

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur  
et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique  
Département de Génie Mécanique

**MEMOIRE**  
المكتبة — المكتبة  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

*Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état  
en Génie Mécanique*

**THEME**



**ETUDE EXPERIMENTALE  
DU PHENOMENE DE FATIGUE  
SOUS ENTAILLE  
EN FLEXION ROTATIVE**

Proposé par :

Mr Y.BELKACEMI  
Mr B.GUERGUEB

Présenté par:

*Toufik*  
Mr T.BOUDAUD  
Mr A.CHABANE  
*Adel*

Dirigé par:

Mr Y.BELKACEMI  
Mr B.GUERGUEB  
Mr D.MECHERI

PROMOTION  
Juillet - 1997

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'enseignement supérieur  
et de la recherche scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique  
Département de Génie Mécanique**

**MEMOIRE**

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

*Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état  
en Génie Mécanique*

**THEME**

**ETUDE EXPERIMENTALE  
DU PHENOMENE DE FATIGUE  
SOUS ENTAILLE  
EN FLEXION ROTATIVE**

**Proposé par :**

**Mr Y.BELKACEMI  
Mr B.GUERGUEB**

**Présenté par:**

**Mr T.BOUDAUD  
Mr A.CHABANE**

**Dirigé par:**

**Mr Y.BELKACEMI  
Mr B.GUERGUEB  
Mr D.MECHERI**

**PROMOTION  
Juillet - 1997**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## DEDICACES

*Je dédie ce travail à:*

*mes parents.*

*Adel*

## DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail à:*

*Ma famille:*

*mes parents,*

*mes frères et soeurs,*

*Assia et adorable fille Yasmine,*

*et je n'oublie pas tous mes amis.*

*Toufik*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## REMERCIEMENTS

*Nous ne saurions présenter ce travail sans exprimer nos remerciements à toute les personnes qui y ont contribués .*

*Nos remerciements vont particulièrement à messieurs :*

*Mr Y.BELKACEMI*

*Mr B.GUERGUEB*

*Pour leurs soutient constant et les conseils qu'ils nous ont prodigués au cours de ce travail.*

*Nos gratitudes vont aussi à Mr D.MECHERI pour les fructueuses discussions que nous avons eu sur le sujet de notre travail.*

*Nous remercions également Mr BELHADEF et Mr BOUAZIZ pour l'aide qu'ils nous ont apportés pour réaliser nos expériences, sans oublier les agents de l'atelier du département de genie-mécanique.*

## ملخص

نعرض في هذا الملخص نتائج تجريبية تظهر تأثير الخدوش على فولاذ من نوع 30NC11 ، تلقى معالجات حرارية مختلفة. أجريت تجارب إكلال بألة الليّ الدوراني على عينات مخدوشة، حيث أخذنا قيم مختلفة لحدّة الخدش. هذه العينات سواء كانت في حالة التلدين أو تلقت معالجة غمر أو معالجة غمر و مراجعة. نظهر تأثير الخدوش باستعمال معامل تركيز الإجهاد  $K_f$  ومعامل الحساسية للخدش في حالة الإكلال  $q$ .

## ABSTRACT

In this paper, we present experimental results concerning notch effect on a 30NC11 steel receiving different tamale treatments. Rotating bending fatigue tests have been carried out on notched specimens for different values of tip notch radius and under annealed, quenched and quenched-tempered states. Notch effect is characterised by the fatigue stress concentration factor  $K_f$  and the notch sensitivity factor  $q$ .

## RESUME

Nous presentons des résultats expérimentaux concernant l'effet d'entaille pour un acier de nuance 30NC11, subissant différents traitements thermiques. Des essais de flexion rotative ont été menées sur des éprouvettes entaillées de différentes acuités (i.e pour différentes valeurs du rayon en fond d'entaille) à l'état recuit, trempé et trempé-revenu. L'effet d'entaille est traduit par l'utilisation du facteur de concentration de contrainte en fatigue  $K_f$  et du facteur de sensibilité à l'effet d'entaille  $q$ .

# SOMMAIRE



## INTRODUCTION GENERALE.....1

### CHAPITRE I : NOTIONS ET PRATIQUE DE L'ESSAI DE FATIGUE

I-1 : généralités.....	6
I-2 : L'essai de fatigue .....	7
I-2-1: définitions et termes utilisés en fatigue .....	7
I-2-1-1 : contrainte de calcul.....	7
I-2-1-2 : cycle de contrainte .....	8
I-2-1-3 : limite de fatigue.....	9
I-2-1-4 : limite d'endurance.....	9
I-2-1-5 : rapport d'endurance.....	9
I-2-2 : classification des sollicitations des essais de fatigue.....	9
I-2-2-1 : essai sous amplitude constante.....	9
I-2-2-2 : essais sous amplitude variable.....	10
I-2-3 : classification des modes de sollicitation .....	11
I-2-4 : diagrammes représentatifs.....	12
I-2-4-1 : courbe de WOHLER.....	12
I-2-4-2 : courbe d'équiprobabilité de rupture .....	13
I-2-4-3 : diagramme d'endurance.....	15
I-2-5 : les éprouvettes d'essais .....	15
I-2-5-1 : forme des éprouvettes .....	15
I-2-5-2 : dimension des éprouvettes .....	16
I-2-5-3 : usinage des éprouvettes.....	17
I-2-6 : méthode statistique de détermination de la limite d'endurance	
I-2-6-1 : méthode des probits.....	18
I-2-6-2 : méthode d'essai en escalier (staircase).....	19
I-2-6-3 : tracé de la courbe de WOHLER.....	20

### CHAPITRE II : FACTEURS D'INFLUENCE SUR LA LIMITE DE FATIGUE

II-1 : influence des caractéristiques mécanique sur la tenue en fatigue...22
II-2 : effet d'entaille.....23
II-2-1 : concentration de contraintes.....24
II-2-2 : facteur de concentration de contrainte théorique, $K_t$ .....25
II-2-3 : facteur de concentration de contrainte en fatigue, $K_f$ ..... 27
II-2-4 : facteur de sensibilité à l'effet d'entaille.....27
II-3 : influence des facteurs métallurgiques sur la tenue en fatigue.....31

## CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE

III-1 : machine d'essai.....	34
III-1-1 : description de la machine d'essai.....	35
III-1-2 : chargement des éprouvettes.....	36
III-2 : les éprouvettes d'essai.....	37
III-2-1 : formes et dimension des éprouvettes.....	37
III-2-1-1 : éprouvettes lisses.....	37
III-2-1-2 : éprouvettes entaillées.....	37
III-2-2 : usinage des éprouvettes.....	38
III-3 : traitements thermiques.....	39
III-3-1 : recuit.....	39
III-3-2 : trempe.....	41
III-3-3 : trempe revenu .....	42
III-4 : méthode d'essai et de détermination de la limite d'endurance.....	43
III-5 : faciès de rupture .....	43
III-6 : résultats des essais .....	47
III-6-1 : résultats sur éprouvettes à l'état recuit.....	47
III-6-1-1 : éprouvette lisses.....	47
III-6-1-2 : éprouvettes entaillées, $r = 0.5 \text{ mm}$ .....	48
III-6-1-3 : éprouvettes entaillées, $r = 0.1 \text{ mm}$ .....	50
III-6-2 : résultats sur éprouvettes trempées-revenues.....	52
III-6-2-1 : éprouvettes lisses .....	52
III-6-2-2 : éprouvettes entaillées, $r = 0.5 \text{ mm}$ .....	53
III-6-2-3 : :éprouvait entaillées, $r = 0.1 \text{ mm}$ .....	55
III-6-3 : résultats sur éprouvettes trempées.....	57
III-6-3-1 : éprouvettes lisse .....	57
III-6-3-2 : éprouvettes entaillée, $r = 0.5 \text{ mm}$ .....	57
III-6-3-3 : éprouvettes entaillées, $r = 0.1 \text{ mm}$ .....	58
III-7 : exploitation des résultats expérimentaux .....	61
III-8 : conclusion.....	67

<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>68</b>
---------------------------------	-----------



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## INTRODUCTION GENERALE

## Introduction Générale

On sait, depuis longtemps déjà, que certaines pièces de machines, soumises à des efforts variables et répétés un grand nombre de fois, se rompent brusquement et sans déformation permanente annonciatrice de la rupture, tandis que les mêmes pièces soumises à des efforts constants souvent plus importants mais appliqués de façon continue, résistent correctement. Ainsi, du fait que les efforts sont variables, leur action est plus dangereuse.

On a appelé « fatigue » la cause, de cette défaillance à laquelle n'échappe aucun métal sous l'action des efforts variables.

Les recherches poursuivies sur la fatigue ont montré depuis longtemps l'insuffisance des essais ordinaires des métaux par traction, dureté, chocs...etc. Il est donc apparue indispensable de faire sur des éprouvettes et sur les pièces elles mêmes des essais dans des conditions aussi voisines que possible des conditions d'utilisation. De tels essais sont les essais d'endurance ou de fatigue.

En outre, les concentrations de contraintes provoquées par les changements brusques de sections, par les entailles, les trous,...etc; ont une influence prépondérante sur la tenue en fatigue.

Pour notre présent travail, une étude est faite sur l'influence de l'effet d'entaille sur la tenue en fatigue d'un acier faiblement allié (30NC11) ayant subi différents traitements thermiques, dont l'influence du rayon en fond d'une entaille circulaire de forme en « V », réalisée sur des éprouvettes cylindriques. L'essai est de flexion rotative. Nous avons cherché la limite d'endurance des éprouvettes entaillées en fonction de deux facteurs qui sont le rayon en fond d'entaille et la limite de rupture de l'acier par rapport aux

éprouvettes lisses. Cette variation est caractérisée par le facteur de concentration de contrainte en fatigue  $K_f$  et le facteur de sensibilité à l'effet d'entaille  $q$ .

Dans le chapitre I, nous présentons quelques notions et généralités sur l'essai de fatigue. On parlera des définitions utilisés dans l'essai, les différents types d'essais ainsi que les méthodes utilisées pour la détermination de la limite d'endurance.

Le chapitre II est consacré à l'étude des facteurs d'influence sur la tenue en fatigue. Nous étudions les concentrations de contraintes du point de vue de la théorie d'élasticité et leur influence en point de vue de fatigue. Nous citons aussi de l'influence des caractéristiques mécaniques et métallurgiques sur la tenue en fatigue.

Le chapitre III, est consacré à l'étude expérimentale, nous y exposons le déroulement de l'expérience même. Nous présentons les résultats des essais de flexion rotative menés sur les lisses et entaillées, cela pour différents traitements thermiques que nous avons fait subir à l'acier 30NC11.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale.

**CHAPITRE II**

**FACTEURS D'INFLUENCE SUR LA**

**LIMITE DE FATIGUE**

## I-1 GENERALITES :

Il est constaté et ce depuis fort longtemps, la ruine d'un certain nombre de structures, alors que celles ci ne sont soumises qu'à des sollicitations dynamiques jugées modestes par rapport aux capacités statiques des matériaux définies communément par leurs résistance à la rupture et leurs limites d'élasticité.

Le responsable est maintenant connu c'est l'endommagement par fatigue, phénomène à caractère insidieux, puisqu'il se développe lentement dans le temps sans modification apparente de la pièce .

L'endommagement par fatigue mené jusqu'à rupture (ou ruine), comprend trois périodes:

### a) Période de germination ou période d'amorçage :

Même si le maximum de la sollicitation extérieure est inférieur à la limite d'élasticité usuelle, localement au voisinage des défauts, les concentrations de contraintes créent des microdéformations plastique cycliques.

L'amorçage des microfissures de fatigue est difficile à mettre en évidence et à étudier. Suivant le matériau et le niveau de sollicitation divers mécanismes peuvent intervenir :

- Montée des dislocations s'accompagnant de formation de lacunes;
- Formation de bandes de glissement persistantes et décohésion souvent à la surface de l'échantillon;
- Mécanismes d'intrusion-extrusion .

Au cour de cette phase les défauts suivent le plus souvent des plans orientés à  $45^\circ$  de la direction de la contrainte principale maximale.

### b) Période de propagation :

Cette période peut elle même ,être scindée en deux phases distinctes :

#### stade 1 :

Les microfissures suivent les bandes de glissement dans lesquelles elles sont nées, en restant approximativement en parallèle au plan de scission maximale ,leur vitesse de propagation est alors très faible et leurs longueur n'intéresse au plus que quelques grains .

**stade 2 :**

Le champ des contraintes évoluant lorsque on pénètre à l'intérieur de la pièce, une des microfissures va quitter le plan de la scission maximale pour suivre le plan perpendiculaire à la contrainte de tension maximale et, par effet de décharge, va stopper la propagation de ses congénères.

La vitesse de propagation, d'abord très faible ( $\sim 10^{-4}$  um/cycle), va s'accroître progressivement jusqu'à atteindre quelques micromètres par cycle.

**c) Rupture brutale :**

Lorsque la fissure intéresse une section de la pièce telle que la section résiduelle est trop faible pour supporter les sollicitations appliquées, il se produit la rupture brutale.

**I-2- L'ESSAI DE FATIGUE :**

Les recherches poursuivies sur la fatigue ont montré depuis longtemps l'insuffisance des essais ordinaires des métaux par traction, dureté, choc...; on a donc été amené pour se mettre à l'abri des défaillances possibles du métal par suite de la fatigue, à calculer les pièces soumises à des efforts constants, mais en adoptant certains coefficients dits de sécurité.

En outre les concentrations de contraintes provoquées par les changements brusques de section, par les entailles, les trous..., ont une influence prépondérante sur la tenue des pièces soumises aux efforts variables.

Il est donc apparu indispensable de faire des éprouvettes et sur les pièces elles-mêmes des essais dans des conditions aussi voisines que possible des conditions d'utilisation. De tels essais sont les essais d'endurances ou de fatigue.

**I-2-1- Définitions et termes utilisés en fatigue :****I-2-1-1- Contrainte de calcul :**

En général, on se réfère à une contrainte nominale calculée par rapport à la section nette considérée, elle est habituellement calculée à l'aide des formules usuelles correspondant au domaine de déformation élastique.

**I-1-2-2 Cycle de contrainte :**

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

**-a) Contrainte maximale ( $\sigma_{\max}$ ) :**

Plus grande valeur algébrique prise périodiquement par la contrainte. Elle est considérée comme positive en traction et négative en compression.

**-b) Contrainte minimale ( $\sigma_{\min}$ ) :**

Plus petite valeur algébrique prise périodiquement par la contrainte.

