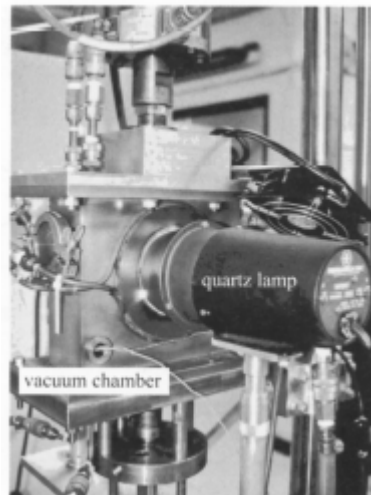


Photo 2-5 Fatigue flexion quatre point – éprouvette chauffée par lampe à quartz, Krupp 2007

Les nouveaux matériaux donnent une nouvelle orientation et application des machines. Comme les bétons cellulaires, il existe actuellement l'aluminium cellulaire (mousse d'aluminium). Ce métal peut flotter dans le cas d'alvéoles fermées. En raison des dimensions des alvéoles, une certaine dimension est exigée pour avoir une éprouvette et un volume représentatif. Une dimension minimale représentant 10 fois la dimension de l'alvéole est demandée.

La photo 2-6 montre un essai de fatigue en traction-compression sur un échantillon de mousse d'aluminium. L'échantillon est collé aux mors de la machine afin d'éviter d'écraser les bouts de l'éprouvette.



Photo 2-6 Essai de fatigue traction-compression sur un échantillon de mousse d'aluminium, Krupp 2007

Des essais de fatigue et de ténacité sont réalisables sur ce matériau (Photo 2-7)

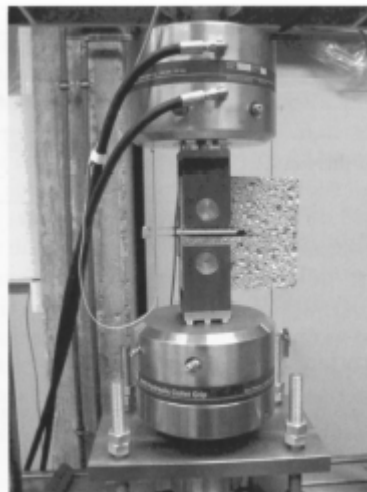


Photo 2-7 Détermination de la ténacité sur une mousse d'aluminium, Krupp 2007

2-4 Machines d'essais et éprouvettes utilisés

2-4-1 Machine de flexion rotative

Pour les essais de fatigue, nous avons utilisé la machine de flexion rotative du laboratoire de génie mécanique et développement du département représentée sur la photo 2-8 et la Figure 2-7 ci-dessous. Elle se compose essentiellement de :

- une partie tournante: comprenant deux fourreaux (1). A l'intérieur de chaque fourreau est monté une pince qui permet le serrage de l'éprouvette (2). Les fourreaux sont montés sur deux roulements à rotules à deux rangées de billes. L'entraînement de l'éprouvette est assuré par un moteur électrique tournant à 2760 tr/mn par l'intermédiaire d'un accouplement élastique (3). Le nombre de cycles est donné par un compte tours (5) relié au moteur.

- une partie chargement: composée principalement d'un levier (8) sur lequel peut glisser une masse (7) dont le déplacement est mesuré grâce à une aiguille coulissant le long d'une règle

de 300 mm. Ce levier est relié au 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 (6) lors de la rupture de l'éprouvette ce qui permet de mesurer le nombre de tours ou de cycles effectués par l'éprouvette sous une certaine charge jusqu'à la rupture.

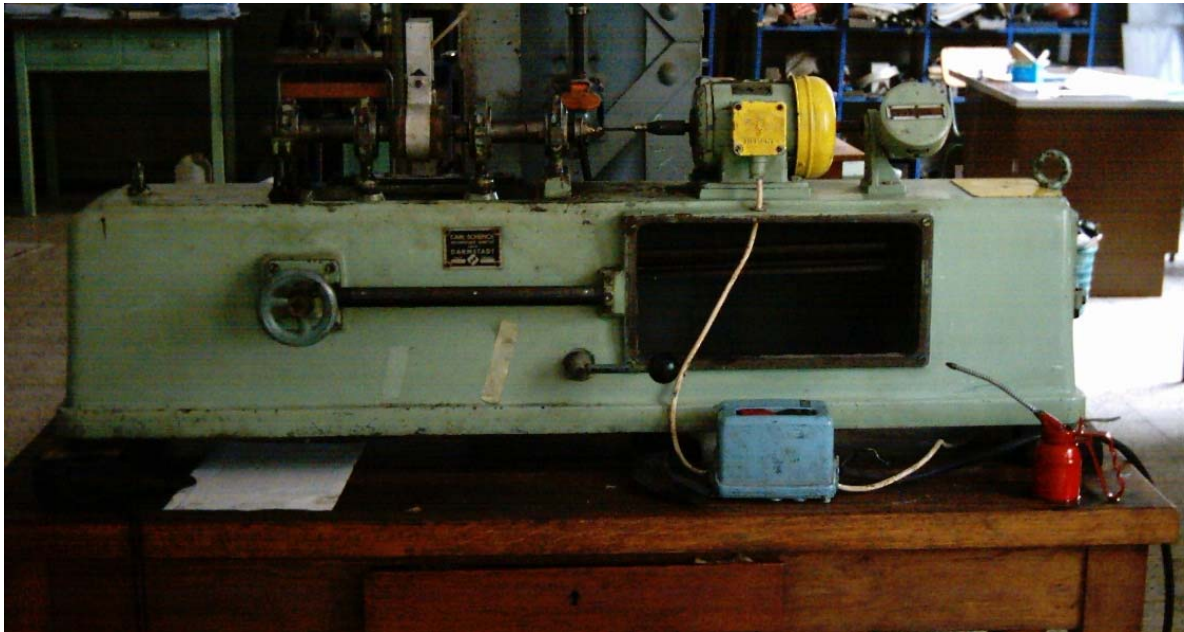


Photo 2-8 : Machine de flexion rotative utilisée

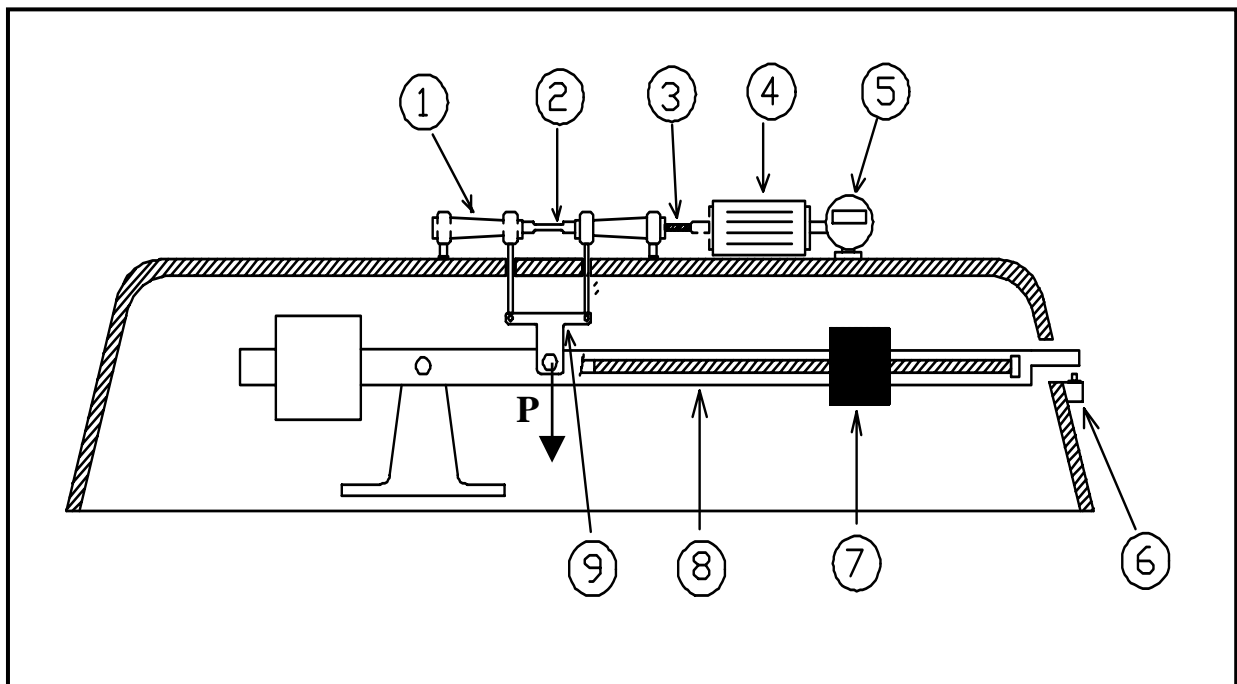


Figure 2-7 : Schémas de principe de la machine de flexion rotative utilisée

2-4-2 Machine de traction

La caractérisation mécanique du matériau ainsi que la quantification de l'endommagement a été réalisée au département de génie civil sur la machine de traction type « Stinco » de capacité de 100 KN (Photo 2-9).

Cette machine est constituée de deux parties, l'une fixe et l'autre mobile.

La partie fixe comprend deux mors réglables en hauteur, reliés au bâti et servant à fixer l'éprouvette.

La partie mobile comprend deux mors de fixation permettant le chargement de l'éprouvette. Le déplacement se fait à l'aide d'un vérin hydraulique relié aux mors.



Photo 2-9 : Machine de traction utilisée

2-4-3 Types d'éprouvettes utilisées

Nous avons utilisé des éprouvettes lisses standard pour la caractérisation mécanique et les essais de fatigue (Figure 2-8).

Le phénomène de dispersion est inhérent aux conditions d'obtention des éprouvettes. Celles-ci doivent être confectionnées suivant les recommandations des normes *Lieurade 1982*

Pour éviter l'échauffement, réduire l'écrouissage des surfaces et éliminer d'autres facteurs (tels que piqûres, défauts géométriques) pouvant influencer les résultats des essais, les éprouvettes sont obtenues à partir d'ébauches présentant des surépaisseurs de plus 0,5 mm.

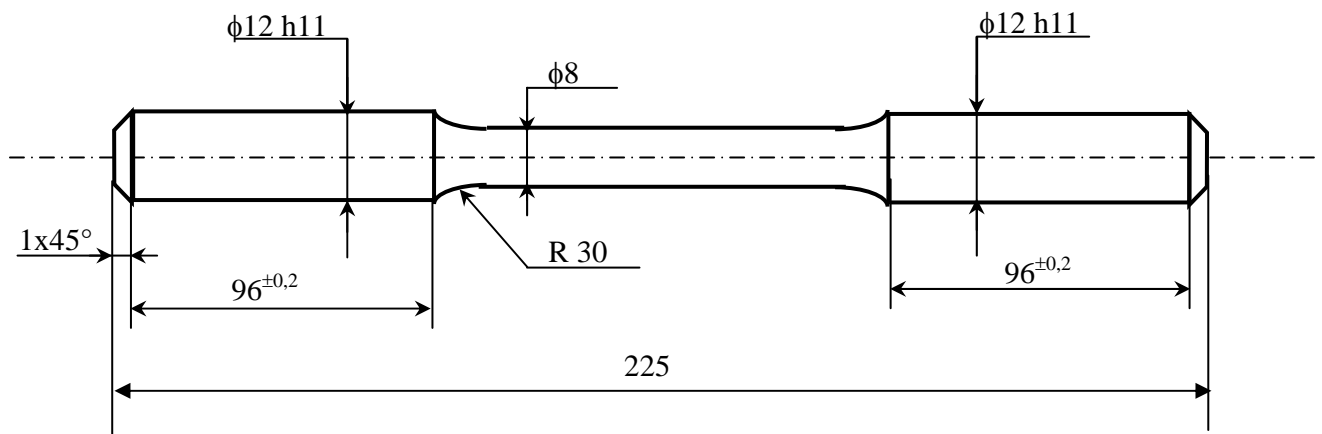


Figure 2-8 : Eprouvette lisse

Des éprouvettes entaillées (Figure (2-9-a) de différentes acuités (détail en Figure 2-9-b) ont été utilisées pour les essais de fatigue et d'endommagement. Le diamètre de la section nette au niveau de l'entaille est de 8 mm correspondant au diamètre de l'éprouvette lisse au niveau de la longueur utile. Deux types d'entailles ont été réalisés avec un outil de forme. Les entailles réalisées présentent un angle de 60° et un rayon en fond d'entaille de 0,1 et 0,5 mm chacune.