**-c) Contrainte moyenne ( $\sigma_m$ ) :**

Moyenne algébrique des contraintes maximale et minimale :

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 \quad (I-1)$$

**-d) Amplitude de contrainte ( $\sigma_a$ ) :**

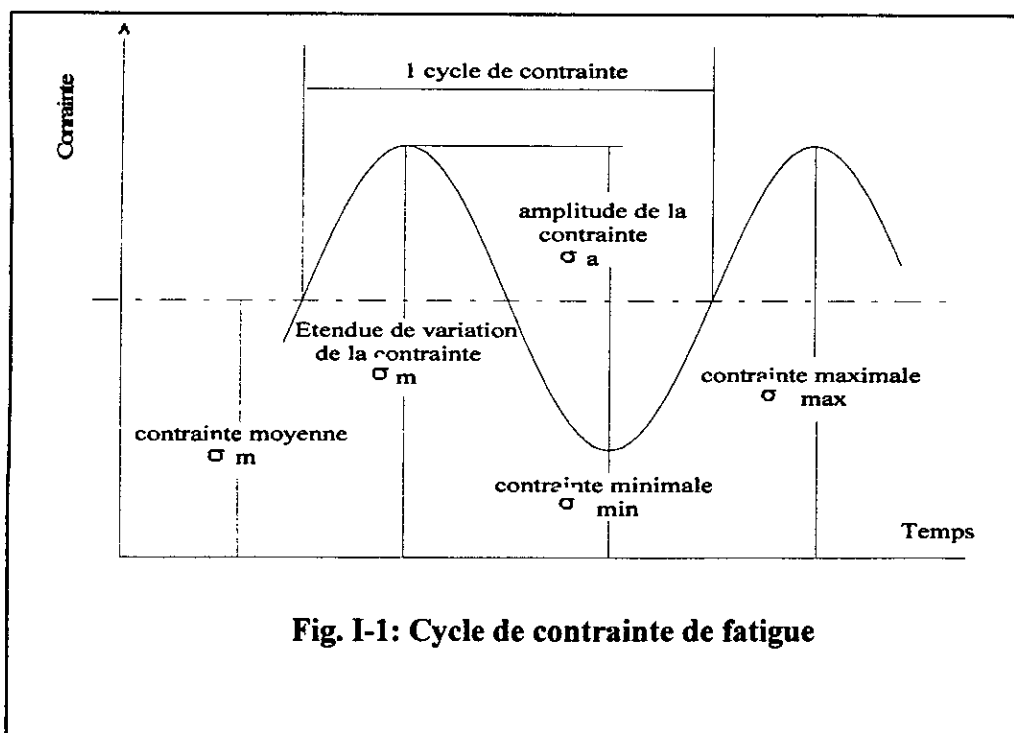
Contrainte alternée égale à la moitié de la différence algébrique entre la contrainte maximale et la contrainte minimale :

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 \quad (I-2)$$

**-e) Rapport de contrainte ( $R_\sigma$ ) :**

Rapport algébrique de la contrainte minimale à la contrainte maximale dans un cycle :

$$R_\sigma = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (I-3)$$



**Fig. I-1: Cycle de contrainte de fatigue**

### I-2-1-3. Limite de fatigue :

C'est pour une contrainte moyenne donnée, la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'est pas observé de rupture après un nombre infini de cycles

### I-2-1-4. Limite d'endurance :

C'est pour une contrainte moyenne donnée, l'amplitude de contrainte pour laquelle il est constaté 50% de rupture après un nombre fini N de cycles. Cette valeur peut être déterminée à l'aide de méthodes statistiques, cette limite est notée  $\sigma_{D(N)}$ .

### I-2-1-5. Rapport d'endurance

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

$$R = \sigma_{D(N)} / R_m \quad (I-4)$$

## I-2-2- Classification des sollicitations des essais de fatigue:

On peut distinguer d'abord deux grandes catégories d'essais de fatigue : les essais sous amplitude de charge constante et les essais sous amplitude de charge variable ou à programme de charge tendant à simuler les sollicitations en service .

### I-2-2-1- Essais sous amplitude constante :

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

- premier cas : sollicitations aux efforts statiques et aux efforts variables de même nature et de même direction.

On peut considérer, quelle que soit la nature des efforts agissantes ( traction , flexion , torsion ) trois sortes de sollicitations en fonction du temps : alternées, répétées et ondulées (fig.I-2).

D'une façon générale, tout effort périodique peut être considéré comme la résultante d'un effort constant ou statique  $\sigma_m$  et d'un effort alternatif d'amplitude  $\sigma_a$



Si  $\sigma_m < \sigma_a$ , les efforts sont alternés (si  $\sigma_m = 0$ , les efforts sont purement alternés ou symétrique.)

Si  $\sigma_m = \sigma_a$ , les efforts sont répétés.

Si  $\sigma_m > \sigma_a$ , les efforts sont ondulés.

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

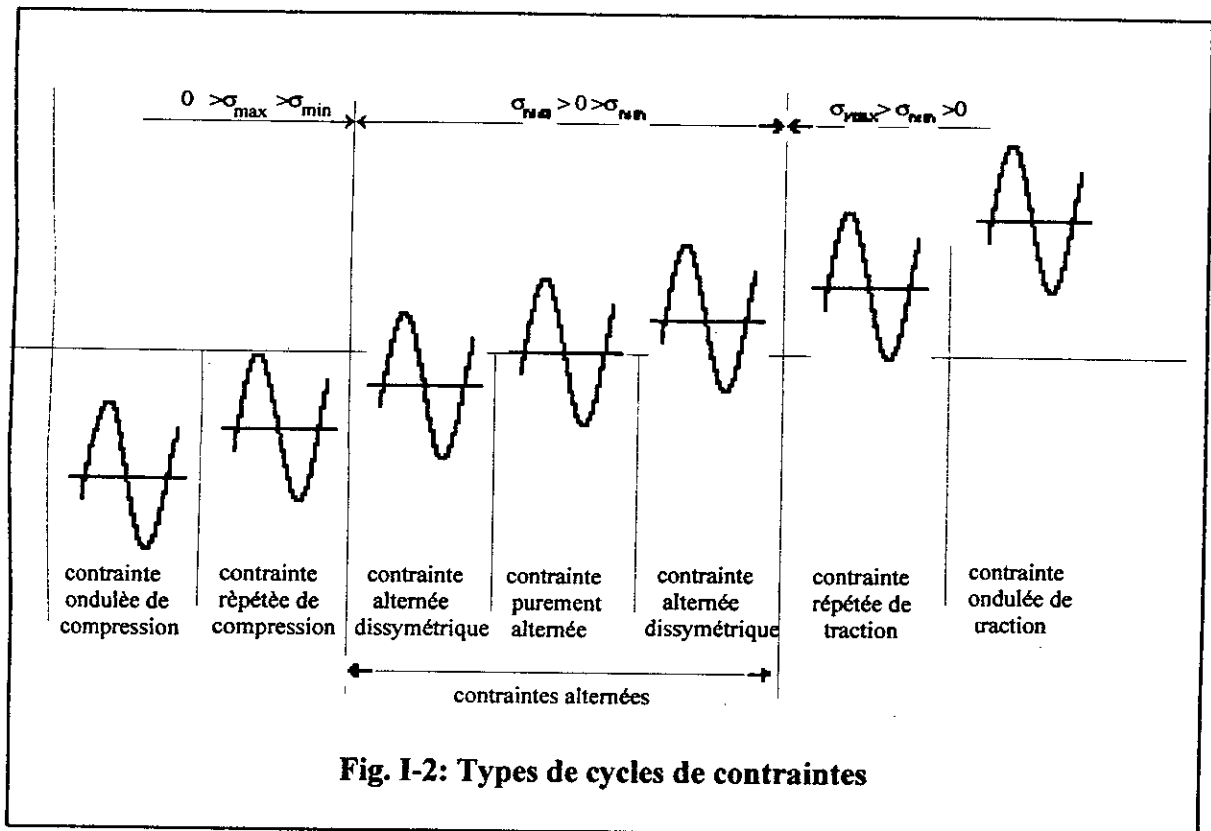
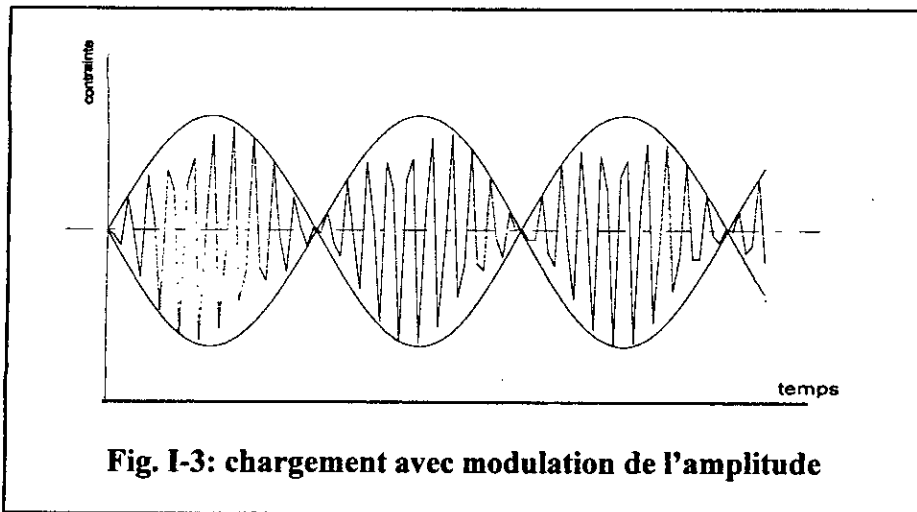


Fig. I-2: Types de cycles de contraintes

### I-2-2-2- Essais sous amplitude variable :

Pour se rapprocher des conditions de la pratique, on a cherché à effectuer des essais sous amplitude variable. Des expérimentateurs ont imaginé des essais avec modulation de l'amplitude, sinusoïdale ou à programme (fig.I-3).



### I-2-3- Classification des modes de sollicitation:

On peut classer, pratiquement, les sollicitations cycliques selon la nature des efforts exercés par les machines sur les pièces ou les éprouvettes. On distingue ainsi :

- Les essais de flexion plane ou toutes les fibres à la même distance de la fibre neutre sont simultanément dans le même état de traction ou de compression;
- Les essais de flexion rotative où toutes les fibres (sauf la fibre neutre), sont successivement tendues puis comprimées, la valeur de la contrainte exercée sur chaque fibre externe supporte la contrainte maximale.
- Les essais sous efforts axiaux, traction ou compression, où la contrainte est constante dans toute section droite.

Les essais de torsion.

- Les essais sous contraintes combinées, statique et dynamiques, torsion et flexion, tension et torsion, etc.

Des machines d'essai de types différents permettent d'effectuer ces divers essais : machines de flexion plane ou rotative, de torsion, pulsateurs, etc .

### I-2-4- Diagrammes représentatifs :

#### I-2-4-1- Courbe de wöhler:(courbe S.N)

Cette courbe représente la variation d'une des contraintes dynamiques précitées en fonction du nombre de cycle à rupture ( reporté sur échelle logarithmique ). Son tracé résulte d'essais de fatigue conduits pour une même valeur de la contrainte moyenne  $\sigma_m$  sur un nombre d'éprouvettes identiques aussi élevé que possible suivant une méthodologie appropriée.

Pour un acier on obtient une courbe qui a la forme donnée par la figure (Fig.I-4).

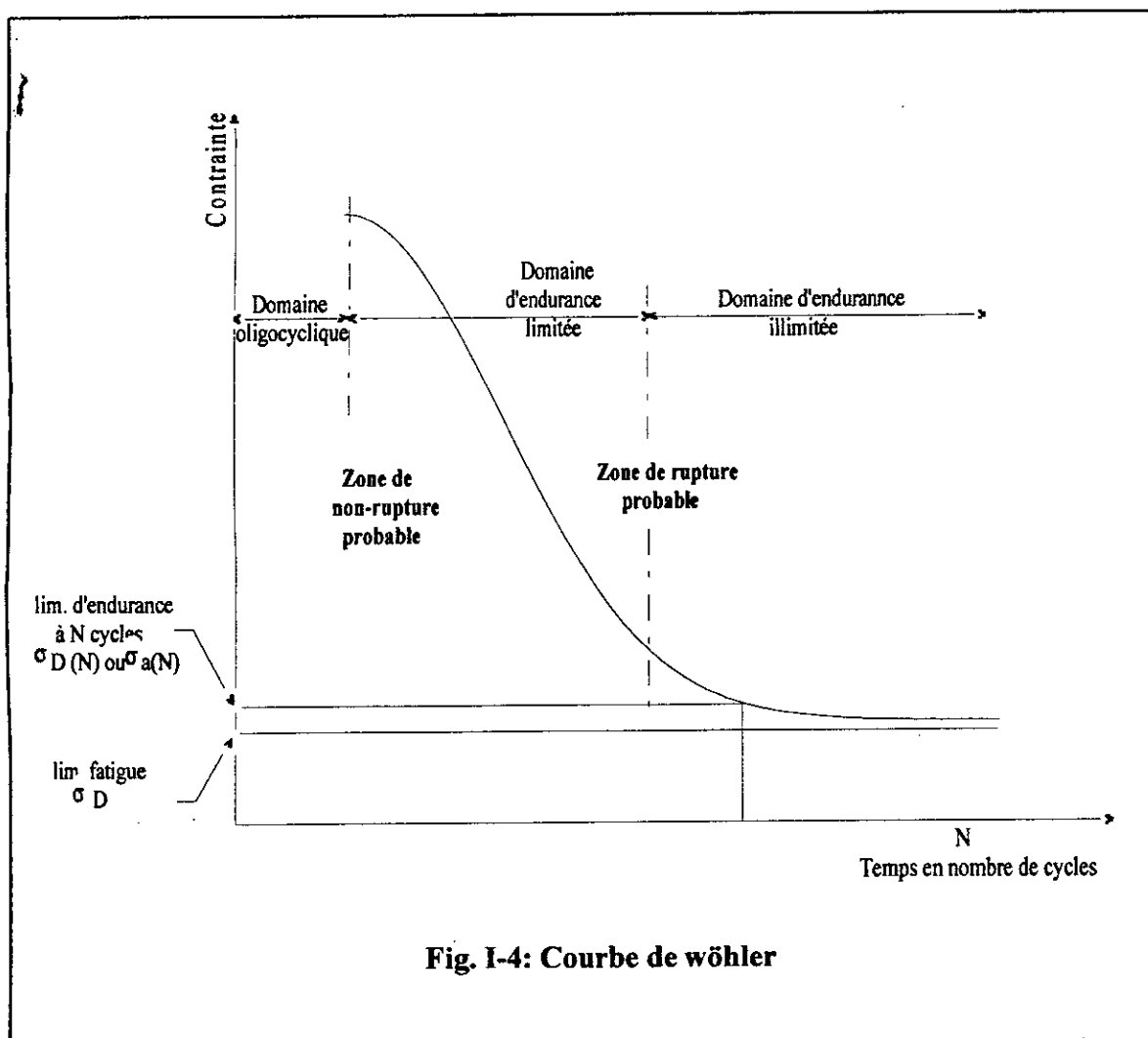


Fig. I-4: Courbe de wöhler

Cette courbe partage le plan de coordonnées en trois domaines:

- i) Domaine de la fatigue plastique oligocyclique ou les ruptures surviennent après un petit nombre de cycle ( $N_R \leq 10^4$  cycles).

ii) Domaine d'endurance limitée ( $N_R > 10^5$  cycles) ou les ruptures surviennent systématiquement après un nombre de cycles croissant avec la décroissance de la contrainte.

iii) Domaine d'endurance illimitée ou les ruptures ne se produisent pas avant un nombre de cycles supérieur à la durée de vie envisagée de la pièce.

Entre les deux derniers domaines, la courbe de Wohler présente un coude plus ou moins prononcé compris entre  $10^6$  et  $10^7$  cycles.

Diverses expressions analytiques ont été proposées pour représenter les courbes de Wohler, dans le domaine d'endurance limitée. Ces équations permettent de déterminer le nombre de cycles à rupture en fonction de la contrainte. Parmi celles-ci, on peut citer [ 1 ]:

- La formule de Weibull:  $N_R = K(\sigma - \sigma_D)^n$  (I-4)

- La formule de Stromeyer:  $\sigma_a = \sigma_D + (A/N)^c$  (I-5)

- La formule de Palingreen:  $\sigma_a = \sigma_D + (A / (N+B))^c$  (I-6)

- La formule de Corson:  $N = A \exp(-c(\sigma_a - \sigma_D)) / (\sigma_a - \sigma_D)$  (I-7)

- La formule de bastenaire:  $N + B = A \exp(-c(\sigma_a - \sigma_D)) / (\sigma_a - \sigma_D)$  (I-8)

A, B et C sont des constantes à déterminer à partir de résultats d'essais en nombre suffisant.

#### I-2-4-2 / Courbes d'équiprobabilité de rupture : (courbes P.S.N)

Les courbes de Wöhler dont nous venons de parler étant une courbe moyenne, son utilisation peut s'avérer délicate du fait que les valeurs relevées indiquent seulement que la pièce a « autant de chances de se rompre que de ne pas se rompre ». Aussi et dans toute la mesure du possible, c'est-à-dire si le coût des cessions le permet, est-il utile de réaliser un assez grand nombre d'essai de façon à pouvoir raisonner de façon statique.

Les courbes d'équiprobabilité de rupture dont la courbe de Wöhler constitue un cas particulier ( $P = 50\%$  de rupture), sont alors tracées en soustrayant à la valeur moyenne une certaine valeur fonction de la probabilité de rupture recherchée, du nombre d'essais et du niveau de confiance accordée. (fig.I-5).

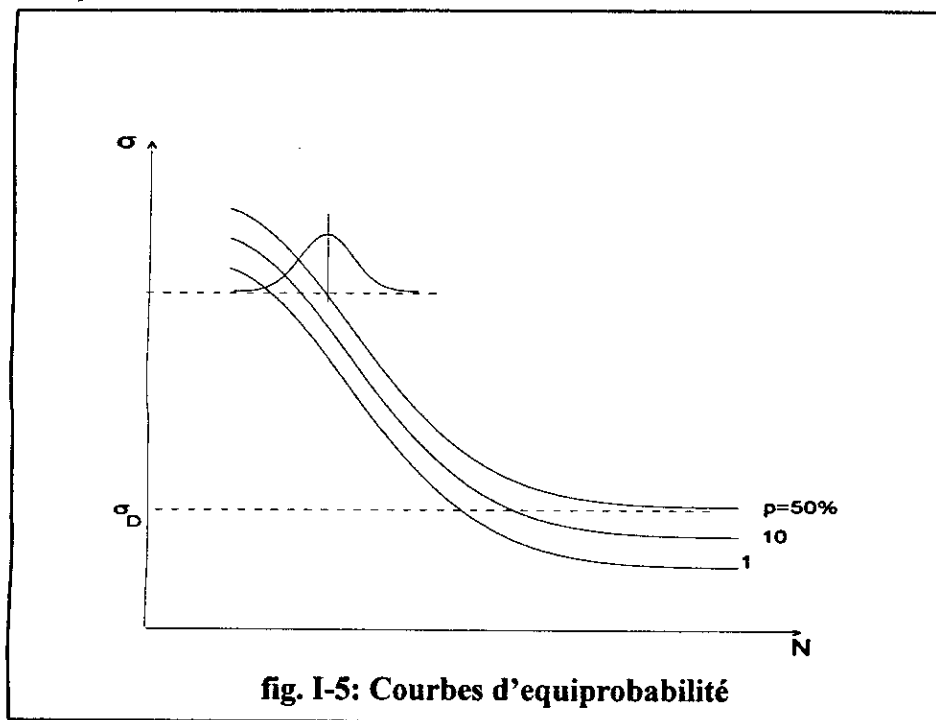


fig. I-5: Courbes d'équiprobabilité

La dispersion des résultats des essais de fatigue est acceptée aujourd'hui, à la fois comme un fait d'expérience et comme un fait physique, attribuée autrefois aux seuls imperfections des conditions d'essai, que l'on le considère maintenant comme des aspects physiques du phénomène, dont les origines peuvent être classées en trois groupes :

**a) Causes internes au métal :**

ces causes de dispersion dont le mécanisme d'action est le plus mal connu sont par exemple les inclusions non métalliques, les hétérogénéité de structure, etc. Elles sont d'ailleurs pas indépendantes de celle relatives à la préparation des éprouvettes car ces opérations de préparation peuvent modifier le matériau et son hétérogénéité.

**b) Causes dues ou liées à la préparation des éprouvettes :**

Les opérations de mise en forme, par exemple par tournage, fraisage, rectification, ont une influence notoire sur l'endurance des pièces. De même, les traitements thermiques qu'il n'est jamais possible de reproduire de façon rigoureusement identique sur toutes les éprouvettes d'une même série constituent une cause de dispersion .

### c) Causes extérieures à l'éprouvette

Elles comprennent notamment les incertitudes de montage dans les machines d'essais et de réglage, de la charge appliquée de la fréquence des cycles, etc. L'influence de l'environnement peut elle-même ne pas être négligeable.

#### I-2-4-3 Diagrammes d'endurance

Pour des durées de vie données, on peut considérer trois types de diagrammes :

- les contraintes maximales et minimales ( $\sigma_{\max}$  et  $\sigma_{\min}$ ) en fonction de la contrainte moyenne ( $\sigma_m$ ) : diagramme de Goodman - Smith.
- la contrainte maximale ( $\sigma_{\max}$ ) en fonction de la contrainte minimale ( $\sigma_{\min}$ ) : diagramme de ROS.
- la contrainte maximale ( $\sigma_{\max}$ ) en fonction de la contrainte minimale ( $\sigma_{\min}$ ) : diagramme de Moor-Jasper.
- L'amplitude de contrainte ( $\sigma_a$ ) en fonction de la contrainte moyenne ( $\sigma_m$ ) : diagramme de Haigh

#### I-2-5- Les éprouvettes d'essais :

##### I-2-5-1 forme des éprouvettes:

Le type de l'éprouvette utilisée dépendra des renseignements que l'on désire obtenir par l'essai de fatigue et de la forme sous la quelle le métal est disponible .

L'éprouvette peut être à :

- a) Section circulaire avec des congés se raccordant tangentiellement entre la partie soumise à l'essai et les extrémités, ou avec un arc de cercle de rayons continu entre les extrémités ( fig. I-6 . a ).
- b) Section rectangulaire d'épaisseur uniforme sur tout la partie soumise à l'essai avec des congés se raccordant tangentiellement entre la partie soumise à l'essai et les têtes de l'éprouvette ou avec un arc de cercle de rayon continu entre les extrémités (fig. I-6 - b).

Les extrémités de l'éprouvette doivent être d'une forme convenant au types de machine utilisée et au métal à essayer.

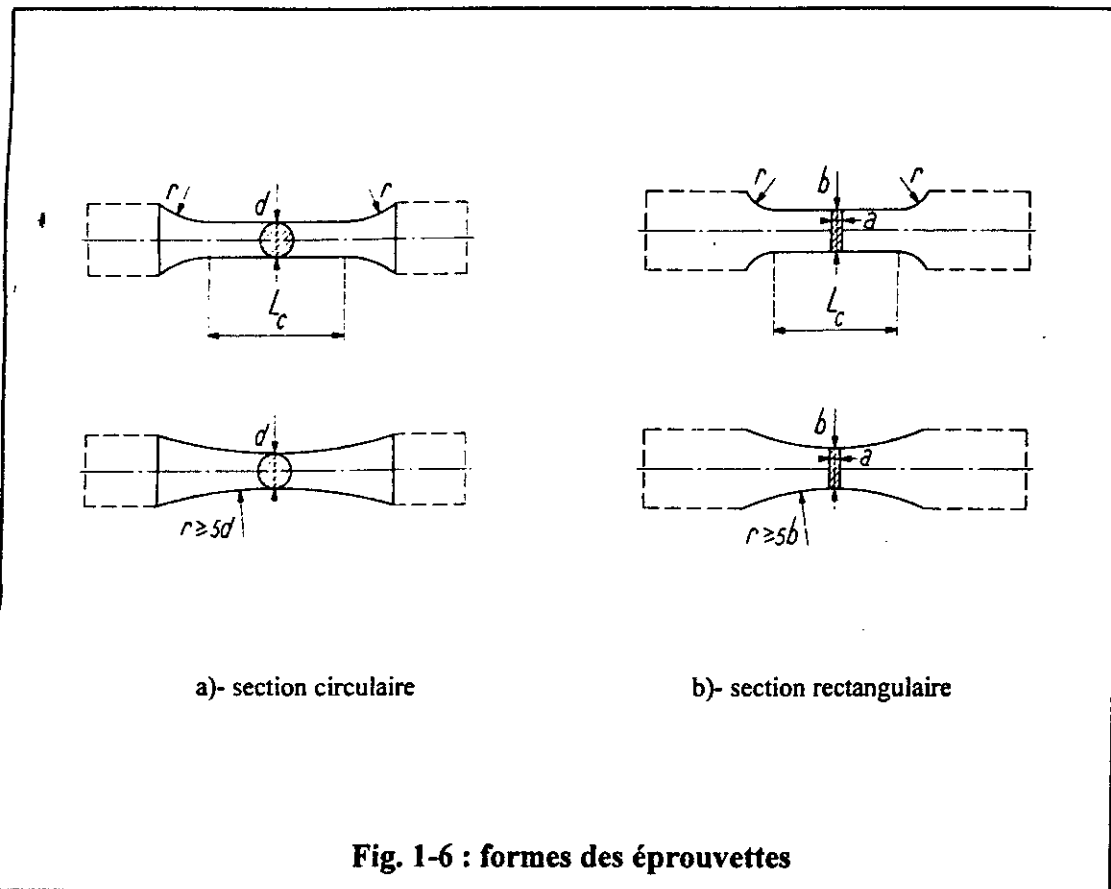


Fig. 1-6 : formes des éprouvettes

### I-2-5-2 Dimensions des éprouvettes :

En règle générale, (d'après les recommandations de [2]) les dimensions des éprouvettes devront être telles que l'amplitude de la contrainte d'essai ne soit jamais inférieur à 25% de la gamme de charge de la machine d'essai.

De plus les dimensions de l'éprouvette devront être choisies de façon que la fréquence propre de l'éprouvette montée sur la machine soit au moins double de la fréquence d'essai .  
lorsqu'il faut déterminer les caractéristiques intrinsèques d'un métal au point de vue de la fatigue, les dimensions et les tolérances ci-après sont applicables pour des éprouvettes à :section circulaire :

Sauf pour les produits de faible section, il est conseillé de prendre la valeur nominale du diamètre  $d$ , à l'endroit du maximum de contrainte, supérieur à 5 mm afin de réduire les causes de dispersion. La tolérance sur l'excentricité doit être inférieur à  $\pm 0,025$  mm. la

tolérance de forme sur la partie cylindrique soumise à l'essai ne doit pas être supérieur à  $\pm 0,02$  mm.

### I- 2-5-3 Usinage des éprouvettes :

Lorsqu'il s'agit de déterminer les caractéristiques intrinsèques d'un métal en fatigue, il faut réduire au maximum l'influence de l'état de surface de l'éprouvette sur le processeur de fatigue qui conduira à la rupture. Pour cette raison, l'état de surface des éprouvettes devra être particulièrement soigné et répétitif pour le même lot d'éprouvettes .

Le traitement thermique de l'ébauche devra être conduit de façon à éviter toute altération superficielle et déformation de l'ébauche.

On donne par exemple pour une éprouvette cylindrique avec congé de raccordement, les étapes à suivre : [ 2 ]

- une ébauche de l'éprouvette fait généralement avant traitement thermique et obtenu par usinage autour à partir du diamètre  $d+5$ mm jusqu'à  $d+0,5$ mm, en évitant tout écrouissage.

Dans ce but, il est conseillé d'opérer par passes successives de 1 - 0,5 - 0,2 mm au rayon.

- un finissage de l'éprouvette fait après traitement thermique et comprenant :
  - une rectification transversale à l'aide d'une meule appropriée à l'acier à partir du diamètre  $d + 0,05$  par passes décroissantes de 0,05 à 0,01mm .
  - une rectification longitudinale à partir de  $d + 0,05$ mm par passes successives décroissantes de 0,1 à 0,005mm.

### I-2-6- Méthodes statistiques de détermination de la limite d'endurance :

Le phénomène de dispersion des résultats des essais de fatigue a amené les expérimentateurs à définir et à utiliser des méthodes d'essais qui permettent la détermination de la limite d'endurance pour un nombre de cycles fixé et l'estimation de la dispersion de ces résultats .