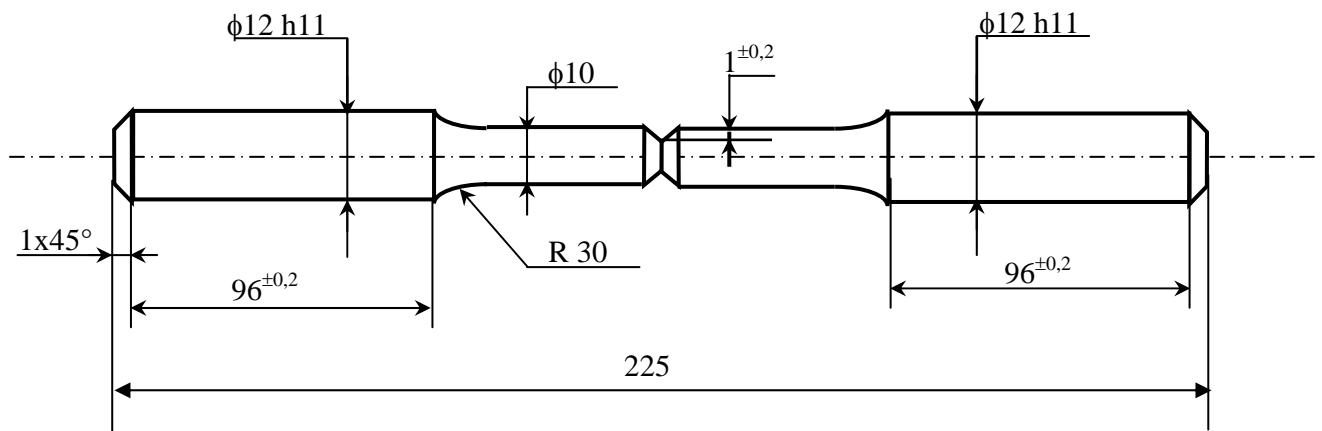


Figure 2-9-a : Eprouvette entaillée

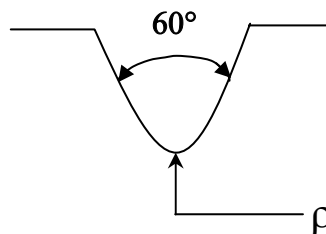


Figure 2-9-b : détail de l'entaille

2-4-4 Mode de sollicitation de l'éprouvette en flexion rotative

Dans le cas de la flexion rotative réalisée sur la machine « SCHENCK » (Fig 2-10), l'éprouvette est sollicitée en flexion quatre points. L'éprouvette est soumise à un moment fléchissant constant entre les points d'application des charges. Ceci permet d'obtenir, dans le cas d'éprouvettes lisses, une équiprobabilité de rupture. Dans le cas d'éprouvettes entaillées, la rupture est localisée au niveau de l'entaille.

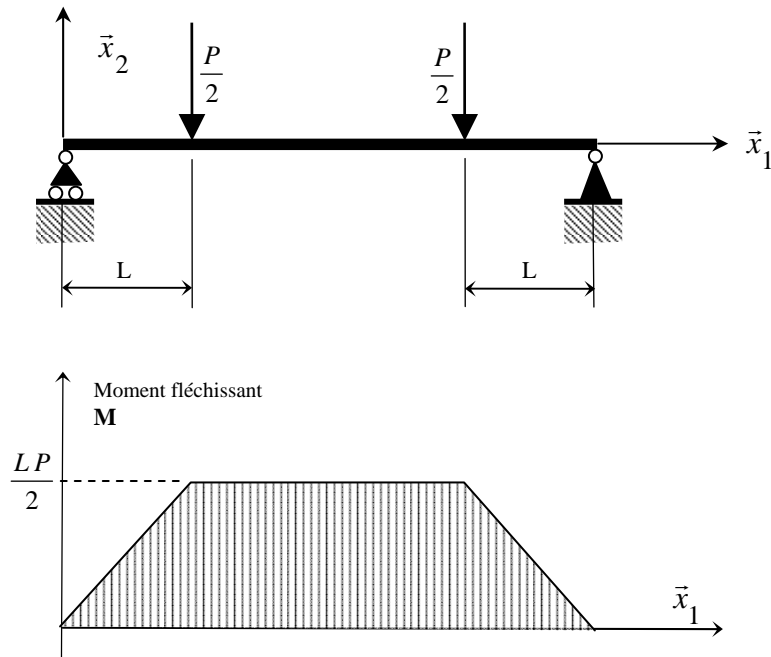


Figure 2-10. Sollicitation de l'éprouvette.

Dans notre cas, la contrainte moyenne $\sigma_m=0$ et le rapport de charge $R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1$

Conclusion

Les machines d'essai mécanique ont évolué pour atteindre un degré de sophistication grâce à l'apport de l'informatique, de l'électronique et des moyens de prise et traitement d'images. Les moyens d'essais dont nous disposons, malgré leur âge, ont pu être exploités. Ils ont servi pour l'usinage, les essais de traction et les essais de fatigue en flexion rotative.

Chapitre 3
Fatigue sous entaille
et traitements
thermiques

Introduction

L'objet de ce chapitre est de montrer l'influence des entailles et des traitements thermiques sur l'endurance.

Le rapport de charge et les traitements thermiques sont des paramètres importants influençant les limites d'endurance (*Pals et al. 2004, Vantiger et al. 2002*) Dans notre cas le rapport de charge est fixe et égal à -1. Nous avons mené une série d'expériences sur éprouvettes lisses et entaillées présentant différentes acuités, avec et sans traitements thermiques. Les essais de fatigue ont été effectués sur une machine de flexion rotative décrite au chapitre précédent. Les éprouvettes sont soumises à différents niveaux de contrainte jusqu'à rupture. Pour certains niveaux de contraintes, trois éprouvettes sont utilisées.

3-1 Matériaux utilisés

Pour les besoins de l'étude, nous avons utilisé les aciers 30NC11 et 16NC6. Ces deux nuances sont des aciers de construction faiblement alliés au nickel chrome, disponibles au magasin du département de génie mécanique et se prêtent bien aux conditions des essais souhaités. Le 30NC11 est un acier à 0,3% de carbone, 3% de nickel et autour de 0,8% de chrome ayant une limite élastique de 420MPa et une résistance à la traction de 620MPa. Le 16NC6 est un acier à 0,16% de carbone, 1,5% de nickel et moins de 1,5% de chrome de limite élastique égale à 450MPa et une résistance à la traction de 670MPa. Le problème posé se trouve dans le choix des niveaux de contrainte afin de couvrir la zone de fatigue limitée. Plusieurs tentatives ont été menées dans ce sens, en prenant en compte des résultats similaires de la littérature *Cazaud 1969* et *Brand 1989*, afin de situer cette plage avant d'entamer les essais proprement dits.

Les caractéristiques mécaniques des aciers utilisés sont présentées sur les deux tableaux suivants

Résistance à la traction	limite élastique	allongement à la rupture
σ_u [MPa]	σ_e [MPa]	A [%]
620	420	28

Tableau 3-1-a : Caractéristiques mécaniques de l'acier 30NC11

Résistance à la traction	limite élastique	allongement à la rupture
σ_u [MPa]	σ_e [MPa]	A [%]
670	450	23

Tableau 3-1-b : Caractéristiques mécaniques de l'acier 16NC6

3-2 Cas de l'acier 30NC11

Dans ce qui suit, nous allons présenter une série de courbes d'endurance relative à l'acier 30NC11 à l'état recuit. Des éprouvettes lisses et entaillées d'acuité 0,5mm et 0,1mm chacune ont été utilisées. La contrainte considérée représente la contrainte globale.

3-2-1 Eprouvettes à l'état recuit

Les premiers résultats des essais de fatigue ont été menés sur l'acier 30NC11 à l'état recuit. Des éprouvettes lisses et entaillées de d'acuité 0,5mm et 0,1mm chacune ont été utilisées. La procédure des traitements thermiques réalisés fera l'objet du paragraphe 3-2-2.

3-2-1-1 Eprouvettes lisses à l'état recuit

La première courbe Fig 3-1, représente la courbe d'endurance pour une éprouvette lisse à l'état recuit, obtenue a partir des résultats du tableau 3-2

Contrainte σ [MPa]	N Nombres de cycles à rupture		
	Test 1	Test 2	Test 3
360	44700	29600	38000
350	127200	132500	98000
325	466700	696000	62500
320	770000	871000	820000

Tableau 3-2 : contrainte-nombres de cycles à rupture pour éprouvettes lisses à l'état recuit

Toutes les courbes d'endurance ont été tracées dans la zone de fatigue limitée. La limite d'endurance sera obtenue pour 10^6 .

La première courbe concerne une éprouvette lisse de diamètre net de 8mm. La limite d'endurance σ_{dN} est donc estimée à 318 MPa. Ceci représente, pour ce type d'acier, une bonne estimation. Le rapport endurance, qui est le rapport entre la limite de rupture et la limite d'endurance est donc égal à 0,512. Cela représente aussi un indicateur relevé dans la littérature *Cazaud 1969*.

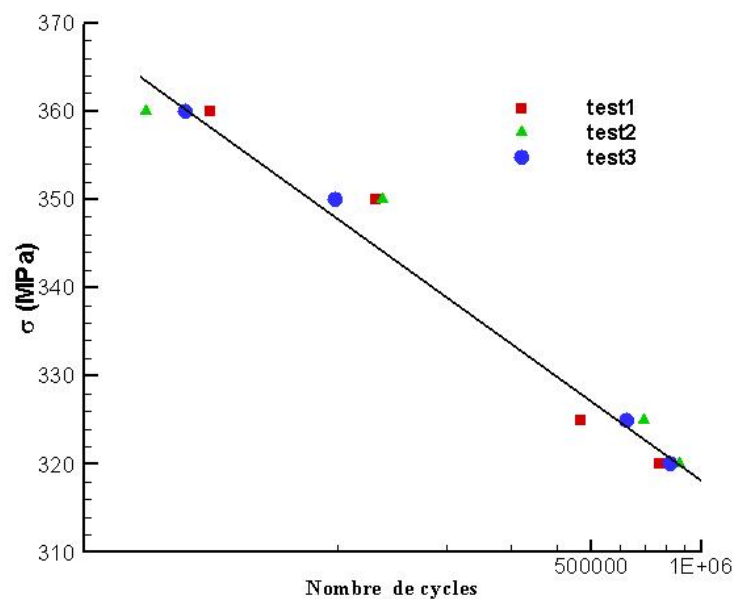


Figure 3-1 : Courbe d'endurance pour éprouvettes lisses à l'état recuit

Pour l'éprouvette lisse présentée sur la photo ci-dessous, la zone d'amorçage de la fissure est localisée en surface caractérisée par son foyer. La surface rompue est gauche.

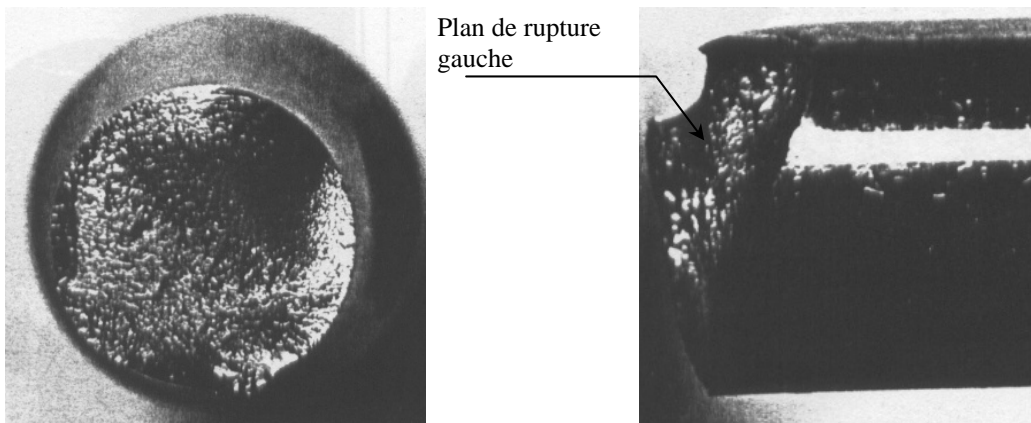
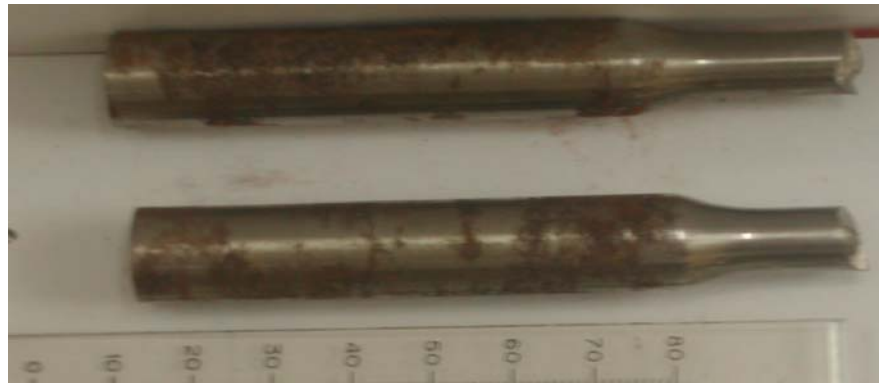


Photo 3-1 : Eprouvette lisse à l'état recuit rompue sous faible charge

3-2-1-2 Eprouvette entaillées l'état recuit avec $\rho=0,5$

La Figure 3-2, représente la courbe d'endurance pour une éprouvettes entaillées de rayon d'entaille égal $\rho=0,5$, à l'état recuit, obtenue à partir des résultats du tableau 3-3.

Contrainte σ [MPa]	N Nombres de cycles à rupture		
	Test 1	Test 2	Test 3
277	51000	62000	70000
270	120000	90000	85000
260	95000	200000	150000
243	555000	341000	450000
230	540000	850000	960000

Tableau 3-3 : contrainte-nombres de cycles à rupture pour éprouvettes entaillées ($\rho=0,5$) à l'état recuit

La courbe ci dessous concerne une éprouvette entaillée de diamètre net de 8mm et d'acuité $\rho=0,5$ mm. La limite d'endurance $\hat{\sigma}_{dN}$ est donc estimée à 226 MPa.

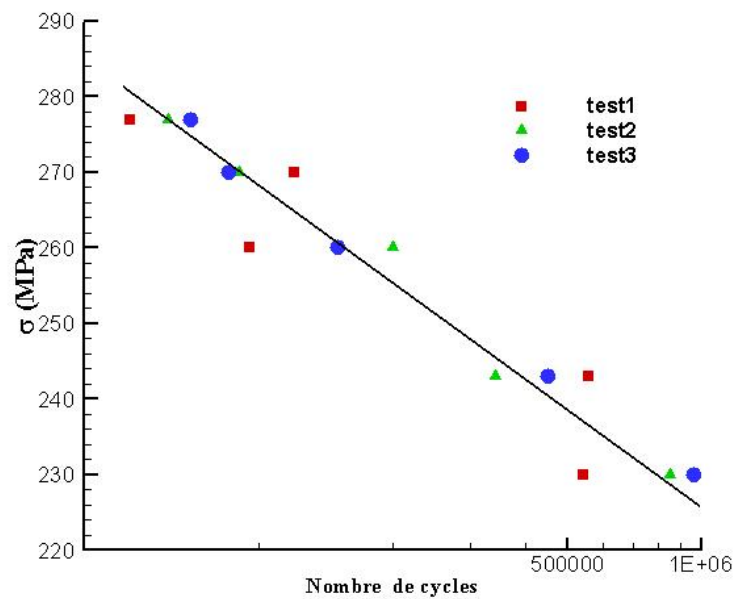


Figure 3-2 : Courbe d'endurance pour éprouvettes entaillées ($\rho=0,5$) à l'état recuit

Sur les photos ci dessous, on peut remarquer une section de rupture plane. La zone de rupture brutale est excentrée dans le cas d'une sollicitation à faible taux de charge. Contrairement à l'éprouvette lisse, on peut mettre en évidence plusieurs foyers d'amorçage de fissures.

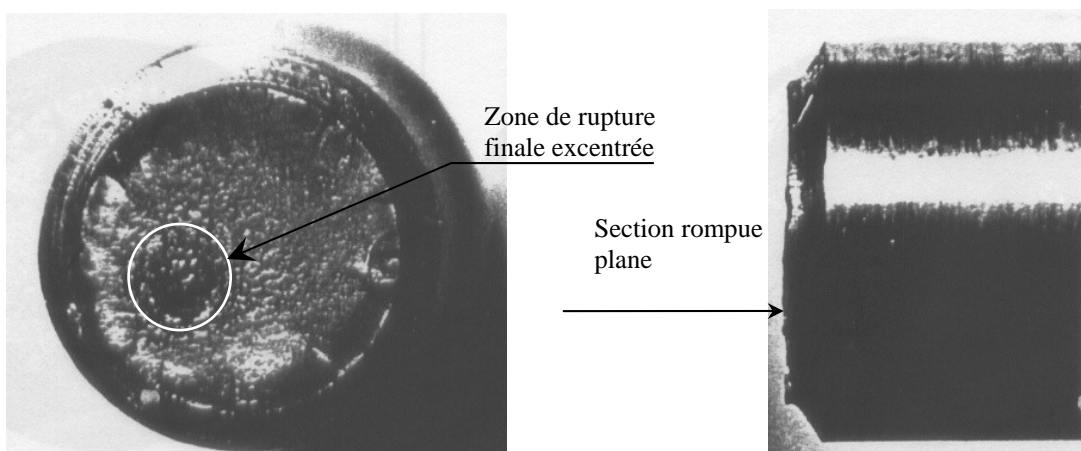


Photo 3-2 : Eprouvette entaillée ($\rho=0,5$) à l'état recuit rompue sous faible charge

3-2-1-3 Eprouvette entaillées l'état recuit avec $\rho=0,1$

La Figure 3-3, représente la courbe d'endurance pour une éprouvettes entaillées de rayon d'entaille égal $\rho=0,1$, à l'état recuit, obtenue à partir des résultats du tableau 3-4

Contrainte σ [MPa]	N Nombres de cycles à rupture		
	Test 1	Test 2	Test 3
285	98600	42000	60000
270	73000	85000	90000
253	198000	240000	310000
235	710000	850000	650000

Tableau 3-4 : contrainte-nombres de cycles à rupture pour éprouvettes entaillées ($\rho=0,1$) à l'état recuit

La courbe ci dessous concerne une éprouvette entaillée de diamètre net de 8mm et d'acuité $\rho=0,1$ mm. La limite d'endurance $\hat{\sigma}_{dN}$ est estimée à 227 MPA. On peut conclure qu'elle est comparable à la limite d'endurance obtenue pour l'éprouvette entaillée d'acuité $\rho=0,5$ mm. Pour cette nuance d'acier à l'état recuit, le phénomène d'adaptation plastique peut expliquer ce résultat.

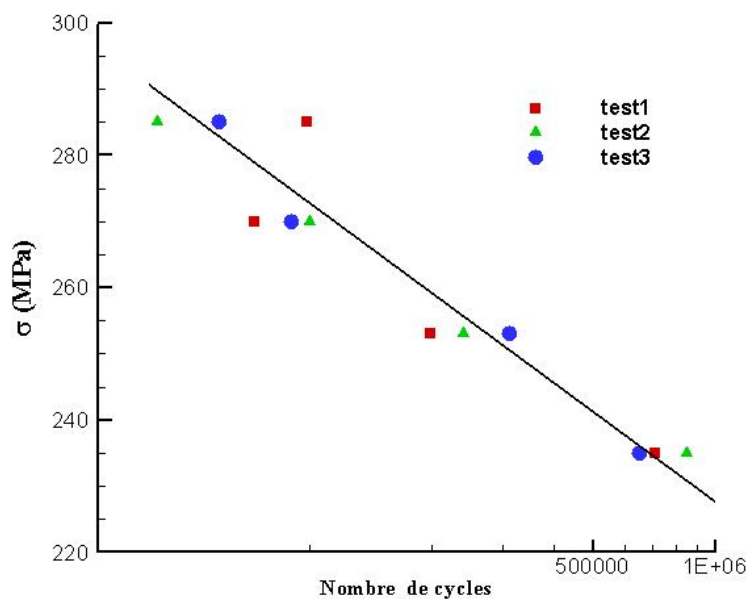


Figure 3-3 : Courbe d'endurance pour éprouvettes entaillées ($\rho=0,1$) à l'état recuit

3-2-2 Eprouvettes avec traitement thermique

La série d'essai concerne l'acier 30NC11 ayant subi un traitement de trempe-revenu. Les éprouvettes chauffées et maintenues à 875 °C pendant 15 mn, subissent une trempe dans un bain d'huile puis un revenu à 600 °C pendant 1h15mn. Des éprouvettes lisses et entaillées de d'acuité 0,5mm et 0,1mm chacune ont été utilisées. La contrainte considérée représente la contrainte globale.

3-2-2-1 Eprouvettes lisses avec trempe-revenu

La première courbe de cette série Fig 3-4, représente la courbe d'endurance pour une éprouvette lisse ayant subi un traitement de trempe-revenu, obtenue a partir des résultats du tableau 3-5

Contrainte σ [MPa]	N Nombres de cycles à rupture	
	Test 1	Test 2
590	16200	31500
570	64200	72100
545	224000	93000
505	498500	810000

Tableau 3-5 : contrainte-nombres de cycles à rupture pour éprouvettes lisses avec trempe-revenu

La courbe ci dessous concerne une éprouvette lisse de diamètre net de 8mm. La limite d'endurance σ_{dN} est estimée à 500 MPA. En gardant une bonne ténacité avec ce traitement thermique, la limite d'endurance a été améliorée.

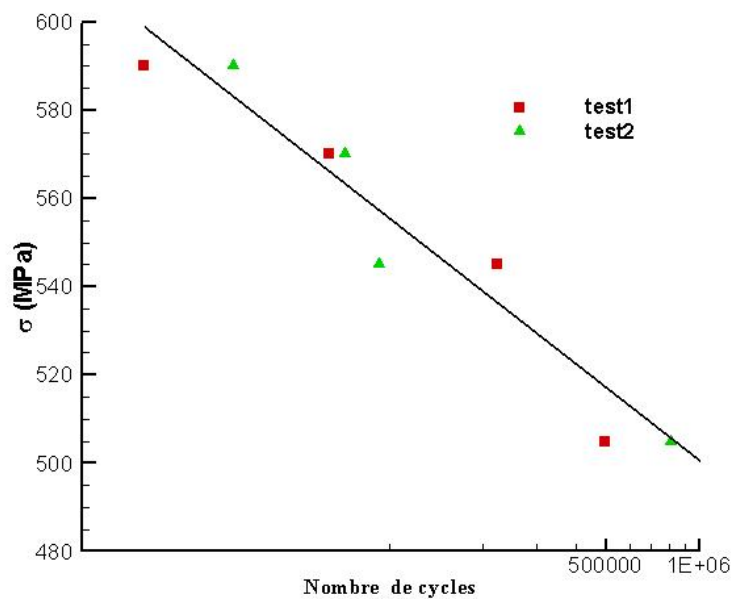


Figure 3-4 : Courbe d'endurance pour éprouvettes lisses avec trempe-revenu

3-2-2-2 Eprouvette entaillées avec trempe-revenu avec $\rho=0,5$

La Figure 3-5, représente la courbe d'endurance pour une éprouvette entaillée de rayon d'entaille égal à $\rho=0,5$, ayant subi un traitement de trempe-revenu, obtenue à partir des résultats du tableau 3-6

Contrainte	N Nombres de cycles à rupture
------------	-------------------------------

σ [MPa]	Test 1	Test 2
340	39600	40000
320	253300	67000
305	265000	520000
290	490000	810000

Tableau 3-6 : contrainte-nombres de cycles à rupture pour éprouvettes entaillées ($\rho=0,5$) avec trempe-revenu

La courbe ci dessous concerne une éprouvette entaillée de diamètre net de 8mm et d'acuité $\rho=0,5$ mm avec trempe revenu. La limite d'endurance est estimée à 286 MPA.

La photo ci dessous représente la surface rompue pour l'éprouvette entaillée avec une acuité de $\rho=0,5$ mm. La surface est plane comparable à celle de l'éprouvette à l'état recuit. Néanmoins, on peut remarquer des cupules plus allongées dans le cas d'un traitement avec trempe revenu. La zone de rupture brutale reste excentrée pour de faible charge.