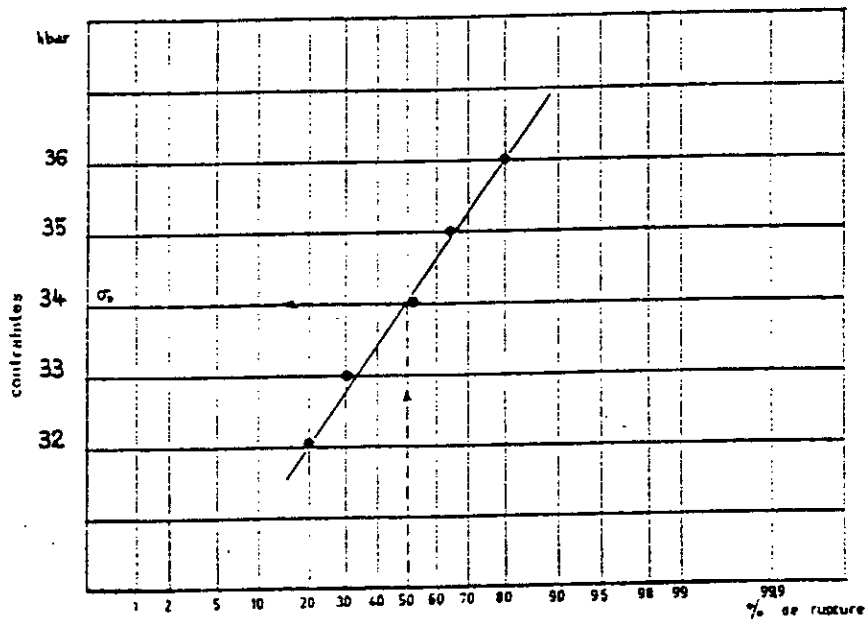
nous citons ci-dessous quelques une des principales méthodes .



**I-2-6-1: méthode des probits :**

Cette méthode consiste dans le choix de niveaux de contraintes espacées régulièrement, de manière à encadrer la limite d'endurance présumée. A chaque niveau plusieurs éprouvettes sont utilisées. l'espacement des niveaux est choisis pour qu'il restent dans la zone d'endurance et donnant à la fois des ruptures et des non ruptures . Pour chaque niveau, est déterminé la proportion d'éprouvettes rompues avant le nombre de cycles fixé. Les valeurs de la fréquence de rupture et du niveau de contrainte sont reportées dans des graphes avec respectivement une échelle dite « normale » et une échelle linéaire . On trace une droite dite « de Henry » qui nous permet de déterminer la contrainte correspondant à 50% de rupture, voir figure (I-7)

Contrainte hbar	Nombre d'éprouvettes		Rupture %
	essayées	rompues à $17 \cdot 10^6$ cycles	
32	50	10	20
33	—	15	30
34	—	26	52
35	—	32	64
36	—	41	82



**Fig. I-7 :-Exemple d'estimation de la limite d'endurance avec la méthode des probits**

**I-2-6-2- Méthode d'essai en escalier ( stair-case ) :**

Cette méthode proposée par Dixon et Mood, citée par Bathias [ 4 ] nécessite au moins 15 éprouvettes (20 à 30 de préférence ). On choisit un niveau de contrainte supposé proche de la limite d'endurance pour un nombre de cycles . Si l'éprouvette testée à ce niveau est rompue avant le nombre de cycles fixé, on choisit le niveau de contrainte immédiatement inférieur. par contre ,si le l'éprouvette n'est pas rompue, on choisit le niveau de contrainte immédiatement supérieur. on répète la procédure jusqu'à épuisement des éprouvettes. La limite d'endurance à 50% d'éprouvettes rompues est déterminer par la moyenne statistique des résultats obtenues. Pour le calcul, on considère les résultats relatifs à l'éventualité la moins fréquente de rupture ou de non-rupture .

La moyenne estimée par la relation suivante :

$$\sigma_D = S_0 + d(A/N \pm 1/2) \quad (I-9)$$

où : d : pas de l'échelonnement.

$S_0$  : plus petite contrainte utilisée .

$$N = \sum n_i$$

$$A = \sum i n_i$$

$$B = \sum i^2 n_i$$

$n_i$  : nombre de réponses les moins fréquentes pour chaque niveau.

i : rang du niveau de contrainte, tel que  $i=0$  pour niveau  $S_0$

L'écart-type de la limite d'endurance est estimé par la relation suivante :

$$S = 1.62 d ( (N.B - A^2) / N^2 ) + 0.028 ) \quad (I-10)$$

Remarque : l'application de cette méthode est conditionnée par la vérification de l'inégalité suivante :

$$(N B - A^2) / N^2 \geq 0.3 \quad (I-11)$$

### 1-2-6-3 Tracé de la courbe de Wöhler -Estimation de la limite d'endurance à partir d'une formule analytique de la courbe de Wöhler :

Il est possible de tracer une courbe de Wöhler complète on utilisant une formule analytique représentative de l'évolution de la contrainte appliquée en fonction du nombre de cycles à rupture .

La méthode consiste à essayer des éprouvettes à différents niveaux de charges. On essaye, par exemple cinq éprouvettes à cinq niveaux de charge différents répartis de la zone des faibles durées de vie ( $10^5$ ) à la zone d'endurance ( $10^6$  à  $10^7$  cycles). Puis à l'aide d'un programme de calcul, la courbe de WÖHLER est lissée à partir d'un modèle de la courbe. Le lissage permet alors, de déterminer la limite d'endurance conventionnelle. Ce type d'essai a l'avantage de raccourcir très nettement la durée des essais (50% environ), par rapport à une méthode classique dans laquelle toutes les éprouvettes sont essayées dans la zone de limite d'endurance .

L'équation (I-9) à quatre paramètres choisie par Bastenaire à été mise au point à l'aide d'essais très nombreux sur les aciers. Elle est de la forme :

$$N+B = A \exp(-c (\sigma - \sigma_D)) / (\sigma - \sigma_D) \quad (I-12)$$

Où A,B,C: sont des constantes de l'équation,  $\sigma_D$  la limite de fatigue et  $\sigma$  la contrainte de travail de la pièce .

N : le nombre de cycles à rupture .

La résistance à la fatigue d'une pièce quelconque est conditionnée par de nombreux facteurs et effets, qui peuvent être d'origine mécanique, métallurgique, géométrique, ou liées aux conditions de travail de la pièce. Dans notre présente étude, nous allons étudier l'influence des caractéristiques mécaniques sur la tenue en fatigue, et aussi l'influence des concentrations de contraintes sur la résistance à la fatigue, qui est appelé l'effet d'entaille. Nous citons quelques autres facteurs tel que: l'influence de l'état de surface ou naissent souvent les fissures de fatigue (plus la surface est rugueuse plus la durée de vie diminue). Nous citons aussi l'influence des hétérogénéité du matériau et l'influence de l'échelle.

## II-1- INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES MECANIQUE SUR LA TENUE EN FATIGUE :

De nombreux auteurs ont cherché à relier la limite d'endurance aux propriétés mécaniques et en particulier à la résistance à la rupture,  $R_m$ , à la limite d'élasticité,  $Re_{0,2}$ , à l'allongement  $A$  et à la striction  $Z$ .

De nombreuses formules ont été proposées [4], on cite parmi elles :

Roger	$\sigma_D = 0.4 Re + 0.25 R_m$	(II-1)
-------	--------------------------------	--------

Houdremont et Mailander	$\sigma_D = 0.25( Re + R_m ) + 50$	(II-2)
-------------------------	------------------------------------	--------

Jünger	$\sigma_D = 0.2( Re + R_m + Z )$	(II-3)
--------	----------------------------------	--------

Lequis, Bucholtz et schultz	$\sigma_D = 0.175(R_m + Re + A\% + 100)$	(II-4)
-----------------------------	------------------------------------------	--------

Heywood	$\sigma_D = R_m / 2$	(II-5)
---------	----------------------	--------

	$\sigma_D = 150 + 0.43 Re$	(II-6)
--	----------------------------	--------

Brand	$\sigma_D = 0.32 R_m + 121$	(II-7)
-------	-----------------------------	--------

BATHIAS à proposé les relations suivantes [3] :	$\sigma_D = 0.37 R_m + 77$	(II-8)
-------------------------------------------------	----------------------------	--------

	$\sigma_D = 0.38 Re + 16$	(II-9)
--	---------------------------	--------

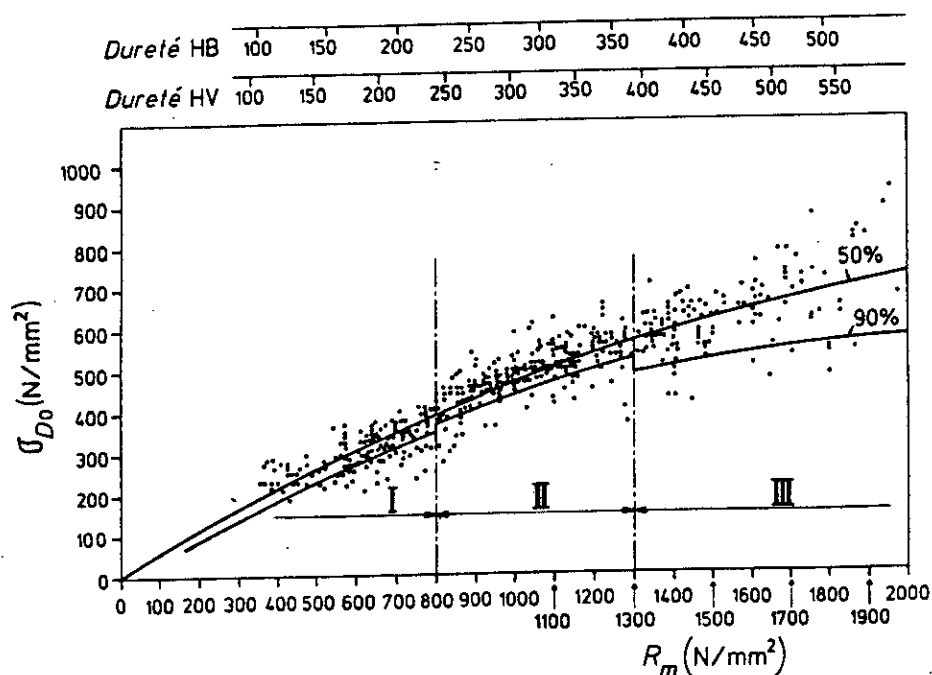
	$\sigma_D = 0.41 R_m + 2A$	(II-10)
--	----------------------------	---------

	$\sigma_D = 0.39 R_m + Z$	(II-11)
--	---------------------------	---------

Une autre relation a été proposée par [1] :

$$\sigma_D(50\%) = R_m (0.58 - 1.1 E^{-4} R_m) \quad (\text{II-12})$$

Cette dernière formule est le résultat d'un traitement d'un grand nombre de résultats d'expériences (fig. II-1), et elle donne une très bonne corrélation entre la limite de rupture et la limite de fatigue.



**Figure II.1: Limite d'endurance  $\sigma_D$  en fonction de la limite à la rupture**

## II-2- EFFET D'ENTAILLE:

Le comportement en fatigue des structures tel que les éprouvettes entaillées de différentes acuités ou les assemblages soudés est influencé par différents facteurs. Outre l'amplitude de contrainte appliquée et la contrainte moyenne, la géométrie du défaut et le type de chargement auquel il est soumis, sont des facteurs influents qui déterminent notamment la localisation du point d'amorçage. Le gradient de contraintes existant et diffère dans le cas d'une sollicitation de traction ou de flexion.

Les entailles peuvent être de trois types:

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

### II-2-1- Concentration de contrainte:

Soit une pièce mécanique cylindrique de diamètre constant subissant une flexion: (fig.II-2-a).

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

$$\sigma(x_2) = \frac{M_3}{I_{33}} \cdot x_2 \quad (\text{II-13})$$

Ou:

$M_3$ : Moment de flexion

$I_{33}$ : Moment d'inertie de la section par rapport à l'axe ( $X_3$ )

$$I_{33} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (\text{II-14})$$

La valeur maximale de la contrainte est donnée sur la fibre la plus éloignée de l'axe neutre, pour  $x_2 = d/2$

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{\left(\frac{\pi \cdot d^3}{32}\right)} \quad (\text{II-15})$$

Soit une autre pièce mécanique cylindrique entaillée telle que le diamètre en font d'entaille soit le même que celui de la pièce ci-dessus et subissant la même flexion (fig. II-2). Dans ce cas la répartition des contraintes n'est plus linéaire et on observe une contrainte à font d'entaille qui dépasse la valeur maximale correspondant à l'état linéaire. On parle dans ce cas de « concentration de contrainte ».

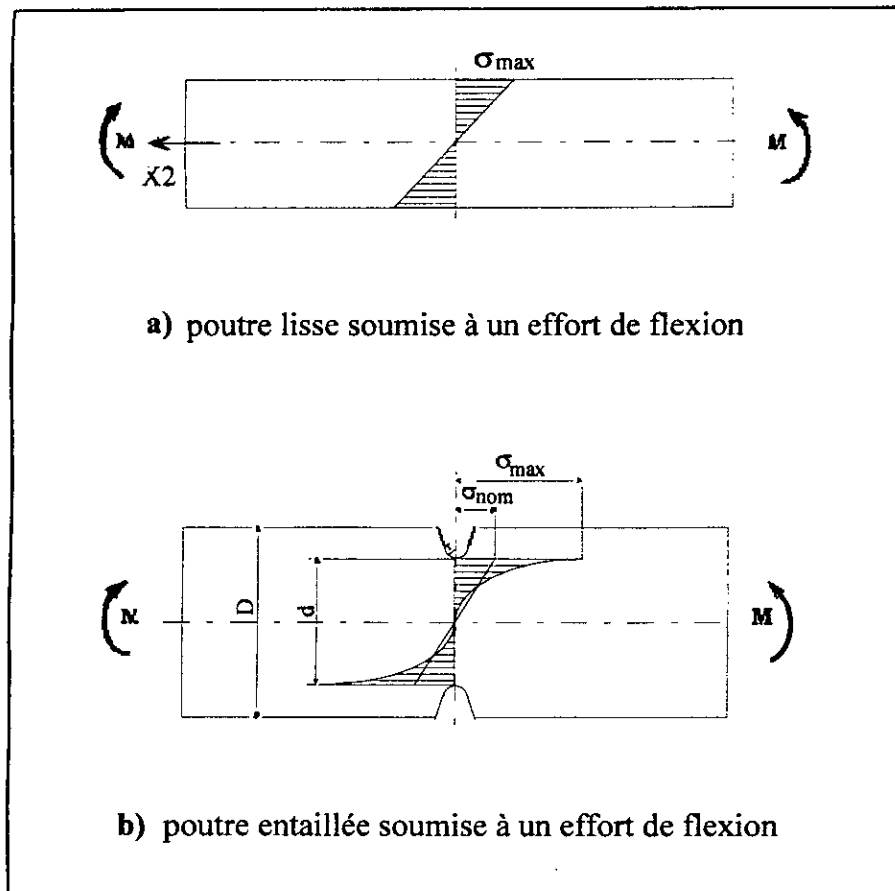


Fig.II-2 :- concentration de contrainte

### II-2-2- Facteur de concentration de contrainte théorique, $K_t$ :

Pour caractériser cette concentration de contrainte par rapport à l'état linéaire, on utilise un coefficient de concentration de contrainte, qui est défini comme étant le rapport de la contrainte maximale à font d'entaille à la contrainte dans la section nette, on note:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (II-16)$$

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

$\sigma_{nom}$  : Contrainte maximal nominale calculée à partir de la section nette.