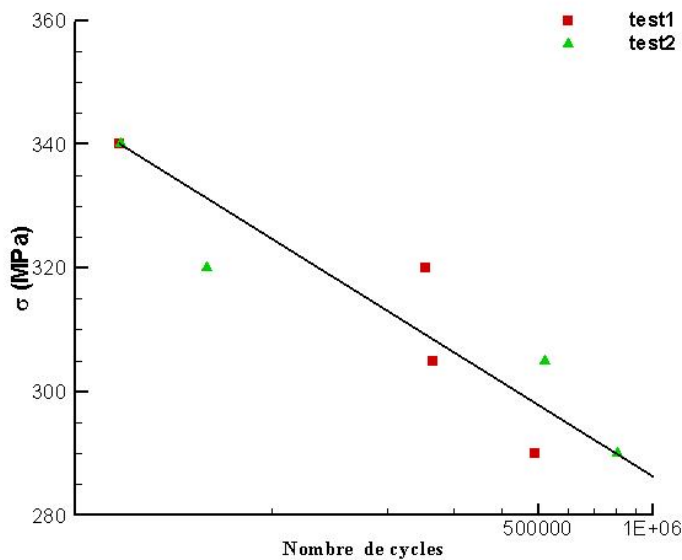
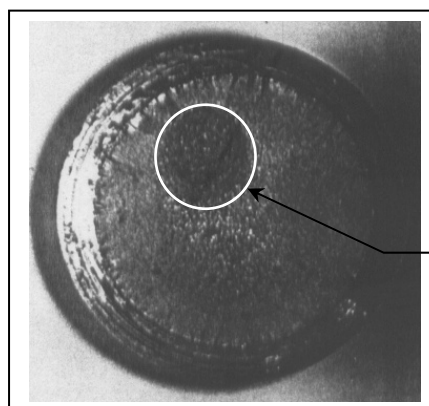


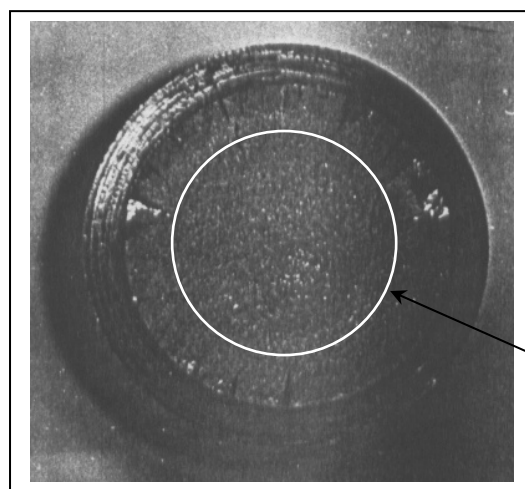
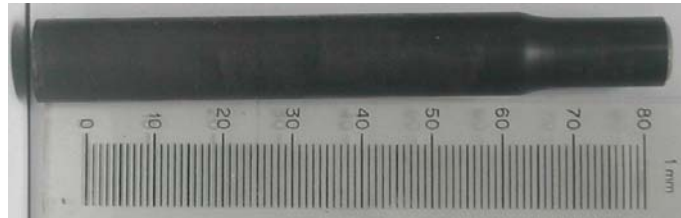
Figure 3-5 : Courbe d'endurance pour éprouvettes entaillées ($\rho=0,5$) avec trempe-revenu



Zone de rupture finale excentrée

Photo 3-3 : Eprouvette entaillée ($\rho=0,5$) avec trempe-revenu rompue sous faible charge

La photo ci dessous représente la surface rompue pour l'éprouvette entaillée avec une acuité de $\rho=0,5\text{mm}$. La surface est plane et comparable à celle de l'éprouvette à l'état recuit. La zone de rupture brutale est centré pour les fortes charges et présente plusieurs foyers d'amorçage de fissures sur la circonférence. Ce type de zone de rupture est bien mis en évidence dans les travaux de *Eleiche 2006* pour de faible nombre de cycles de rupture.



Zone de rupture centrée

Photo 3-4 : Eprouvette entaillée ($\rho=0,5$) avec trempe-revenu rompue sous forte charge

3-2-2-3 Eprouvette entaillées avec trempe-revenu avec $\rho=0,1$

La Figure 3-6, représente la courbe d'endurance pour une éprouvettes entaillées de rayon d'entaille égal $\rho=0,1$, ayant subi un traitement thermique de trempe-revenu, obtenue à partir des résultats du tableau 3-7

Contrainte σ [MPa]	N Nombres de cycles à rupture	
	Test 1	Test 2
325	73000	40000
310	100000	160000
290	225000	90000
275	750000	500000

Tableau 3-7 : contrainte-nombres de cycles à rupture pour éprouvettes entaillées ($\rho=0,1$) avec trempe-revenu

La courbe ci dessous concerne une éprouvette entaillée de diamètre net de 8mm et d'acuité $\rho=0,1$ mm avec trempe revenu. La limite d'endurance $\hat{\sigma}_{dN}$ est estimée à 266 MPA. Nous pouvons remarquer une chute de la limite d'endurance par rapport à l'éprouvette d'acuité $\rho=0,5$ contrairement à l'éprouvette à l'état recuit. Cette chute n'est pas très significative et peut être expliqué par le traitement thermique réalisé.

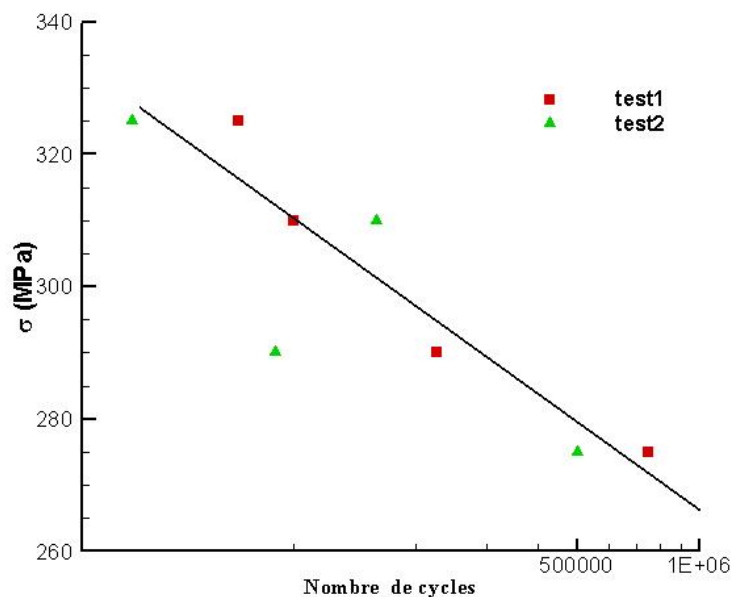


Figure 3-6 : Courbe d'endurance pour éprouvettes entaillées ($\rho=0,1$) avec trempe-revenu

3-2-3 Etude comparative pour l'acier 30NC11

Dans ce qui suit, nous allons réaliser une étude comparative des effets des paramètres étudiés au paragraphes précédent concernant l'acier 30NC11.

3-2-3-1 Effet d'entaille pour l'état recuit

Sur la figure ci-dessous, nous pouvons montrer l'effet d'entaille en regroupant les courbes d'endurance des éprouvettes lisses et celles entaillées avec les acuités $\rho=0,1$ et $\rho=0,5$ mm à l'état recuit. Les deux courbes d'endurance relatives aux éprouvettes entaillées sont pratiquement confondues. Ces courbes mettent bien en évidence le caractère ductile qui permet pour ces acuités, d'obtenir des limites d'endurance comparables. Les facteurs de sensibilité à l'entaille pour ces deux acuités sont égaux.

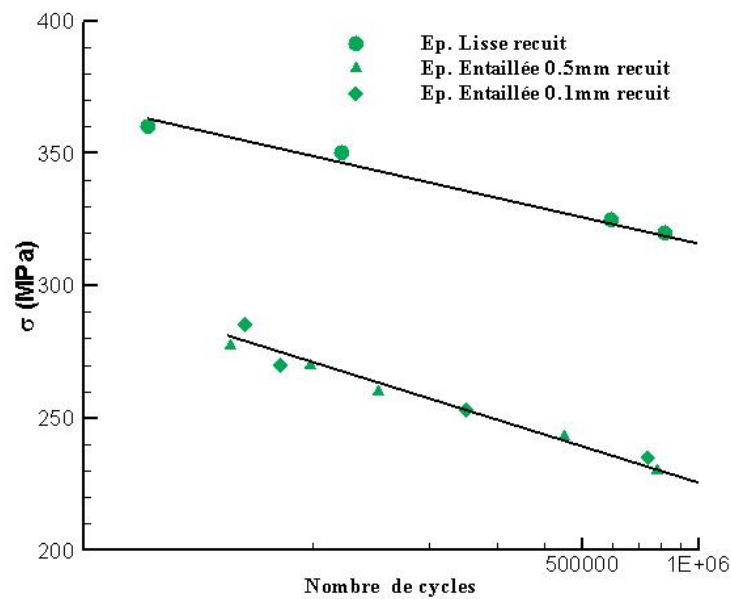


Figure 3.7 : Effet d'entaille à l'état recuit

3-2-3-2 Effet d'entaille avec trempe revenu

Sur la figure ci-dessous, nous pouvons montrer l'effet d'entaille en regroupant les courbes d'endurance des éprouvettes lisses, celles entaillées avec les acuités $\rho=0,1$ et $\rho=0,5\text{mm}$ ayant subi un traitement de trempe-revenu. Les deux courbes d'endurance relatives aux éprouvettes entaillées sont légèrement décalées. Le traitement de trempe revenu, agissant sur la ductilité, a permis, pour ces acuités, d'obtenir des limites d'endurance différentes et par conséquent des coefficients de concentration en fatigue différents.

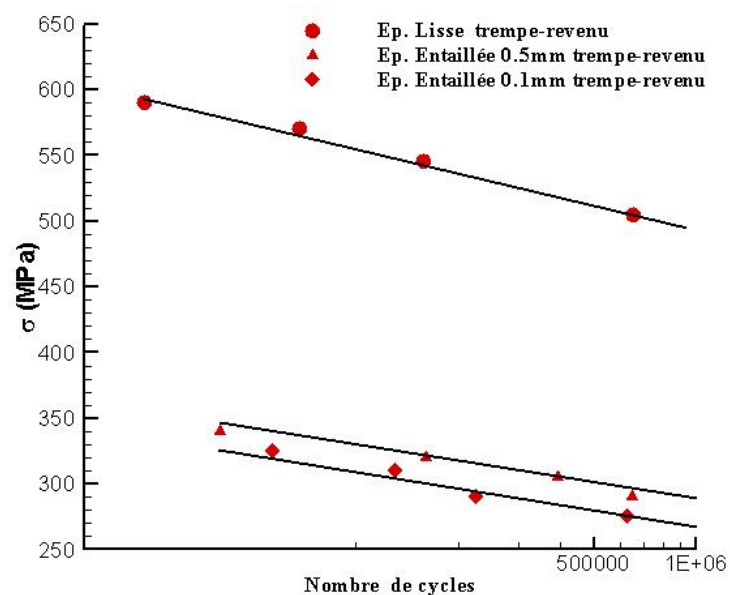


Figure 3.8 : Effet d'entaille avec trempe-revenu

3-2-3-3 Effet du traitement thermique pour éprouvettes lisses

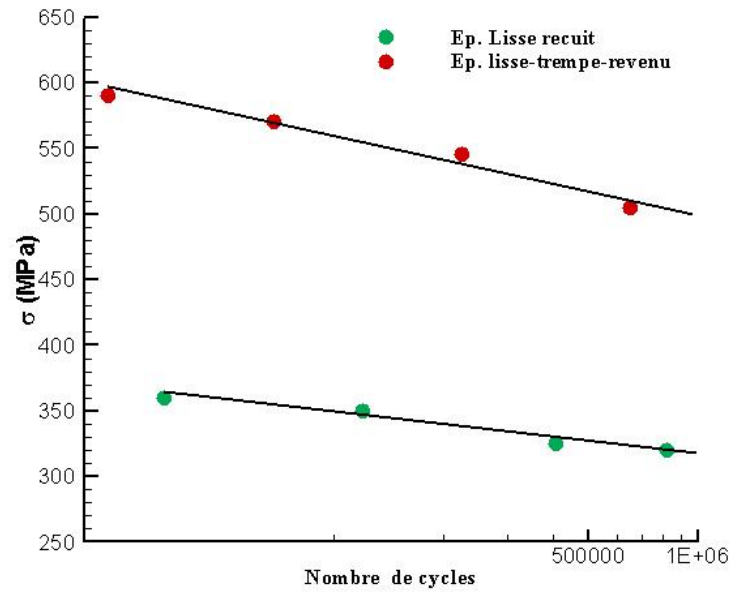


Figure 3.9 : Effet du traitement thermique pour éprouvettes lisses

3-2-3-4 Effet du traitement thermique sous entaille $\rho = 0,5$ mm

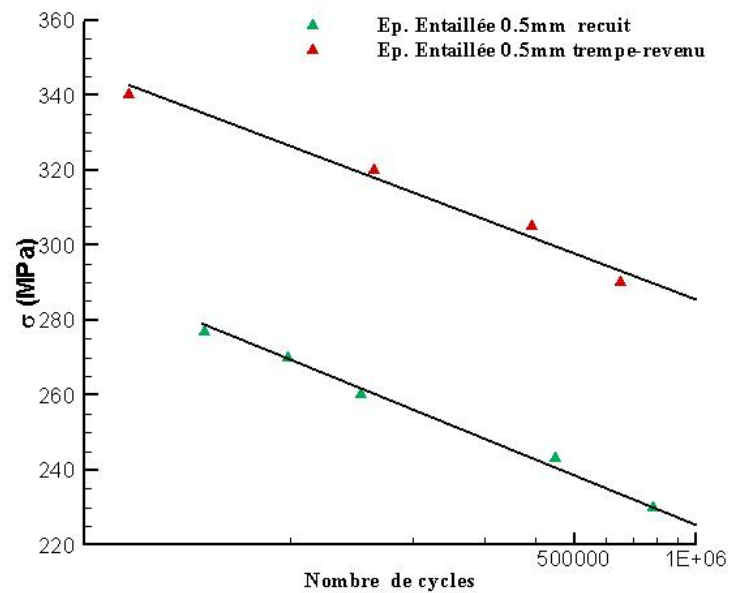


Figure 3.10 : Effet du traitement thermique sous entaille pour $\rho = 0,5$ mm

3-2-3-5 Effet du traitement thermique sous entaille avec $\rho = 0,1$ mm

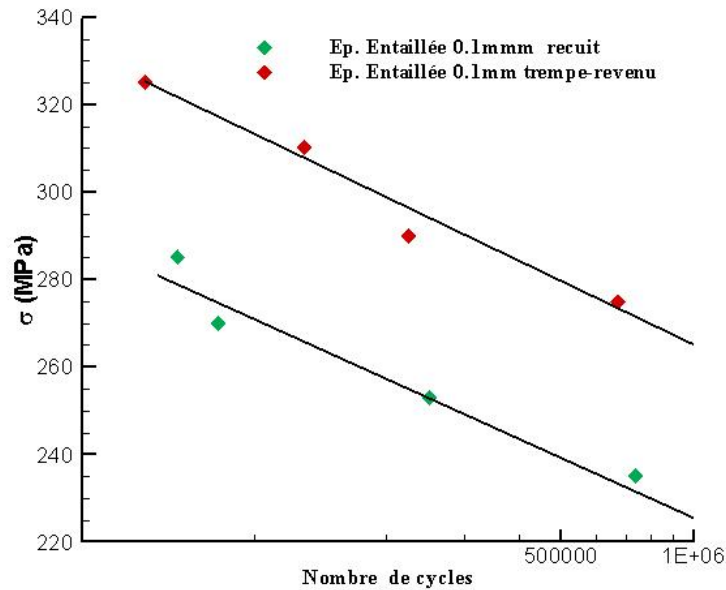


Figure 3.11 : Effet du traitement thermique sous entaille pour $\rho=0,1$ mm

3-2-4 Dépouillement des résultats pour l'acier 30NC11

Dans ce paragraphe, nous allons discuter les résultats relatifs à l'acier 30NC11 et calculer les paramètres caractérisant l'effet d'entaille. Nous pouvons résumer quelques données dans le tableau suivant :

L'effet du traitement thermique peut être quantifié grâce au rapport $R_{D,th}$ des limites d'endurance.

Etat \ ρ (mm)	∞	0,5	0,1
	Recuit	318	226
Trempe-revenu	500	286	266
$R_{D,th}$	1,57	1,26	1,17

Tableau 3-8 : Limite d'endurance (MPa) pour différents états et acuités

Les résultats permettent de conclure que le gain sur l'endurance apporté par ce type de traitement thermique pour les petits rayons d'entailles est le plus faible. Le processus d'endommagement est dans ce cas le plus sévère.

3-2-4-1 Paramètres caractéristiques

Dans le cas de présence d'entailles et en fatigue, les premiers paramètres à mettre en évidence sont le facteur de concentration de contrainte K_t , le facteur de concentration de contrainte en fatigue K_f et le facteur de sensibilité à l'entaille q .

Dans le cas de pièces en flexion rotative, pour le calcul du facteur de concentration de contrainte, on utilise la relation due à Neuber et Peterson cité par **Cazaud 1969** et donnée par

$$K_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{A \frac{2\rho}{D-d} + B \frac{2\rho(1 + 2\frac{\rho}{d})^2}{d}}} \quad (3-1)$$

D= diamètre extérieur de la pièce

d=diamètre en fond d'entaille

ρ = rayon d'entaille

A et B = facteurs dépendant de la géométrie et d la sollicitation. Dans notre cas A=0,25 et B=1,80.

Pour le facteur de concentration de contrainte en fatigue K_f , nous utilisons la relation 1-6 du chapitre 1

$$K_f = \frac{\sigma_{dN}}{\hat{\sigma}_{dN}} \quad (3-2)$$

Où

σ_{dN} est la limite de fatigue pour une éprouvette lisse et

$\hat{\sigma}_{dN}$ est la limite de fatigue pour une éprouvette entaillée.

Pour le calcul du facteur de sensibilité à l'entaille, nous utilisons la relation q_2 de Yen & Dolan présentée au chapitre 1 (équation 1-8) pour sa simplicité. Il est établi aussi qu'elle donne une meilleure corrélation en fonction du rayon à fond d'entaille. Cet avantage n'a pas d'effet dans le cas de notre étude étant donné que le travail concerne deux acuités, soit $\rho=0,1$ et $\rho=0,5$ mm.

$$q_2 = \frac{K_f}{K_t} \quad (3-3)$$

Nous regroupons dans le tableau ci dessous, les différents résultats obtenus

Etat	ρ (mm)	σ_{dN} (MPa)	K_t	K_f	q_2
Recuit	∞	318	1	1	1
	0,5	226	2,55	1,41	0,55
	0,1	227	4,72	1,40	0,3
Trempe -revenu	∞	500	1	1	1
	0,5	285	2,55	1,75	0,7
	0,1	266	4,72	1,88	0,4

Tableau 3-9 : Valeurs caractéristiques pour l'acier 30NC11

A la lumière des résultats obtenus, nous proposons les facteurs de sensibilité à l'entaille relatifs au modèle de **Heywood 1952** sous la forme :

-Pour l'état recuit, la relation proposée confirme les coefficients $a=0.328$ et $b=0.26$ donnant la forme de q_{2H} suivante :

$$q_{2H} = \frac{1}{1 + \frac{0,328}{(0,26\rho)^{0,5}}} \quad 3-4$$

-Pour le traitement thermique avec trempe-revenu, nous proposons les coefficients a=0.15 et b=0.26 donnant la forme de q_{2H} suivante:

$$q_{2H} = \frac{1}{1 + \frac{0,15}{(0,26\rho)^{0,5}}} \quad 3-5$$

3-3 Cas de l'acier 16NC6

Cette partie de l'étude concerne les essais réalisés sur l'acier allié 16NC6. La procédure sera celle suivie pour l'acier 30NC11.

3-3-1 Eprouvettes à l'état recuit

3-3-1-1 Eprouvettes lisses à l'état recuit

La première courbe Fig 3-12, représente la courbe d'endurance pour une éprouvette lisse à l'état recuit, obtenue a partir des résultats du tableau 3-10

Contrainte	N Nombres de cycles à rupture		
	σ [MPa]	Test 1	Test 2
360	45000	40000	25000
350	130000	135000	75000
340	425000	460000	350000
330	770000	900000	820000

Tableau 3-10 : contrainte-nombres de cycles à rupture pour éprouvettes lisses à l'état recuit

La première courbe de cette série concerne des éprouvettes lisses de diamètre net de 8mm. La limite d'endurance σ_{dN} est estimée à 329 MPa.

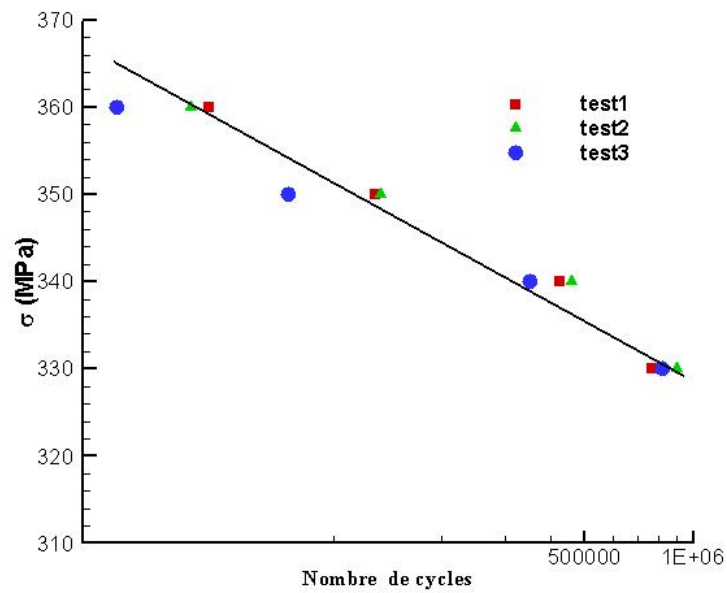


Figure 3-12 : Courbe d’endurance pour éprouvettes lisses à l’état recuit

3-3-1-2 Eprouvette entaillées l’état recuit avec $\rho=0,5$

La Figure 3-13, représente la courbe d’endurance pour une éprouvettes entaillées de rayon d’entaille égal $\rho=0,5$, à l’état recuit, obtenue à partir des résultats du tableau 3-11

Contrainte σ [MPa]	N Nombres de cycles à rupture		
	Test 1	Test 2	Test 3
290	55000	50000	65000
280	130000	129000	110000
275	105000	225000	150000
265	570000	500000	450000
250	820000	870000	780000

Tableau 3-11 : contrainte-nombres de cycles à rupture pour éprouvettes entaillées ($\rho=0,5$) à l’état recuit

La courbe ci-dessous concerne des éprouvettes entaillées de diamètre net de 8mm et d’acuité $\rho=0,5$ mm. La limite d’endurance $\hat{\sigma}_{dN}$, en contrainte globale, est estimée à 257 MPa.

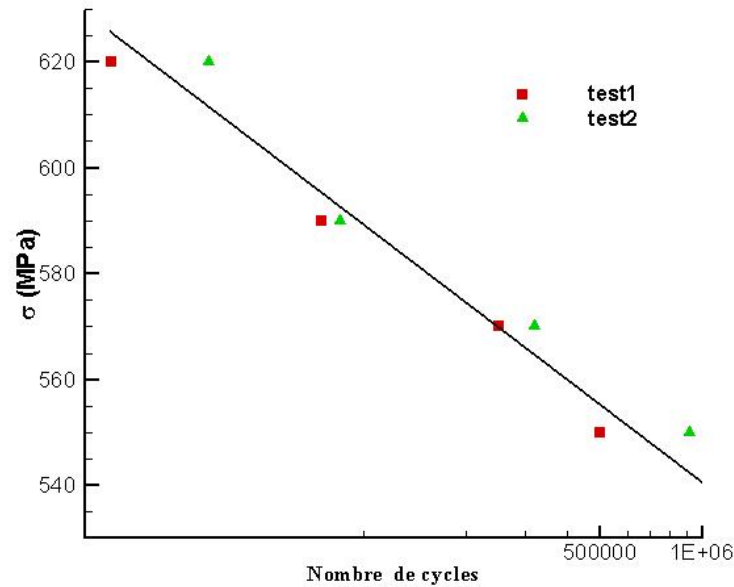


Figure 3-14 : Courbe d'endurance pour éprouvettes lisses avec trempe-revenu

3-3-2-2 Epreuve entaillée ($\rho=0,5$ mm) avec trempe-revenu

La Figure 3-15, représente la courbe d'endurance pour une éprouvettes entaillées de rayon d'entaille égal $\rho=0,5$, ayant subi un traitement de trempe-revenu, obtenue à partir des résultats du tableau 3-13

Contrainte σ [MPa]	N Nombres de cycles à rupture	
	Test 1	Test 2
345	50000	40000
320	265000	170000
310	290000	500000
295	600000	800000

Tableau 3-13 : contrainte-nombres de cycles à rupture pour éprouvettes entaillées ($\rho=0,5$) avec trempe-revenu

La courbe 3-15 représente la zone de fatigue limité relative à la courbe de Wohler pour l'éprouvette entaillée d'acuité $r=0,5$ mm et de diamètre net égal à 8mm ayant subi un traitement de trempe-revenu. La limité d'endurance $\hat{\sigma}_{dN}$ est estimée à 295 MPa.

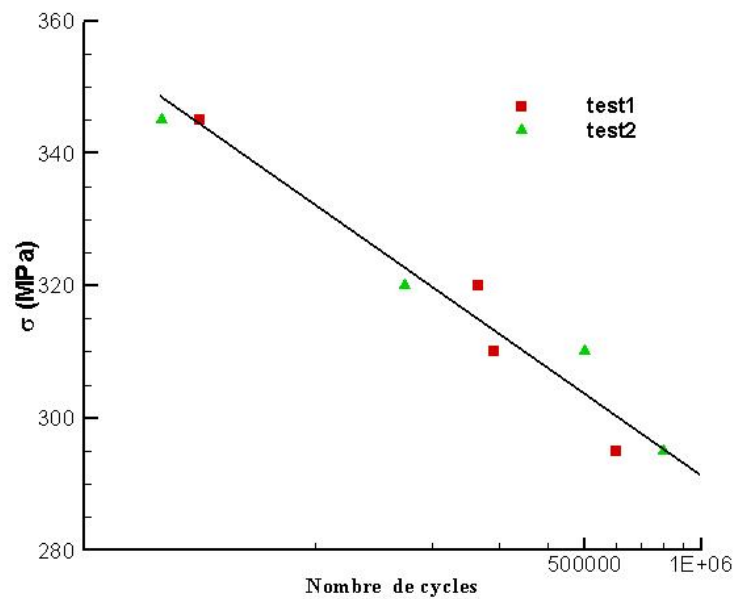


Figure 3-15 : Courbe d'endurance pour éprouvettes entaillées ($\rho=0,5$) avec trempe-revenu

3-3-3 Etude comparative pour l'acier 16NC6

Dans ce qui suit, nous allons réaliser une étude comparative des effets des paramètres étudiés au paragraphes précédent concernant l'acier 16NC6.