Ces facteurs sont déterminés sur la base des hypothèses de la théorie d'élasticité pour le cas des charges statiques c-à-d la contrainte  $\sigma_{max}$ , (fig.II-2-b), qui peut être réelle ou fictive, est calculée comme si le matériau était purement élastique. Ces facteurs sont fonction alors de la forme géométrique des pièces et de la sollicitation. L'une des formules donnant les valeurs

de ces facteurs et qui été établi à partir des travaux de NEUBER et celle de PETERSON, citée par CAZAUD[4]:

$$K_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{A \cdot \frac{2r}{D-d} + B \cdot \frac{2r(1+2r/d)^2}{d}}} \quad (\text{II-17})$$

Ou:

D: diamètre extérieur ou largeur extérieur de la pièce.

d: diamètre ou largeur au fond d'entaille.

r: rayon à fond d'entaille.

A, B: facteurs dépendants de la géométrie et de la sollicitation appliquée à la pièce, tels que A=.25, B=1.80 pour le cas de flexion de cylindres.

En pratique , pour de nombreux cas simples, le facteur de concentration de contrainte est présenté sous forme de tableaux ou d'abaques en fonction des paramètres géométriques des pièces mécaniques. On donne par exemple l'abaque fait à partir de l'équation précédent de  $K_t$  pour A=.25 et B=1.80, (Fig. II-3 ).

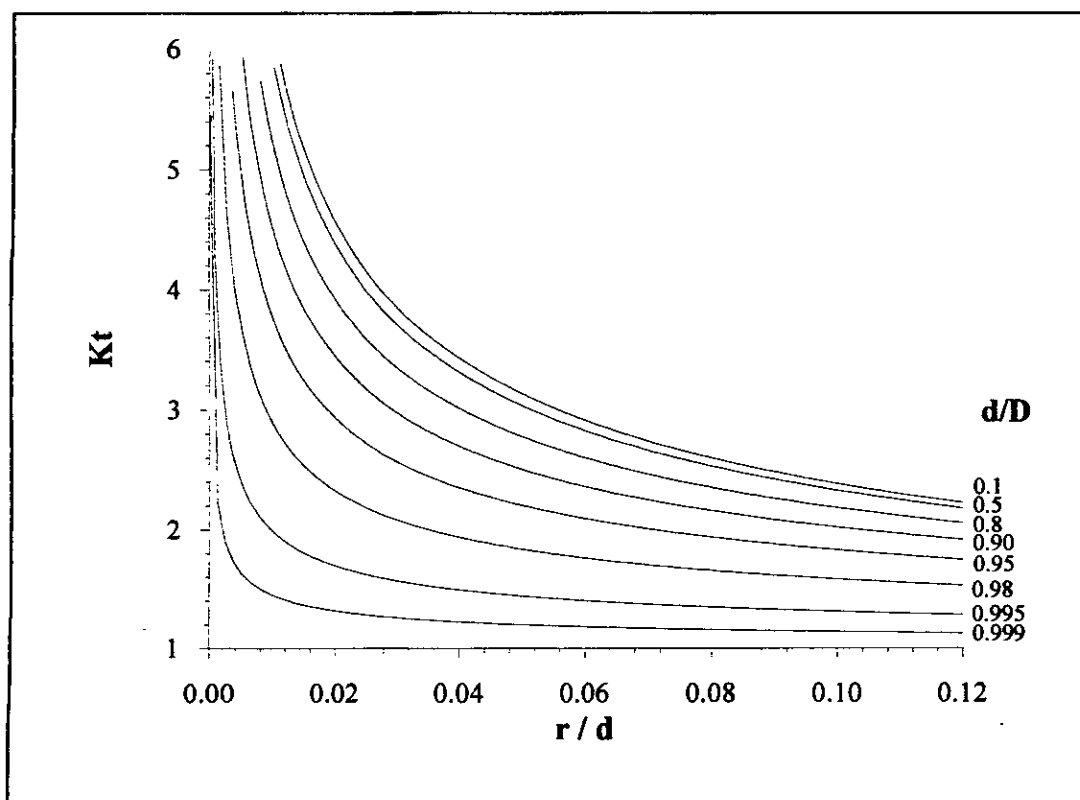


Fig. II-3: facteur de concentration de contrainte théorique,  $K_t$



**II-2-3- FACTEUR DE CONCENTRATION DE CONTRAINTE EN FATIGUE,  $K_f$ :**

La limite de fatigue de pièces entaillées notée  $\sigma_{dn}$  est généralement inférieure à celle d'une pièce non entaillée (lisse)  $\sigma_d$ . Le rapport entre la limite de fatigue d'une pièce lisse et la limite de fatigue d'une pièce entaillée (avec la même section nette de charge) est définie comme étant facteur de concentration de contrainte en fatigue ou facteur de concentration de contrainte effectif, noté  $K_f$ .

$$K_f = \sigma_D / \sigma_{dn} \quad (\text{II-18})$$

$\sigma_D$  : limite d'endurance d'éprouvette lisse.

$\sigma_{dn}$  : limite d'endurance d'éprouvette entaillée.

Tel quel, il s'agit donc d'un coefficient expérimental calculé à partir d'essais de fatigue réalisés sur la pièce même et dans les conditions de fonctionnement de celle-ci.

Autrement dit l'abaissement expérimental de l'endurance est plus faible que ce que l'on pourrait attendre du coefficient théorique de concentration de contrainte  $K_t$ .

Ce fait résulte d'un écoulement plastique localisé. Cet écoulement, modifiant la forme, entraîne une diminution de la concentration de contrainte (relaxation). En outre, la déformation plastique provoque un durcissement local par écrouissage. Ainsi un métal ductile s'adapte en présence d'une entaille.

L'expériences à montrer que dans tous les cas, la limite d'endurance est réduite en présence d'une entaille mais son influence est autant plus grande que le métal a une faible capacité d'adaptation.

**II-2-3- FACTEUR DE SENSIBILITE A L'EFFET D'ENTAILLE:**

Au niveau conception, il est nécessaire de pouvoir estimé la limite d'endurance  $\sigma_{dn}$  de la pièce avec le maximum de précision. En absence d'essais sur la pièce même et pour passer de la théorie ( $K_t$ ) à la pratique ( $K_f$ ), il est nécessaire de posséder la relation entre ces deux facteurs.

Cette relation entre  $K_t$  et  $K_f$ , se fait couramment par l'intermédiaire d'un coefficient  $q$  appelé indice de sensibilité à l'effet d'entaille.

THUM [5] a définie ce facteur par la relation :

$$q_1 = (K_f - 1) / (K_t - 1). \quad (\text{II-19})$$

Une autre relation a été définie ensuite par Yen et Dolan [ 6 ]:

$$q_2 = k_f / k_t \quad (\text{II-20})$$

qui est maintenant préféré parce qu'elle donne une meilleure corrélation dans l'établissement des courbes  $q=f(r)$ . ( $r$ : rayon en fond d'entaille).

Plusieurs relations empiriques ont été proposées du facteur de sensibilité en fonction des propriétés mécaniques et géométriques des pièces mécanique.

Nous utiliserons quelques une d'elle.

La plus connue est celle proposées par Neuber [ 7 ] relative à la première définition du facteur de sensibilité, elle est de la forme:

$$q_1 = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho}{r}}} \quad (\text{II-21})$$

Ou:

$r$ : est le rayon en fond d'entaille.

$\rho$ : est une constante du matériau appelée constante de Neuber.

Neuber,[7] a relié cette constante à la grosseur du grain des aciers, mais plus tard, KUHN et HARDRATH[ 8 ] l'ont relié à la limite de rupture des aciers, cette relation est donnée sous forme d'une courbe dans la figure (II-4)

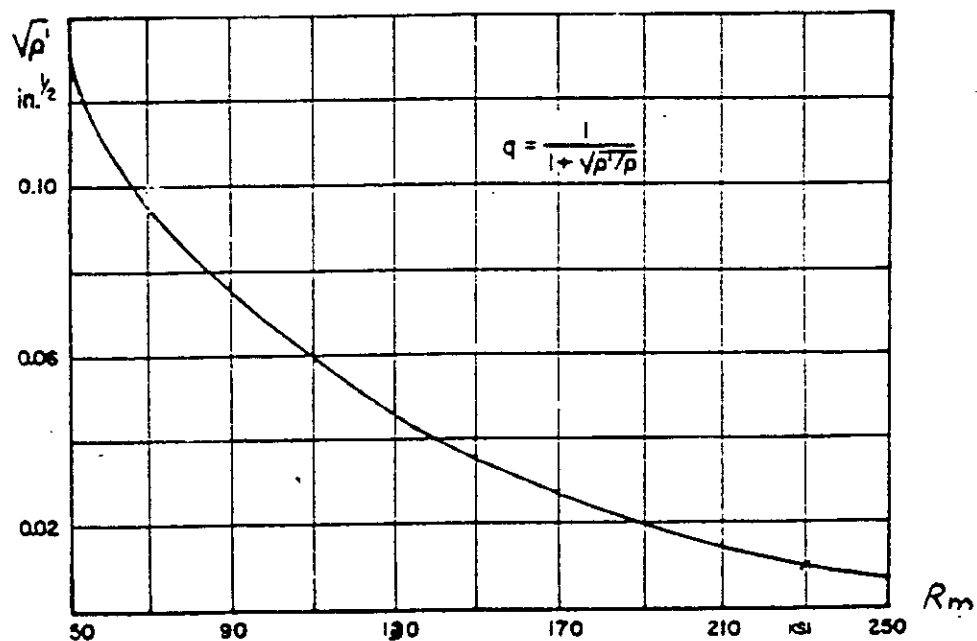


Fig.II-4 : Constante de Neuber en fonction de la limite de rupture

De cette courbe on peut tracer des courbes reliant directement le facteur de sensibilité de Neuber théorique en fonction de rayon en fond d'entaille pour des valeurs de la limite de rupture des aciers (fig.II-5).

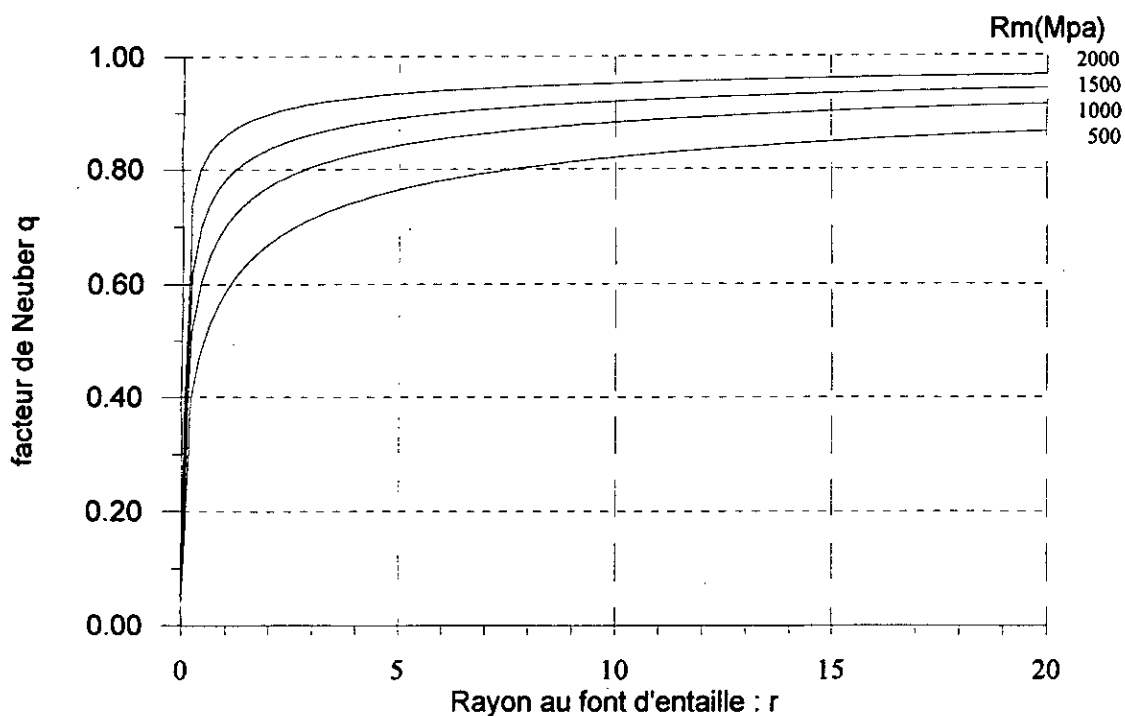


fig. 2-5 : facteur de sensibilité de Neuber en fonction du rayon au font d'entaille pour différentes limites de rupture Rm

Une autre relation relative à la première définition du facteur de sensibilité (II-19) a été proposée par Peterson [ 9 ]:

$$q_{1,p} = \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{r}\right)^{1/2}} \quad (\text{II-22})$$

Ou:

a: constante du matériau.

Nous donnons aussi une autre relation relative à la deuxième définition du facteur de sensibilité d'entaille proposé par HEYWOOD,[ 10 ]

$$q_{2,H} = \frac{1}{1 + \frac{a}{(br)^{1/2}}} \quad (\text{II-23})$$

Ou:

a: constante dépendant du matériau.

b: constante adimensionnelle dépendant de la géométrie de l'entaille et de la sollicitation pour les aciers au carbone  $a = 0.328 \text{ mm}^{1/2}$  et  $b = 0.26$  pour une entaille en « V » en flexion pure.