3-3-3-1 Effet d'entaille pour l'état recuit

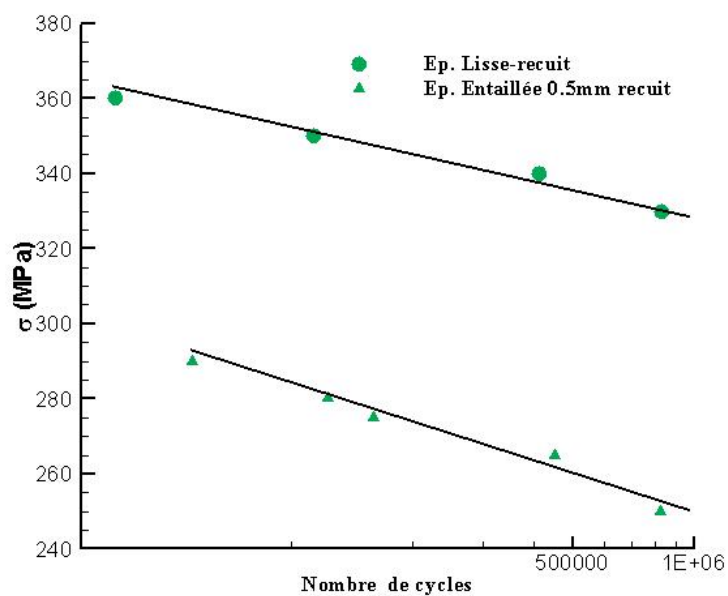


Figure 3.16 : Effet d'entaille à l'état recuit

3-3-3-2 Effet d'entaille avec trempe-revenu

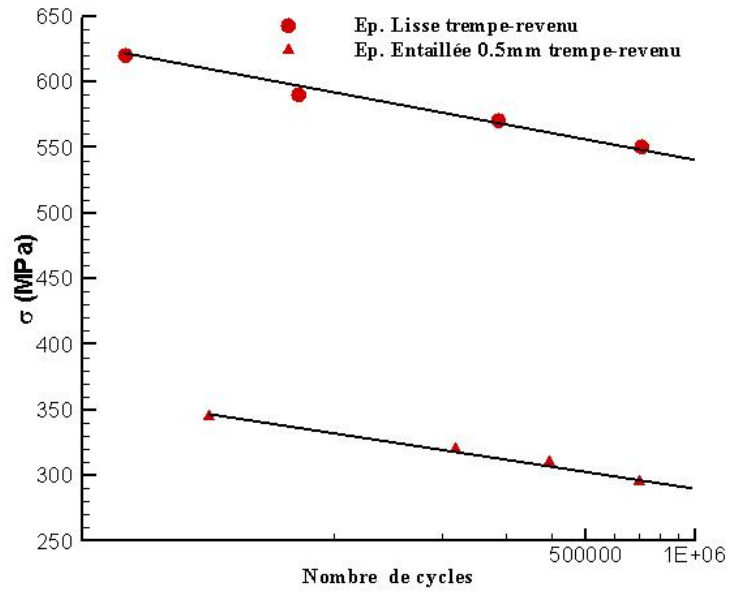


Figure 3.17 : Effet d'entaille avec trempe revenu

3-3-3-3 Effet du traitement thermique pour éprouvettes lisses

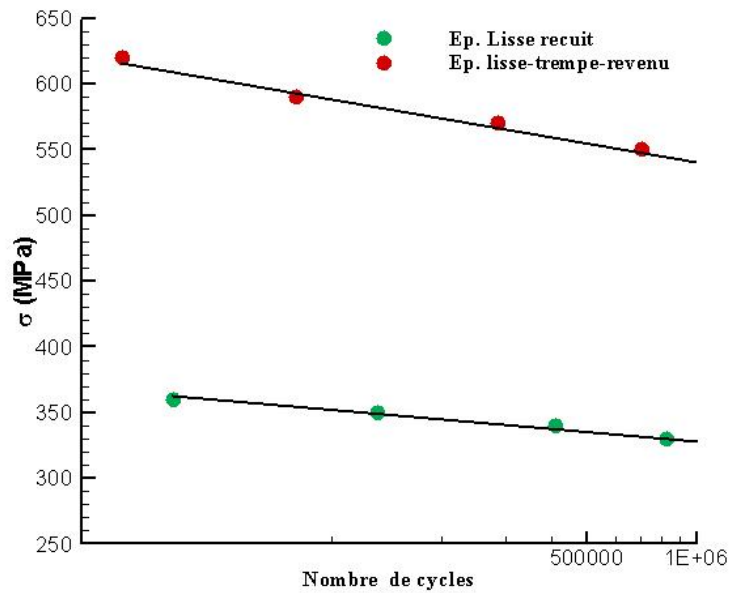


Figure 3.18 : Effet du traitement thermique pour éprouvettes lisses

3-3-3-4 Effet du traitement thermique sous entaille

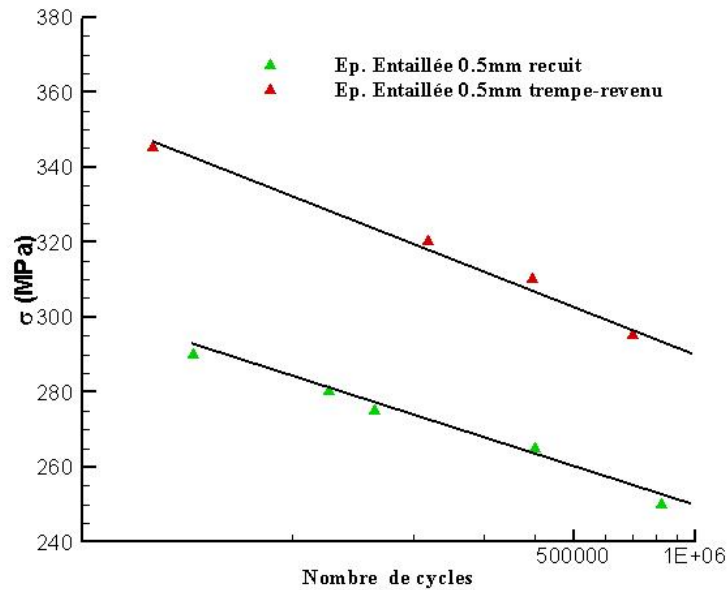


Figure 3.19 : Effet du traitement thermique sous entaille pour $\rho=0,5$ mm

3-3-4 Dépouillement des résultats pour l'acier 16NC6

Nous reprenons les résultats précédents sous la forme du tableau suivant:

Etat \ ρ (mm)	∞	0,5
	Recuit	329
Trempe-revenu	540	295
R_{Dth}	1,64	1,15

Tableau 3-14 : Limite d'endurance (MPa) pour différents états et acuités

L'amélioration de la limite d'endurance dans le cas de cette nuance, dans le cas d'éprouvettes entaillées, n'est pas du même ordre que celle obtenue pour la nuance précédent malgré la similitude des caractéristiques. Il reste à confirmer par des essais complémentaires. Par contre, dans le cas des éprouvettes lisses, le taux d'augmentation est supérieur.

Etat	ρ (mm)	σ_{dN} (MPa)	K_t	K_f	q_2
Recuit	∞	329	1	1	1
	0,5	257	2,55	1,28	0,5
Trempe-revenu	∞	540	1	1	
	0,5	295	2,55	1,93	0,76

Tableau 3-15 : Valeurs caractéristiques pour l'acier 16NC6

A la lumière des résultats obtenus, nous proposons les facteurs de sensibilité à l'entaille relatifs au modèle de Heywood sous la forme :

-Pour l'état recuit, la relation proposée confirme les coefficients $a=0.328$ et $b=0.26$ donnant la forme de q_{2H} suivante :

$$q_{2H} = \frac{1}{1 + \frac{0,328}{(0,26\rho)^{0,5}}} \quad 3-6$$

-Pour le traitement thermique avec trempe-revenu, nous gardons les mêmes coefficients trouvés pour l'acier 30NC11 malgré une légère différence de 7%. La relation reste donc inchangée.

$$q_{2H} = \frac{1}{1 + \frac{0,15}{(0,26\rho)^{0,5}}} \quad 3-7$$

Conclusion

Les essais réalisés en fatigue sous entailles et éprouvettes lisses, à l'état recuit ou ayant subi des traitements de trempe-revenu ont permis de dégager certains résultats que nous pouvons résumer comme suit :

Les limites d'endurance à un million de cycles ont pu être déduits grâce aux courbes d'endurance. Ces valeurs peuvent être jugées satisfaisantes.

Les traitements thermiques réalisés permettent un gain sur la limite d'endurance. Ce taux est plus faible pour l'entaille à 0,1mm par rapport à 0,5mm.

Le modèle du facteur de sensibilité de Heywood a pu être identifié grâce à ses paramètres a et b . Les modèles pour les aciers 30NC11 et 16NC6 ont été établies pour les états recuit et trempe-revenu sont proposées avec les mêmes relations.

Chapitre 4
Endommagement sous
chargements constants
et variables sous
entailles

Introduction

Les essais cycliques provoquent une dégradation du matériau définie aussi par l'endommagement. L'accès à la quantification de l'endommagement peut être réalisé avec plusieurs moyens. De plus, le processus d'accumulation de l'endommagement pendant l'histoire du chargement peut être réalisée avec plusieurs modèles. Le modèle linéaire de Palmgren-Miner (cité par *Lemaitre 1996*) est le plus simple.

Dans cette étude, la chute de la résistance est le paramètre choisi pour quantifier l'endommagement. Dans ce chapitre, on s'intéresse au phénomène de l'endommagement. L'acier 30NC11 ayant fait l'objet du chapitre 3 est utilisé dans est utilisé dans cette étude. Les caractéristiques géométriques des éprouvettes sont celles présentées au chapitre 2.

4-1 Contrainte de rupture sur éprouvette lisse

Trois essais de rupture sur éprouvettes non endommagées ont été réalisés et sont considérées comme des éprouvettes vierges et de référence. Le tableau suivant donne la contrainte de rupture.

N° essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
1	31,1	620
2	31,4	625
3	30,9	615

Tableau 4-1 : Contrainte de rupture sur éprouvette lisse $\phi=8\text{mm}$

4-2 Contrainte de rupture sur éprouvette entaillée

Trois essais de rupture sur éprouvettes entaillées non endommagées présentant une acuité de 0,5 mm ont été réalisés. Les contraintes de rupture apparentes sont supérieures à celles réalisées sur éprouvettes lisses. L'augmentation de la charge de rupture que nous remarquons est due au phénomène de triaxialité des contraintes *Cazaud 1969*

N° essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
1	44,9	895
2	45,6	906
3	44,8	891

Tableau 4-2 : Contrainte de rupture sur éprouvette entaillée $\phi=8\text{mm}$, $\rho=0,5\text{mm}$

Les valeurs des contraintes de rupture portées sur les tableaux 4-1 et 4-2 seront prises comme valeurs de référence pour quantifier l'endommagement.

La valeur moyenne de référence de la contrainte de rupture pour l'éprouvette entaillée est estimée à 897 MPa.

Remarquons que la contrainte nominale calculée maximale augmente avec la sévérité de l'entaille. Cette augmentation s'explique en notant qu'en présence d'une entaille, l'état de contrainte n'est plus monoaxial mais triaxial. Les contraintes de traction dans le plan perpendiculaire à l'axe de mise en charge bloquent l'écoulement plastique et permettent une contrainte nominale plus élevée. Par analogie, c'est le même phénomène qui se manifeste

dans le cas de la striction ou un état de contrainte triaxial analogue à celui d'une éprouvette entaillée se développe et tend à élever la contrainte apparente d'écoulement
Les éprouvettes entaillées se sont rompues à des niveaux de déformation plus bas que les éprouvettes lisses.

4-3 Endommagement sous entaille à un niveau de contrainte avec $\sigma=162$ MPa

Le processus d'endommagement consiste à soumettre l'éprouvette pendant un nombre de cycles fixé et au niveau de contrainte fixé égal à 162MPa. L'éprouvette est ensuite rompue par traction.

4-3-1 Endommagement sur 100 000 cycles

La première série d'essais correspond à un endommagement sans surcharge avec un niveau de contrainte $\sigma= 162$ MPa pendant un nombre de cycles $N=100\ 000$ cycles.

N° essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
1	41,0	817
2	40,5	806
3	40,9	815
4	41,5	826
5	41,4	824
6	41,3	822

Tableau 4-3 : Contrainte de rupture sur éprouvette entaillée $\phi=8$ mm, $\rho=0,5$ mm après endommagement sur 100 000 cycles sous $\sigma=162$ MPa

La valeur moyenne de la contrainte de rupture pour l'éprouvette entaillée endommagée est égale à 818 MPa.