En utilisant la formule théorique de Heywood et les constantes citées ci-dessus, on peut tracer la courbe des facteurs de Heywood  $q_{2,H}$  théorique:

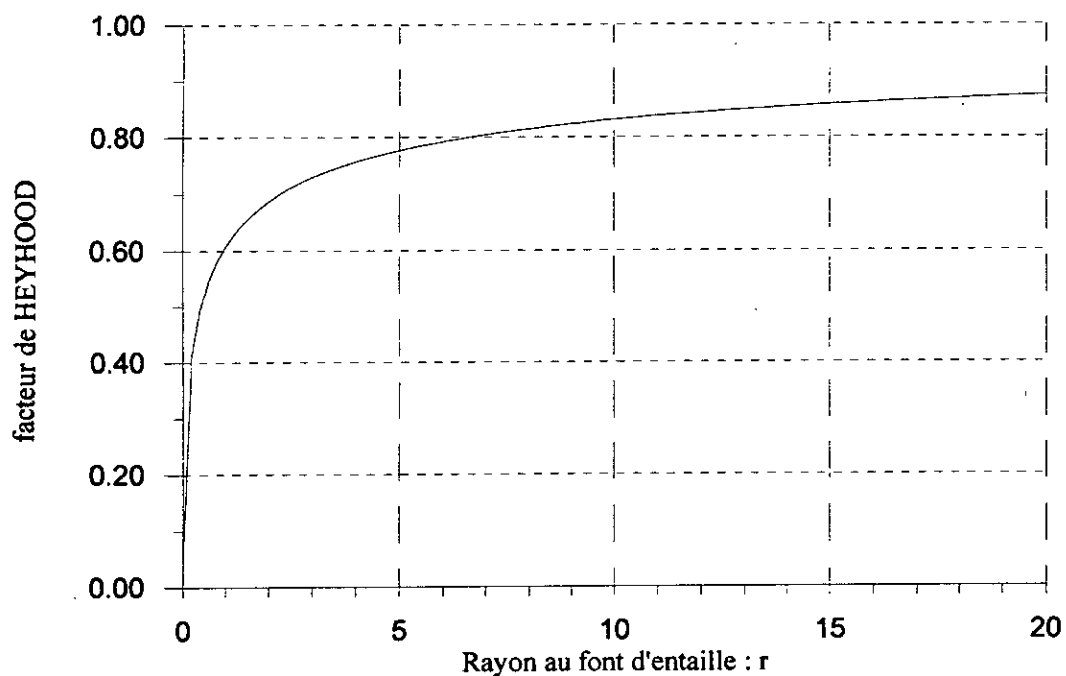


Fig. II-6 : facteur de HEYHOOD théorique  $q_{2,H}$ , en fonction du rayon au fond d'entaille (Acier au carbone, entaille en " V " )

### II-3-INFLUENCE DES FACTEURS METALLURGIQUES SUR LA TENUE EN FATIGUE :

La réalisation d'une pièce comporte toujours des opérations mécaniques et thermiques qui permettent sa mise en forme et qui agissent sur l'état métallurgique du matériau utilisé, donc ses caractéristiques d'utilisation.

La structure finale, et par suite, les caractéristiques d'une pièce lui sont apportées progressivement au cours de sa fabrication, ainsi l'élaboration de l'acier fixera sa qualité inclusionnaire et sa composition chimique. Quant au traitement thermique qui débute dès l'élaboration de l'acier, et permet de faciliter la mise en forme de la pièce et de lui donner ses caractéristiques d'utilisation. Les défauts éventuels qui peuvent apparaître sont susceptibles de se retrouver au stade final et de jouer sur la tenue en fatigue.

Comme la limite de fatigue est directement en corrélation avec la charge de rupture, tout facteur, tel que composition chimique ou traitement thermique, qui modifie cette grandeur entraîne une modification de la limite de fatigue. Ainsi des additions de carbone, manganèse, nickel, chrome, molybdène, vanadium, cuivre, bore et phosphore modifient la limite de fatigue des aciers sensiblement dans la proportion où ils agissent sur la charge de rupture.

Pour l'acier extra-doux recuit, la limite d'endurance de flexion rotative est voisine de la limite d'élasticité apparente à la traction  $R_e$ , [4], à l'état recuit il a été observé que la limite d'endurance augmente avec la teneur en carbone, mais moins rapidement que la charge de rupture à la traction  $R_m$ , de sorte que le rapport d'endurance est plus petit pour les aciers durs que pour les aciers doux.

Pour l'acier utilisé à l'état trempé-revenu la tenue en fatigue mesurée sur éprouvettes lisses est sensiblement proportionnelle à  $R_m$ , ce ci jusqu'à des valeurs de 1200 à 1300 N/mm<sup>2</sup> environ, on note également une augmentation rapide de la sensibilité à l'entaille avec une résistance à la traction pour des structures martensitiques revenues.

On a remarqué aussi que la résistance à la flexion alternée d'un matériau à gros grains est un peu plus faible que celle du même acier à grains fins, [ 4 ]

## **CHAPITRE III**

### **ETUDE EXPERIMENTALE**

Dans notre présente étude le but été d'étudier la variation du facteur de sensibilité à l'effet d'entaille pour différents acuité et aussi sa variation avec le changement des caractéristiques mécaniques du matériau . Pour cela nous avons utilisé des éprouvettes normalisées avec différents rayons d'entaille pour varier le facteur de concentration de contrainte utilisées et différents traitements thermiques pour faire varier les caractéristiques mécanique du matériau.

### I- La machine d'essai :

Nous avons utilisé une machine de flexion rotative du type « SCHENCK ». (photo :III.1), avec un effort appliqué en deux points.

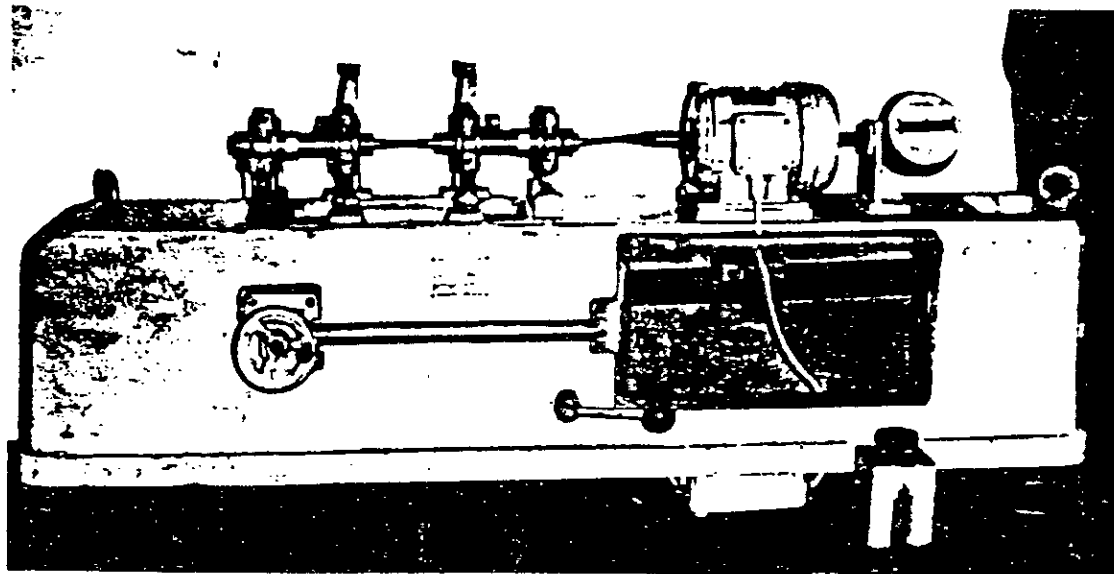


Photo III-1 : machine d'essai



### II-1-1- Description de la machine d'essai :

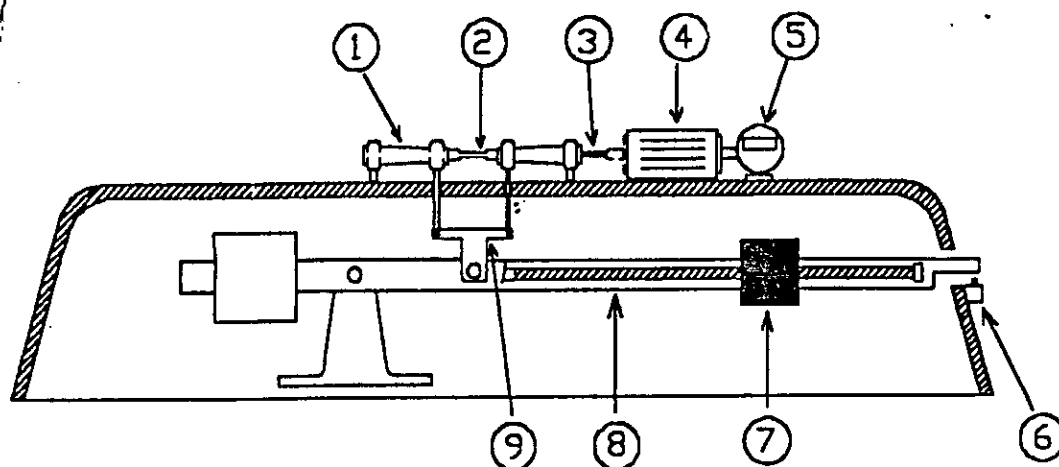


Fig. III-1 schéma de la machine d'essai

La machine d'essai utilisée est structurée en deux parties principales

- Une partie tournante : composée de deux fourreaux (1) à l'intérieur chaque fourreaux est monté une pince qui permet le serrage de l'éprouvette (2) lors du montage sur chaque . Sur chaque fourreaux sont montées deux roulements rotules à deux rangés de billes. L'un des fourreaux est relié à un moteur électrique (4), tournant à 2760 tr/min avec un accouplement élastique (3) et le moteur est relié à un compte-tours (5).
- une partie de chargement : Composée principalement d'un levier(8) sur lequel peut glisser une masse (7) dont le déplacement est mesuré grâce à une aiguille coulissante le long d'une règle de 300 mm.. Ce levier est relié aux deux fourreaux par l'intermédiaire d'une chape (9) de manière à transmettre à la partie tournante l'effort produit par la masse coulissante. Le levier peut entrer en contact avec un coupe circuit lors de la rupture de l'éprouvette ce qui permet de mesurer le nombre de cycles effectués sous une certaine charge jusqu'à rupture .

### III-1-2 Chargement des éprouvettes :

La machine d'essai est à deux appuis, moment est constant tout le long de la partie utile de l'éprouvette (entre les deux appuis), fig (III-2).

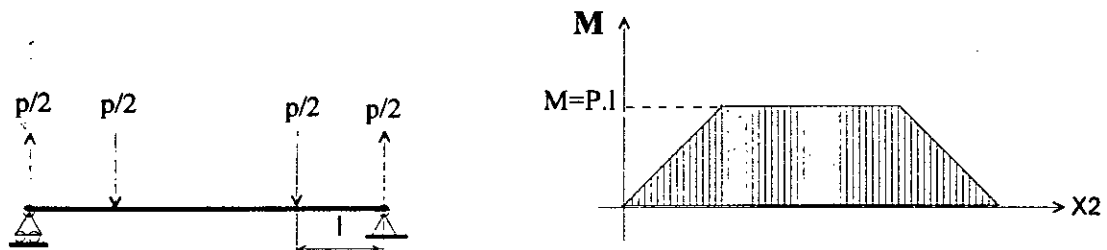


Fig.III-2 Chargement de l'éprouvette

Les contraintes agissant sur chaque fibre varient ainsi en fonction du temps suivant une fonction sinusoïdale avec une valeur moyenne nulle (flexion purement alternée,  $\sigma_m = 0$  et  $R_\sigma = -1$ ); Chaque révolution correspond à un cycle ou une période d'effort.

Pour les fibres externes qui sont les plus sollicitées, l'amplitude de la variation de l'effort est maximale. C'est cette amplitude qui intervient dans le calcul de la contrainte, la fréquence des révolutions étant constante (46 Hz) pendant toute la durée de l'essai.

La contrainte de la fibre externe se calcule par la formule de Navier:

$$\sigma = \frac{M}{\frac{I}{v}} \quad (\text{III-1})$$

M: moment fléchissant par rapport à la section considérée,  $M = P.l$

P: charge appliquée (due à la masse coulissante + masses additives)

l: distance de l'axe d'application de la charge à la section considérée

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

v: distance de la fibre neutre à la fibre externe  $=d/2$

$$\frac{I}{v} = \frac{\pi d^3}{32} \quad (\text{III-2})$$

tel que d: diamètre de la section nette de l'éprouvette.

## III-2 Les éprouvettes d'essai :

### III-2-1 Formes et dimensions des éprouvettes:

Pour notre présente étude on a utilisé principalement deux formes d'éprouvette: éprouvettes entaillées et éprouvettes lisses.

La forme et les dimensions sont conformes aux normes cités dans le chapitre I.

#### III-2-1-1 Eprouvettes lisses:

Elles sont de formes cylindriques avec une partie utile de diamètre  $8 \text{ mm} \pm 0.02$ , pour avoir une bonne précision sur les contrainte appliquée, et de deux têtes (pour le serrage) de diamètre 12 mm compatible avec les fourreaux de serrage de la machine. Ces deux parties sont raccordées par un congé de rayon de 30 mm pour diminuer la concentration de contrainte dans la partie utile de l'éprouvette. les longueurs et d'autres précisions sont cités dans la figure : (III-3).

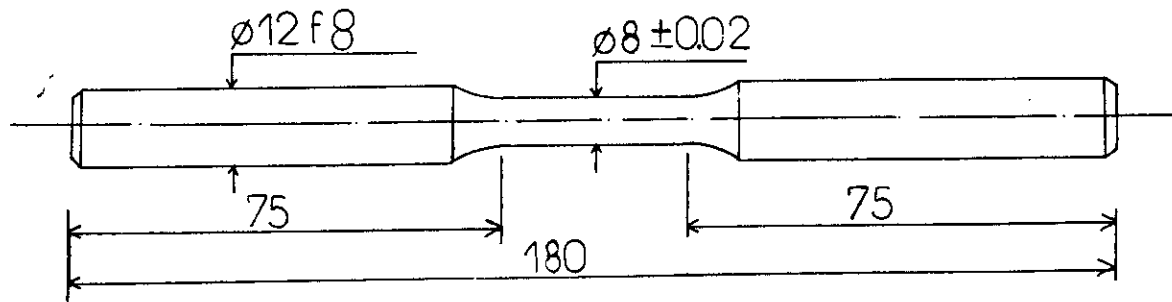


Fig.III-3 : Eprouvette lisse

#### III-2-1-2 Eprouvette entaillée:

L'éprouvette entaillée à la forme générale d'une lisse avec les mêmes dimensions sauf la partie utile, ou elle a un diamètre extérieur de 10 mm avec une entaille au milieu de profondeur de 1 mm ce qui donne un diamètre de 8 mm pour la section nette de travail, (fig.III.4).

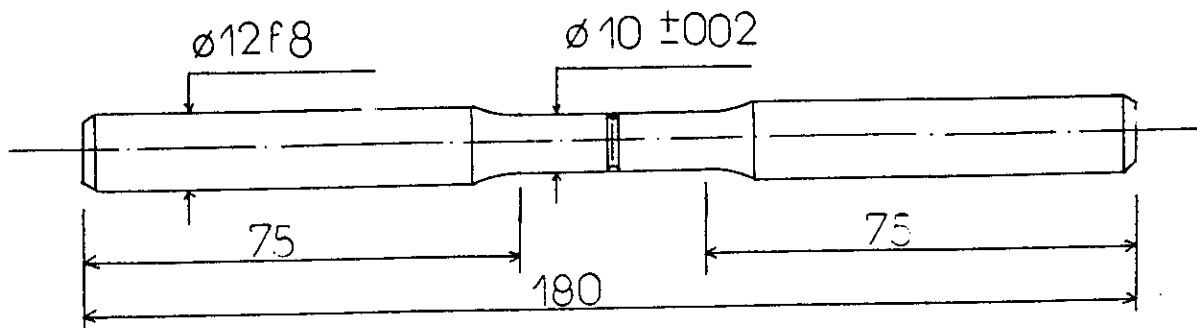
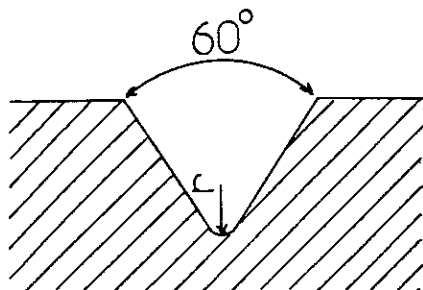


Fig.III-4 : Eprouvette entaillée

Les entailles sont de forme en « V », d'un angle de  $60^\circ$  et de profondeur de 1 mm, avec un rayon au fond d'entaille, (fig.III-5).

Pour nos essais, deux rayons en fond d'entaille ont été utilisés ( $r=0.5\text{mm}$  et  $r=0.1\text{mm}$ ).



**Fig.III-5 : Forme de l'entaille**

### III-2-2 Usinage des éprouvettes:

Les éprouvettes ont été réalisées à partir de barre de 15 mm de diamètre de composition semblable d'un acier faiblement allié au nickel-chrome de nuance 30NC11, à l'état recuit, les caractéristiques mécaniques et la composition chimique de l'acier sont données dans le tableau(III-1).

L'usinage des éprouvettes a été fait au tour et on peut dire qu'il est passé par deux étapes d'usinage:

- L'ébauche: on a fait le tournage par passes de profondeurs décroissante jusqu'au diamètre 12.5 mm puis jusqu'au diamètre 8.5 mm (10.5 mm pour les éprouvettes entaillées) dans la partie utile de l'éprouvette lisse.

Le but de cette ébauche été d'avoir la forme générale de l'éprouvette.

- Finition: elle est faite directement après l'ébauche dans le cas des éprouvettes qui ne subiront pas de traitement thermique. Cette étape est faite après traitement thermique dans le cas ou les éprouvettes subiront ce dernier, pour enlever la couche superficielle qui subit une décarburation qui dont l'effet est néfaste sur la tenue en fatigue, aussi pour rectifié les

éprouvettes dans l'éventualité où elles subissent des petites déformations dues aux contraintes thermiques (à cause du changement de section).

Cette étape de finition a été faite aussi sur le tours (non disponibilité d'une rectifieuse) avec des passes de petites profondeurs (surtout pour la partie utile) pour que l'éprouvette ne subisse pas de déformation ou d'écrouissage superficiel.

On a terminé cette étape par une finition avec du papier abrasif allant du papier à gros grains jusqu'au plus fin, jusqu'à l'obtention de la cote désirée avec une bonne précision.

Les entailles ont été réalisées avec des outils à fileter en carbure avec un angle de tête de  $60^\circ$  et de rayon au sommet d'angle de 0.5 mm et 0.1 mm

### **III-3 Traitements thermiques :**

On a choisi les traitements thermiques de telle façon à avoir une variation notable dans les caractéristiques mécaniques et métallurgiques (structure) pour qu'on puisse apprécier la variation du facteur de sensibilité à l'effet d'entaille en fonction de ces caractéristiques.

En considération avec la quantité du matériau qui a été à notre disposition, on a opté pour trois types d'éprouvettes en fonction du traitement qu'elles subissent. Pour avoir un acier doux, un acier dur et un acier demi dur, donc on a fait :

- des éprouvettes à l'état recuit (sans traitement supplémentaire), pour avoir un acier doux.
- des éprouvettes trempées revenues, pour avoir un acier mi-dur.
- des éprouvettes trempées seulement, pour avoir un acier dur.

Les différents traitements et leurs résultats sont présentés ci-dessous :

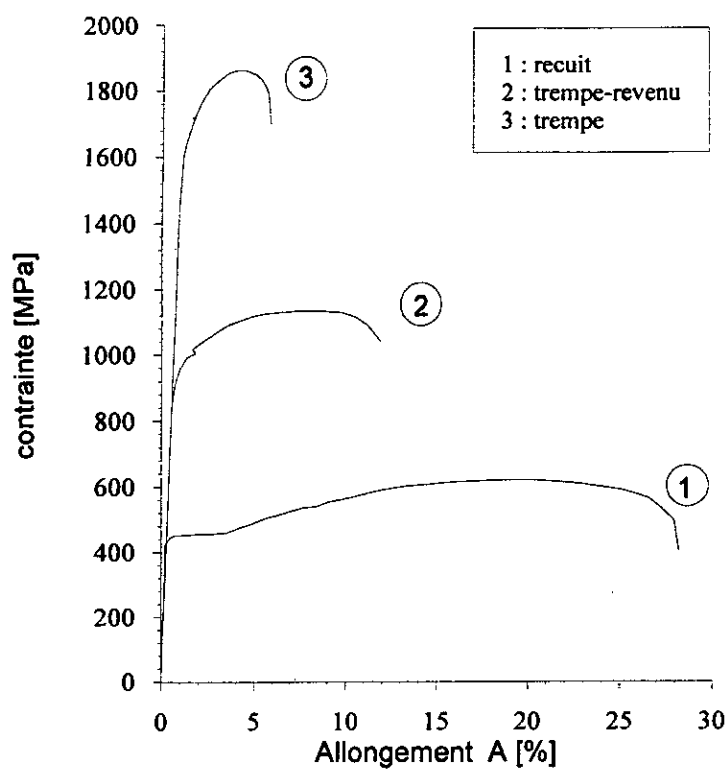
#### **III-3-1 recuit :**

On a utilisé l'acier tel qu'il a été stocké à l'état recuit.

Les différentes caractéristiques mécaniques sont présentées dans le tableau III-1 :

**Tableau.III-1** : propriétés mécaniques de l'acier 30NC11 à l'état recuit:

composition chimique			propriétés mécaniques				
principaux composants			limite de rupture	limite élastique	allong à la rupture	striction	dureté
C	Ni	Cr	Rm[MPa]	Re[MPa]	A [%]	Z [%]	HRB
0.3	3	0.8	620	420	28	66	88

**Fig. III-6**: courbes de traction conventionnelles pour différents états de l'acier 30NC11

On a fait l'essai de traction à cette acier et la courbe conventionnelle est donnée par la figure.III-6 : courbe (1) .

On remarque sur cette courbe qu'elle présente un palier au niveau de la limite élastique (caractéristique de l'acier ductile), et elle présente un grand allongement à la rupture ( $A = 28\%$ ).

La structure métallographique (photo III-2-a) est composée de: ferrite et perlite



a\ - Recuit

b\ - Trempé

c\ - Trempé-revenu

**Photo III-2 : structures métallographiques de l'acier  
30NC11 pour différents traitements thermiques  
(x 250)**

### III-3-2 trempé:

les éprouvettes ont été trempées à l'huile après un chauffage à  $875\text{ C}^\circ$  et un maintien à cette température pendant 15min.

Les propriétés mécanique après trempé sont données sur le tableau III.2

**Tableau.III-2 : propriétés mécaniques de l'acier 30NC11 à l'état trempé:**

composition chimique			propriétés mécaniques				
principaux composants			limite de rupture	limite élastique	allongement	striction	dureté
C	Ni	Cr	Rm[MPa]	Re[MPa]	A [%]	Z [%]	HRC
0.3	3	0.8	1850	1600	5	25	51

La courbe de traction conventionnelle est donnée par la courbe (3), (fig. III-6).

On remarque que cette courbe contrairement à celle de l'acier recuit ne présente pas un palier au niveau de la limite élastique donc on a déterminé aussi précisément que possible la limite élastique conventionnelle  $Re_{0,2}$ , la courbe présente un très petit allongement à la rupture ( $A = 5\%$ ).

La structure métallographique se présente sous formée de martensite (Photo III-3 -b).

### III-3-3 trempe revenu:

On a utilisé la même trempe citée ci-dessus suivie d'un revenu à  $600C^{\circ}$  avec un maintient à cette température de  $1^h$  15min

On a choisi la température de  $600C^{\circ}$  pour s'éloigner un peu des caractéristique mécanique de la trempe. Cette trempe-revenu nous a permis d'avoir les propriétés mécanique, données dans le tableau :III-3

Tableau.III-3 : propriétés mécaniques de l'acier 30NC11 à l'état trempé-revenu:

composition chimique			propriétés mécaniques				
principaux composants			limite de rupture	limite élastique	allongement	striction	dureté
C	Ni	Cr	Rm[MPa]	Re[MPa]	A [%]	Z [%]	HRC
0.3	3	0.8	1130	950	12	55	36

La courbe de traction de cette acier est donnée par la courbe (2), (fig.III-4 ). On remarque sur cette courbe qu'elle ne présente pas aussi un palier au niveau de la limite élastique, donc on à utiliser aussi la notion de limite élastique à 0.2% d'allongement permanent : $Re_{0,2}$ . On remarque aussi que l'allongement est intermédiaire entre celui de l'acier recuit et l'acier trempé. La structure métallographique (photo: III-2-c) se compose de: sorbite et de martensite .



### III-4 Méthode d'essai et de détermination de la limite d'endurance:

On a choisit une méthode qui nous permet de tracer la courbe de WOHLER (la partie linéaire seulement), en utilisant une formule analytique de cette courbe, dont la partie linéaire, est de la forme :

$$\sigma(N) = A \ln(N) + B \quad (\text{III-3})$$

La méthode consiste à essayer des éprouvettes à différents niveaux de charges jusqu'à rupture, plusieurs éprouvettes pour chaque niveau.

Pour notre présente étude et vu le nombre limité d'éprouvettes qui ont été disponibles on a utilisé 4 niveaux de charge avec 2 éprouvettes pour chaque niveau.

Quand au choix des niveaux de contraintes, on prenait une valeur approximative de la limite d'endurance (prise de la littérature) puis, suivant le domaine de rupture on faisait varier la charge (en augmentant ou en diminuant) avec un pas de 16.23 Mpa, ce qui correspond à 20 mm sur la règle de la machine d'essai. Pour couvrir toute la partie linéaire de la courbe de WOHLER, on a été amené par fois à varier ce pas.

On a choisi de déterminer la limite d'endurances conventionnelle donc à un nombre de cycle correspondant à  $10^6$  cycles dans notre cas.

La moyenne des nombres de cycles de rupture est calculée pour chaque niveau. On a tracé à partir de ces moyennes la droite des moindres carrés des 4 niveaux de contraintes. A partir de l'équation de la droite on fait une extrapolation pour un nombre de cycle correspondant à la limite d'endurance ( $10^6$  cycles).

### III-5 : FACIES DE RUPTURE :

Avant de présenter les résultats numériques et les calculs, des remarques sont faites sur les faciès de rupture des éprouvettes, pour montrer les différences entre les faciès suivant d'importantes variables dont l'amplitude des contraintes, la nature du matériau, et la forme de l'éprouvette (lisse ou entaillées).

La première remarque est qu'il existe deux zones distinctes sur les faciès.

- Une zone de cassure brutale ou finale plus ou moins importante suivant l'amplitude de la contrainte. Elle est plus nette sur les éprouvettes entaillées que sur les éprouvettes lisses. Cette zone de rupture brutale est du côté de la circonférence pour le cas des éprouvettes lisses et elle est plus ou moins centrée suivant l'amplitude de la contrainte pour le cas des éprouvettes entaillées, photos (III-3) et (III-4).

Nous avons remarqué que cette zone est centrée dans le cas de fortes charges et décalé pour les faibles charges PHOTO (III-7) et (III -8). Cela s'explique par le fait que la probabilité de développement d'un plus grand nombre de fissures s'accroît avec la charge .

Généralement, Pour les faibles charges une seule fissure se développe sur le côté et domine les autres fissures .

- Une zone de fissure de fatigue qui présente une surface plutôt lisse et soyeuse par rapport à la zone de rupture brutale qui est rugueuse et sombre.

Cette fissure s'amorce à la surface de la pièce dans une zone avec concentration de contraintes (entaillées, ou état de surface ) et se propage au cœur de la section. Elle ne se développe pas dans le même plan pour les éprouvettes lisses alors qu'elle est pratiquement plane dans les éprouvettes entaillées. Cela est due au gradient de contrainte et l'entaille guide cette fissure  
photos (III-3) et (III-4)

Cette zone ne présente généralement qu'un seul foyer où elle s'amorce pour les éprouvettes lisses. Par contre elle présente plusieurs amorces dans le cas des éprouvettes entaillées qui se propagent et se déclenchent entre elles pour donner la zone de rupture brutale au centre (photo III-4).

On constate que la surface de rupture est différente d'un traitement thermique à l'autre. Elle est plus rugueuse pour l'acier à l'état recuit que pour l'acier à l'état trempé-revenu avec des cupules allongées dans la zone de rupture brutale . Pour le cas de l'acier recuit qui a une caractéristique de rupture ductile, voir la (photo III-4).