Le taux d'endommagement peut être estimé à 9%

4-3-2 Endommagement sur 200 000 cycles

La série d'essais correspond à un endommagement sans surcharge avec un niveau de contrainte $\sigma= 162$ MPa pendant un nombre de cycles $N=200\ 000$ cycles

N° essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
1	36,2	719
2	35,8	712
3	36,2	719
4	34,8	691
5	35,6	707
6	35,3	702

Tableau 4-4 : Contrainte de rupture sur éprouvette entaillée $\phi=8$ mm, $\rho=0,5$ mm après endommagement sur 200 000 cycles sous $\sigma=162$ MPa

La contrainte de rupture moyenne après endommagement sur 200000 cycles avec un niveau de contrainte de 162 MPa est estimée à 708 MPa, ce qui représente un taux d'endommagement de 21 %.

4-3-3 Endommagement sur 300 000 cycles

La série d'essais correspond à un endommagement sans surcharge avec un niveau de contrainte $\sigma = 162$ MPa pendant un nombre de cycles $N = 200\ 000$ cycles

N° essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
1	32,3	644
2	33,0	657
3	31,8	635
4	32,8	653
5	31,4	625

Tableau 4-5 : Contrainte de rupture sur éprouvette entaillée $\phi = 8$ mm, $\rho = 0,5$ mm après endommagement sur 300 000 cycles sous $\sigma = 162$ MPa

La contrainte de rupture moyenne après endommagement sur 300000 cycles avec un niveau de contrainte de 162 MPa est estimée à 643 MPa, ce qui représente un taux d'endommagement de 28 %.

A partir des résultats ci-dessus, il est possible de tracer le taux d'endommagement en fonction du nombre de cycles. Pour les faibles nombres de cycles, nous pouvons conclure que le dommage D évolue linéairement. Le cumul de dommage linéaire reste donc valable dans les conditions réalisées. Ces résultats peuvent constituer un moyen de réaliser des essais accélérés. L'extrapolation de la droite pour $D = 1$ (ruine) donne un nombre de cycles de 10^6 , correspondant au nombre de cycles pour le calcul de la limite d'endurance. Il est néanmoins dangereux d'extrapoler la droite jusqu'à $D = 1$.

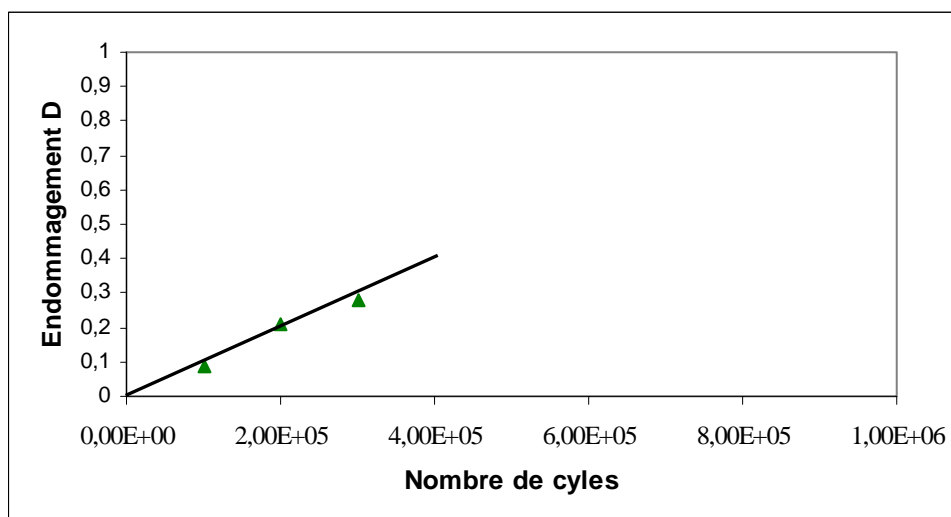


Figure 4.1 : Evolution de l'endommagement sous 162 MPa constante sous entaille ($\rho = 0,5$ mm)

4-4 Endommagement sur éprouvettes entaillées $\rho=0,5$ à deux niveaux de charge croissants

Le processus d'endommagement est lié à l'histoire du chargement. Dans la suite de l'étude, on peut mettre en évidence par les essais réalisés avec les deux niveaux de chargement $\sigma=162$ MPa et $\sigma=227$ MPa dans un ordre croissant, l'évolution de l'endommagement.

4-4-1 Endommagement sur 100 000 cycles

Cette série d'essais correspond à un endommagement avec surcharge s'étalant sur 100 000 cycles avec deux niveaux de contrainte. Le premier, avec un niveau $\sigma=162$ MPa pendant 50 000 cycles. Le deuxième, avec un niveau $\sigma=227$ MPa sur les 50 000 cycles restant.

N° essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
1	38,4	764
2	37,8	753
3	38,2	760
4	37,8	753
5	38,7	770
6	39,1	778

Tableau 4-6 : Contrainte de rupture sur éprouvette entaillée $\phi=8$ mm, $\rho=0,5$ mm après endommagement sur 100 000 cycles sous $\sigma=162$ MPa et $\sigma=227$ MPa croissants

La valeur moyenne de la contrainte de rupture pour l'éprouvette entaillée endommagée est égale à 763 MPa.

Le taux d'endommagement peut être estimé à 15 %.

4-4-2 Endommagement sur 200 000 cycles

Nous reprenons le chargement à deux niveaux de contrainte. Le nombre de cycles total est de 200 000. Un niveau de contrainte $\sigma=162$ MPa est appliqué pendant les 100 000 premiers cycles. Le deuxième niveau de contrainte $\sigma=227$ MPa est appliqué pendant les derniers cycles. Dans le tableau suivant, nous représentons les contraintes de rupture après endommagement

N° essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
1	31,2	621
2	31,9	633
3	32,8	651
4	32,7	649
5	32,2	640
6	31,0	616

Tableau 4-6 : Contrainte de rupture sur éprouvette entaillée $\phi=8$ mm, $\rho=0,5$ mm après endommagement sur 200 000 cycles sous $\sigma=162$ MPa et $\sigma=227$ MPa croissants

La contrainte de rupture moyenne après endommagement sur 200 000 cycles avec les deux niveaux de chargement est estimée à 635 MPa, ce qui représente un taux d'endommagement de 30 %.

4-4-3 Endommagement sur 300 000 cycles

Nous reprenons le chargement à deux niveaux de contrainte. Le nombre de cycles total est de 300 000. Un niveau de contrainte $\sigma=162$ MPa est appliqué pendant les 150 000 premiers cycles. Le deuxième niveau de contrainte $\sigma=227$ MPa est appliqué pendant les derniers cycles. Dans le tableau suivant, nous représentons les contraintes de rupture après endommagement

N° essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
1	25,3	503
2	25,8	513
3	25,7	511
4	26,0	517
5	24,8	496

Tableau 4-7 : Contrainte de rupture sur éprouvette entaillée $\phi=8$ mm, $\rho=0,5$ mm après endommagement sur 300 000 cycles sous $\sigma=162$ MPa et $\sigma=227$ MPa croissants

La contrainte de rupture moyenne après endommagement sur 300 000 cycles avec les deux niveaux de chargement est estimée à 508 MPa, ce qui représente un taux d'endommagement de 43,3 %.

A partir des résultats ci-dessus, il est possible de tracer le taux d'endommagement en fonction du nombre de cycles. Pour les faibles nombres de cycles, nous pouvons conclure que le dommage D évolue linéairement. Le cumul de dommage linéaire reste donc valable. Dans ce cas, nous pouvons remarquer que le processus d'endommagement est accéléré. La valeur de 227 MPa peut être la cause du fort taux d'endommagement

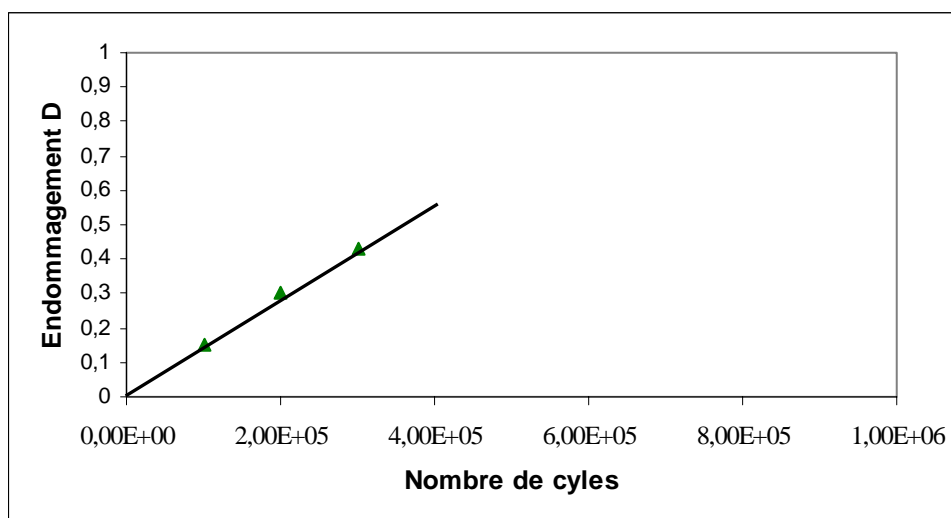


Figure 4.2 : Evolution de l'endommagement sous charge croissante sous entaille ($\rho=0,5$ mm)

4-5 Endommagement sur éprouvettes entaillées $\rho=0,5$ à deux niveaux de charge décroissants

L'évolution de l'endommagement dans un processus de chargement décroissant, $\sigma=227$ et $\sigma=162$ MPa appliqués d'une façon égale pendant 100 000, 200 000 et 300 000 cycles.

4-5-1 Endommagement sur 100 000 cycles

Cette série d'essais correspond à un endommagement avec un premier niveau de contrainte $\sigma=227$ MPa appliqué pendant 50 000 suivi par un autre bloc à $\sigma=162$ MPa pendant 50 000 cycles. Le tableau ci-dessous regroupe les charges de rupture après endommagement

N° essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
1	37,2	740
2	36,4	726
3	35,4	704
4	36,3	724
5	37,1	739

Tableau 4-8 : Contrainte de rupture sur éprouvette entaillée $\phi=8\text{mm}$, $\rho=0,5\text{mm}$ après endommagement sur 100 000 cycles sous $\sigma=227$ MPa et $\sigma=162\text{MPa}$ décroissants

La valeur moyenne de la contrainte de rupture pour l'éprouvette entaillée endommagée est égale à 727 MPa. Le taux d'endommagement peut être estimé à 19 %

4-5-2 Endommagement sur 200 000 cycles

Cette série d'essais correspond à un endommagement avec un premier niveau de contrainte $\sigma=227$ MPa appliqué pendant 100 000 suivi par un autre bloc à $\sigma=162$ MPa pendant 100 000 cycles. Le tableau ci-dessous regroupe les charges de rupture après endommagement

N° essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
1	29,3	583
2	30	595
3	29,6	587
4	30,7	610
5	29	583
6	29,2	581

Tableau 4-9 : Contrainte de rupture sur éprouvette entaillée $\phi=8\text{mm}$, $\rho=0,5\text{mm}$ après endommagement sur 200 000 cycles sous $\sigma=227$ MPa et $\sigma=162\text{MPa}$ décroissants

La valeur moyenne de la contrainte de rupture pour l'éprouvette entaillée endommagée est égale à 592 MPa. Le taux d'endommagement peut être estimé à 34 %.

4-5-3 Endommagement sur 300 000 cycles

La dernière série d’essais d’endommagement correspond à un premier niveau de contrainte $\sigma=227$ MPa appliqué pendant 150 000 suivi par un autre bloc à $\sigma=162$ MPa pendant 150 000 cycles. Le tableau ci-dessous regroupe les charges de rupture après endommagement

N° essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
1	23,7	473
2	24,2	482
3	23,2	461
4	24,4	486
5	25,6	457

Tableau 4-11 : Contrainte de rupture sur éprouvette entaillée $\phi=8$ mm, $\rho=0,5$ mm après endommagement sur 300 000 cycles sous $\sigma=227$ MPa et $\sigma=162$ MPa décroissants

La valeur moyenne de la contrainte de rupture pour l’éprouvette entaillée endommagée est égale à 472 MPa. Le taux d’endommagement peut être estimé à 47,3 %.

A partir des résultats ci-dessus, il est possible de tracer le taux d’endommagement en fonction du nombre de cycles. Pour les faibles nombres de cycles, nous pouvons conclure que le dommage D évolue linéairement. Le cumul de dommage linéaire reste donc valable. Nous pouvons remarquer que le processus d’endommagement est accéléré. Nous pouvons remarquer que la courbe est plus raide que celle à charge croissante, ce qui montre un endommagement plus prononcé. L’effet du mode de chargement est bien mis en évidence. Au-delà d’un certain niveau, on peut estimer que le processus de cumul du dommage ne peut être pris en compte par un modèle linéaire

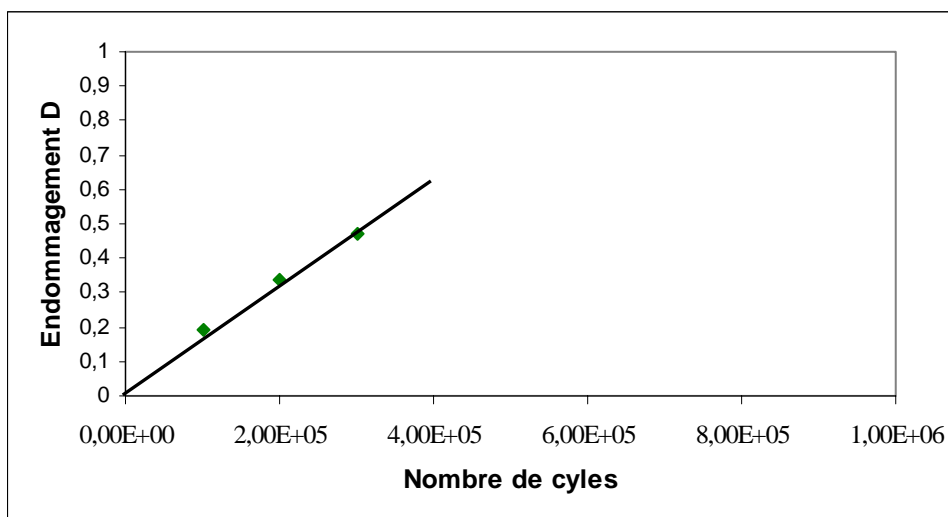


Figure 4.3 : Evolution de l’endommagement sous charge décroissante sous entaille ($\rho=0,5$ mm)

Conclusion

Le processus d'endommagement est mis en évidence en utilisant la chute de la résistance de la traction comme paramètre pour mesurer le dommage. Le modèle linéaire de cumul de dommage est mis en évidence pour des nombres de cycles allant de 100 000 jusqu'à 300 000 cycles. Pour des chargements à un niveau de contrainte modéré, les courbes peuvent être extrapolées jusqu'à $D=1$ et donnent un nombre de cycles de 10^6 . Par contre, les chargements avec deux niveaux contraintes, dont l'un peut être considéré comme un taux assez élevé, la courbe ne peut plus être extrapolée vers les grands nombres de cycles.

Conclusion générale

Cette étude a été consacrée à l'exploration des facteurs pouvant influencer l'endurance et ce particulièrement en présence d'entaille. Les essais ont été menés sur des éprouvettes lisse et entaillées. Deux nuances d'aciers, 30NC11 et 16NC6, ont été utilisées. Ils ont subi des traitements thermiques de trempe-revenu pour l'étude de l'influence des ces paramètres.

Les essais de fatigue en flexion rotative ont été menés sur des éprouvettes lisses et entaillées d'acuité $\rho=0,1$ et $0,5$ mm. Les limites d'endurance à 10^6 ont été déduites à partir des courbes de Wöhler tracées pour les deux nuances d'aciers et les acuités considérées.

Les limites d'endurance à un million de cycles ont pu être déduites grâce aux courbes d'endurances. Ces valeurs peuvent être jugées satisfaisantes.

Les traitements thermiques réalisés permettent un gain sur la limite d'endurance. Ce taux est plus faible pour l'entaille à $0,1$ mm par rapport à $0,5$ mm concernant l'acier 30NC11. Ce qui explique qu'il est plus important pour les pièces lisses.

Le rapport d'endurance, concernant l'acier 16NC6, entre la limite d'endurance des éprouvettes entaillées à l'état recuit et avec trempe revenu est plus faible par rapport à celui de l'acier 30NC11. Ces taux devraient être moins éloignés. Ceci est confirmé dans le cas des éprouvettes lisses.

Le modèle du facteur de sensibilité de Heywood a pu être identifié grâce à ses paramètres a et b . Les modèles pour les aciers 30NC11 et 16NC6 ont été établies pour les états recuit et trempe-revenu sont proposées avec les mêmes relations.

Pour le processus d'endommagement, la chute de la résistance est le paramètre choisi pour quantifier le dommage. L'acier 30NC11 a été dans ce but.

Les essais de rupture sur éprouvettes entaillées non endommagées présentant une acuité de $0,5$ mm ont été réalisés. Les contraintes de rupture apparentes sont supérieures à celles réalisées sur éprouvettes lisses. L'augmentation de la charge de rupture que nous remarquons est due au phénomène de triaxialité des contraintes [Cazaud] [8]

Le processus d'endommagement est mis en évidence en utilisant la chute de la résistance de la traction comme paramètre pour mesurer le dommage. Le modèle linéaire de cumul de dommage est mis en évidence pour des nombres de cycles allant de $100\ 000$ jusqu'à $300\ 000$ cycles avec un niveau de contrainte de 162 MPa. Pour des chargements à un niveau de contrainte modéré, les courbes d'endurance peuvent être extrapolées jusqu'à $D=1$ et donnent

Conclusion générale

un nombre de cycles de 10^6 correspondant à un endommagement $D=1$. Par contre, les chargements avec deux niveaux contraintes croissants, dont le plus fort peut être considéré comme un taux assez élevé, la courbe ne peut plus être extrapolée vers les grands nombres de cycles. Le processus d'endommagement dans le cas d'un chargement à deux niveaux décroissant a été mené. L'histoire de ce chargement est plus endommageant comme relevé dans la littérature et a pu être estimée à 5 % par rapport au premier.

Références bibliographiques

- B. Atzori, Filippi S., Lazzarin P., and F. Berto** « Stress distributions in notched structural components under pure bending and combined traction and bending» *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 28 (2005) , pp. 13-23.
- Barthelemy.** « Notions pratiques de mécanique de la rupture. » Editions: Eyrolles 1980.
- C. Bathias, J.P. Bailon.** « La fatigue des matériaux et des structures. » Presse de l'université de Montréal 1980.
- T. Boukharouba, T. Tamine, L. Niu, C. Chehimi et G. Pluinage.** « The use of notch stress intensity factor as a fatigue crack initiation parameter», *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 52 issue 3, (1995), pp-503-512
- A. Brand ; Sutterlin R.** « Calcul des pièces à la fatigue : méthode du gradient » CETIM, 1980.
- A. Brand** « Données technologiques sur la fatigue » Rapport d'étude du CETIM, 1989.
- A. Buch.** « Two parameters equation for the estimation of the notch effect for steel specimens with various notch shapes. » *Archiv. für eisenhüttenwesen* 45, n°5, 1974.
- Cazaud.** « La fatigue des métaux. » Editions: DUNOD 1969, pages: 326-327.
- M.D. Chapetti** «High-cycle fatigue of austempered ductile iron (ADI)» *International Journal of Fatigue* 29 (2007), pp.860-868
- Darrell F. Socie** « **Notch in Fatigue** » U. of Illinois at Urbana Champaign, 2002
- P. De la Cruz, T. Ericsson** «Influence of sea water on the fatigue strength and notch sensitivity of plasma nitrited B-Mn steel» *Materials Science & Engineering A247* (1998) pp 204-213.
- A.D. Deutschman; W.J. Michels; C.E. Wilson** «Machine Design: Theory and Practice» Macmillan Pub. Inc., 1975
- F. Ding, L. Feng, Y. Jiang** «Modeling of fatigue crack growth from a notch» *International Journal of Plasticity* 23 (2007), 1167-1188.
- Dmytrakh I. M., Pluinage G., and Qilafku G.** «On corrosion fatigue emanating from notches: Stress field and electrochemistry » *Materials Science, Vol. 37, No. 2, 2001*
- J.M. Dorlot, J.P. Bailon** «Des matériaux » Edition de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 2000.
- Doumi Adamou N.S.** «Quantification de l'endommagement en fatigue sous corrosion Sous entaille par essais de traction » Thèse de Magister, 2006, USTHB.
- A.M. Eleiche, M.M. Megahed, N.M. Abd-Allah** «Low-cycle fatigue in rotating cantilever under bending. III: Experimental investigations on notched specimens» *International Journal of Fatigue* 28 (2006) pp. 271-280.
- R.B Heywood.** « Designing by photo-elasticity. » Editions: Chapman & Hall, 1952.
- H. Itoga, K. Tokaji, M. Nakajima, H-N. Ko** «Effect of surface roughness on step-wise S-N characteristics in high strength steel» *International Journal of Fatigue* 25 (2003), pp. 379-385
- Krupp Ulrich** «Fatigue Crack Propagation in Metals and Alloys » Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 2007
- Kuhn and Hardrath.** « An engineering method for estimating notch size effect in fatigue tests on steel. », T. N. 2805, WASHINGTON, 1982.
- J. Lemaitre, J.L. Chaboche** « Mécanique des matériaux solides » Dunod, 1996.
- Y. Li Lee et al.** «Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice » Butterworth and Heinemann; 2005.
- Lieurade.** « La pratique de l'essai de fatigue. » PYC Editions 1982
- D. Mecheri** «Etude du facteur de sensibilité à l'entaille par un modèle utilisant le gradient de contrainte- Etude expérimentale et numérique» Thèse de Magister, 1996, E.N.P Alger,

- G. Meneghetti, L. Susmel, R. Tovo** «High-cycle fatigue crack paths in specimens having different stress concentration features» *Engineering Failure Analysis* 14 (2007) pp. 656-672.
- Neuber, N.E. Frost, K. Marsh, L.P. Pook.** «Metal fatigue. » Editions: Oxford University, London 1974.
- T.G. Pals, R.I. Stephens** «The influence of high R ratio on mild and sharp notched and unnotched fatigue behaviour of 1045 steel with three different heat treatments» *International Journal of Fatigue* 26 (2004) 651-661
- R.E. Peterson** «Notch sensitivity, Metal fatigue. » Editions: McGraw Hill, 1959.
- G. Pluinage** «Brève histoire de la mécanique de la rupture » Laboratoire de Fiabilité Mécanique, Université de Metz- ENIM.
- G. Pluinage** «Fatigue and fracture emanating from notch; the use of the notch stress intensity factor » *Nuclear Engineering and Design* 185 (1998) 173–184
- G. Pluinage** «Un siècle d'essai Charpy :De la résistance vive à la rupture à la mécanique de rupture d'entaille » *Mécanique et Industrie* 4 (2003), pp 197-212
- Qylafku G., Azari Z., Kadi N. , Gjonaj M., Pluinage G.** «Application of a new model proposal for fatigue life prediction on notches and key-seats» *International Journal of Fatigue* 21 (1999) 753–760
- S. Ravi, V. Balasubramanian, S. Babu, S. Nemat Nasser** «Assessment of some factors influencing the fatigue life of strength mis-matched HSLA steel weldments » *Materials & Design* 25 (2004) 125-135.
- [34] **Switek.** « Effect of notch parameters and of stress concentration on the fatigue of steel .» *Ifl Mitt.H* 11,1967.
- D. Taylor** « Geometrical effects in fatigue: a unifying theoretical model» *International Journal of Fatigue* 21 (1999), pp. 413–420.
- A.Thum, O.Svenson.** « Double notch effect. » *VDI Zeitschr*, 92, Nr 10, 1950.
- T.R. Vantiger, R.I. Stephens, M. Karadag** «The influence of high R ratio on notched fatigue behaviour of 1045 steel with three different heat treatments» *International Journal of Fatigue* 24 (2002) pp. 1275-1284
- Yen, Dolan.** « A critical review of the criteria for the notch sensitivity in fatigue of metals », *University of illinois bulletin*, vol. 49. no. 53, series 398, (1952).

16NC6. 30NC11 ()

q_i K_f (Heywood)

Résumé:

Le but de cette étude est l'exploration des facteurs pouvant influencer l'endurance et ce particulièrement en présence d'entailles. Les essais ont été menés sur des éprouvettes lisses et entaillées. Deux nuances d'aciers, 30NC11 et 16NC6, ont été utilisées. Les essais de fatigue ont été menés sur une machine de fatigue en flexion rotative. Les résultats des essais de fatigue sous entaille en utilisant différents types de traitements thermiques réalisés au laboratoire de traitement thermique sont présentés. Ces résultats concernent particulièrement les facteurs de sensibilité à l'entaille q_i et les paramètres du modèle de Heywood. Les essais à endommagement partiel menés sur des éprouvettes entaillées sont présentés. La perte de résistance en traction a été choisie pour quantifier l'endommagement. Les résultats sont présentés et discutés.

Mots clés: *Fatigue, entaille, flexion rotative, endommagement, sensibilité à l'entaille, traitement thermique*

Abstract:

The purpose of this study is to explore factors, particularly in the presence of notches, which are capable of affecting the endurance. The experiments were carried out on smooth and notched test-bars. Two variants of steel type 30NC11 and 16NC6 were used. The fatigue tests were carried out on a rotational and bending fatigue testing machine. The results of these fatigue tests, with the presence of notches and using various types of heat treatments carried out at the laboratory of heat treatment, were presented. These results particularly relate to the sensitivity factor to notch q_i and the parameters of the Heywood model. The tests with partial damage carried out on notched samples were presented. The loss of resistance in traction was selected to quantify the damage. The results are presented and discussed.

Key words: *Fatigue, rotating bending, smooth, notch, heat treatments, damage, sensitivity.*