On observe, également, que pour le cas des éprouvettes trempées, la surface est plus soyeuse et la zone de rupture brutale est moins visible et n'est pas <sup>centrée</sup> centrée. (Fig. III-6). cela est due à la rupture fragile de l'éprouvette.

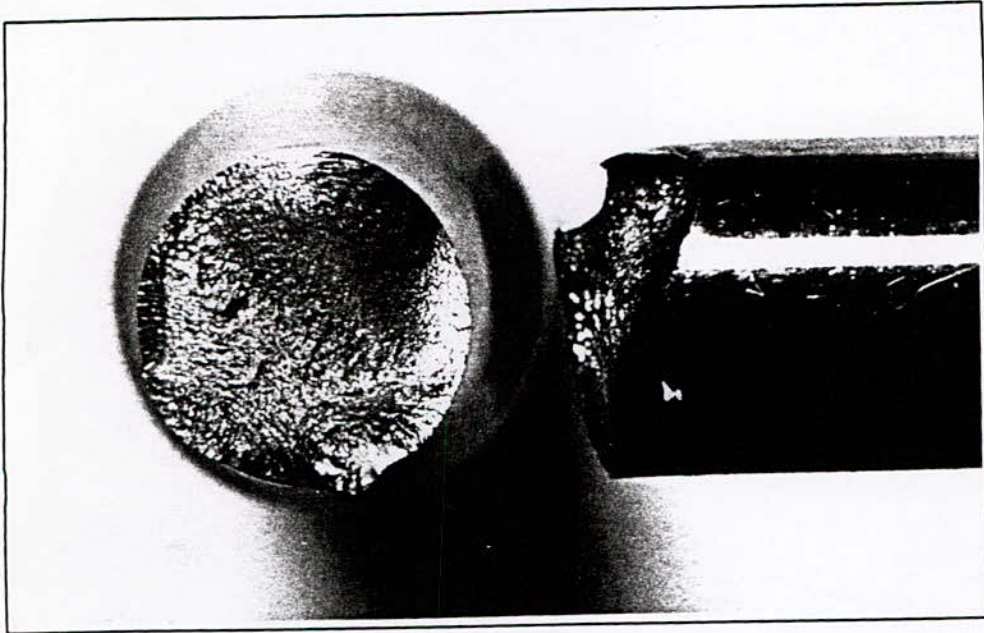


Photo III-3: éprouvette lisse à l'état recuit sous faible charge

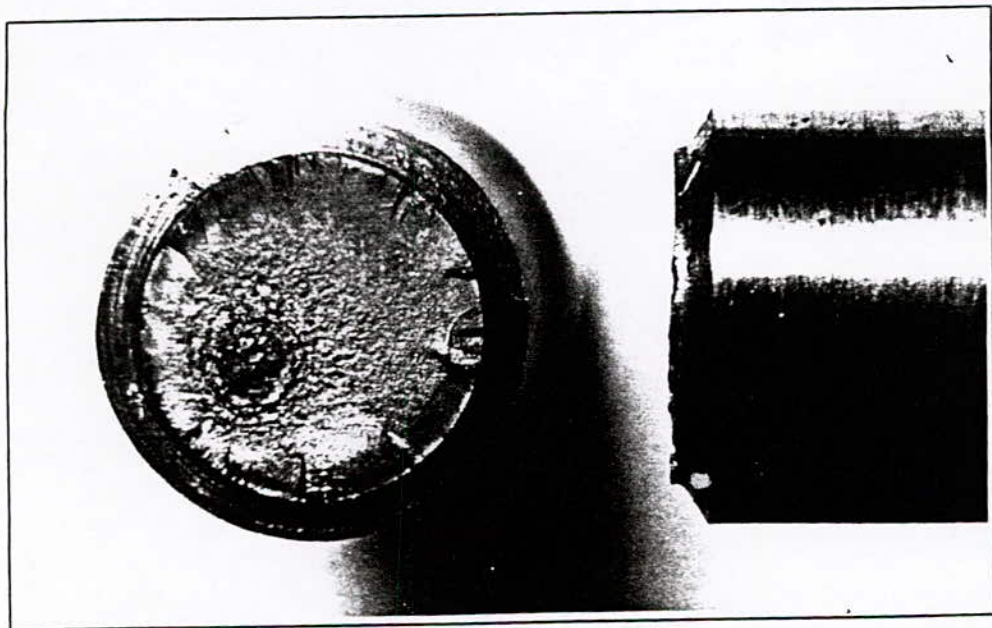


Photo III-4: éprouvette entaillée à l'état recuit sous faible charge



Photo III-5: éprouvette lisse à l'état trempée-revenu



Photo III-6: éprouvette entaillée à l'état trempée sous forte charge

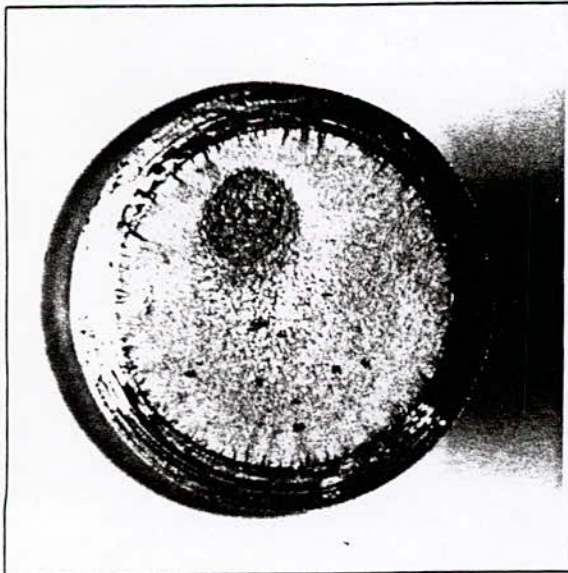


Photo III-7: éprouvette entaillée à l'état trempée-revenue sous faible charge

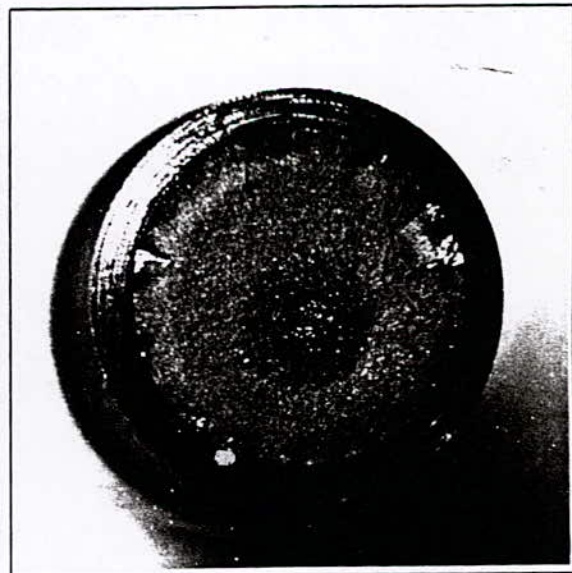


Photo III-8: éprouvette entaillée à l'état trempée-revenue sous forte charge

### III-6 : RESULTATS DES ESSAIS:

Les contraintes sont exprimés en terme de contrainte globale.

#### III-6-1 : Résultats sur éprouvettes à l'état recuits:

##### III-6-1-1 : Epreuves lisses:

Tableau.III-4: Nombre de cycles jusqu'à ruptures en fonction de la contrainte maximale.

Contrainte $\sigma$ [MPa]	Nombre de cycles jusqu'à rupture	
	Essai N° 1	Essai N° 2
358	44700	29600
350	127200	132500
326	466700	696000
312	769700	871000

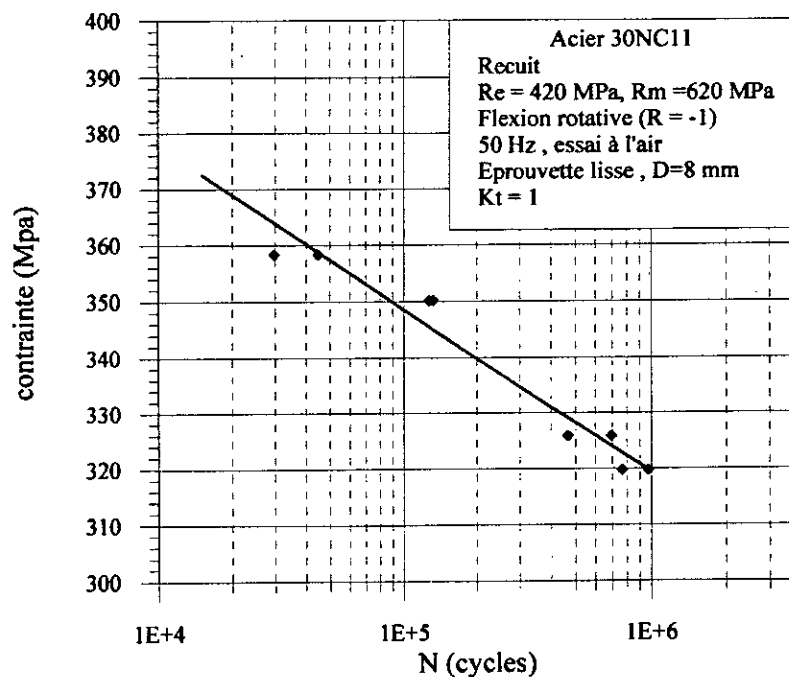


fig. III-7 : courbe d'endurance d'éprouvettes lisses à l'état recuit

Comme nous l'avons indiqué précédemment, le trace de la courbe a été obtenu en appliquant la méthode des moindres carrés sur la moyenne des nombres de cycles obtenues pour chaque niveau de contraintes en supposant une loi de comportement linéaire dans l'échelle choisie pour le tracé. L'observation de la courbe de la figure (Fig.III-7) montre la difficulté qu'on a trouvé dans le choix des niveaux de contraintes. Pour couvrir toute la partie linéaire de la courbe de WOHLER on a été obligés de varier le pas choisi (16.23 MPa) d'un niveau à l'autre.

Après avoir obtenu les résultats du troisième niveau, deux éprouvettes essayées à un niveau de contraintes égal à 310 MPa n'étaient pas rompues. Cela nous a conduit à prendre la moitié du pas choisi entre le troisième et le quatrième niveau. La dispersion des résultats des essais est restée dans des limites acceptables. Notons, que le facteur de corrélation est égal à 0.98. L'équation de la courbe d'interpolation est :

$$\sigma = -12.65 \ln(N) + 494.3 \quad (\text{Mpa}). \quad (\text{III-4})$$

D'où la limite d'endurance à un million de cycles est :

$$\sigma_d(10^6) = 320 \text{MPa}.$$

Ce qui donne un rapport d'endurance  $R_D = 0.515$ .

CAZAUD [ 4 ] à déterminer pour un acier demi-dur à l'état recuit une limite d'endurance égale à 314 MPa.

### III-6-1-2 : Eprouvettes entaillées, $r = 0.5 \text{ mm}$ :

**Tableau III-5 :** Nombre de cycles jusqu'à rupture en fonction de la contrainte maximal de flexion.

Contrainte $\sigma$ [MPa]	Nombre de cycles jusqu'à rupture	
	Essai N° 1	Essai N° 2
277	51300	-
269	118400	-
261	92400	203800
243	556200	341000
231	542000	853100

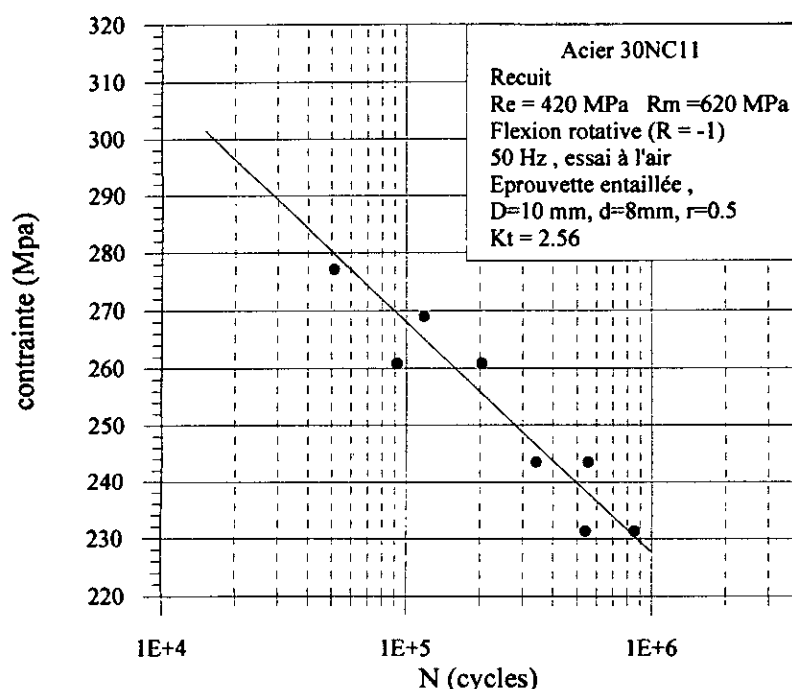


fig. III-8 : courbe d'endurance d'éprouvettes entaillées, r=0.5mm à l'état recuit

Pour les éprouvettes entaillées ( r=0.5mm), on remarque une dispersion des résultats des essais inhérente au phénomène de fatigue. Le premier essai a été fait pour une contrainte de 260.8 MPa (3<sup>e</sup> niveau), en augmentant la contrainte de 8.115 MPa, le nombre de cycles jusqu'à rupture n'a pas pratiquement changé. le niveau de contrainte a été augmentée de 8.115 MPa. Vu le nombre limité des éprouvettes on a fait un essai pour le premier et le deuxième niveau de contraintes, et aussi pour le niveau. Ce qui nous a amené à obtenir cinq niveaux de contraintes.

L'équation de la courbe d'interpolation, obtenue avec un facteur de corrélation égal à 0.99 est :

$$\sigma = -17.601 \ln(N) + 470.7 \quad (\text{Mpa}). \quad (\text{III-5})$$

D'ou la limite d'endurance à un million de cycles est :

$$\sigma_{dn}(10^6) = 228 \text{ MPa}.$$

Et le rapport d'endurance est :  $R_D=0.367$ .

III-6-1-3 : Eprouvettes entaillées,  $r=0.1\text{mm}$  :

Tableau III-6 : Nombre de cycles jusqu'à rupture en fonction de la contrainte maximale de flexion.

Contrainte $\sigma$ [MPa]	Nombre de cycles jusqu'à rupture	
	Essai N° 1	Essai N° 2
285	98600	42100
269	72800	-
253	97800	235100
235	709500	-

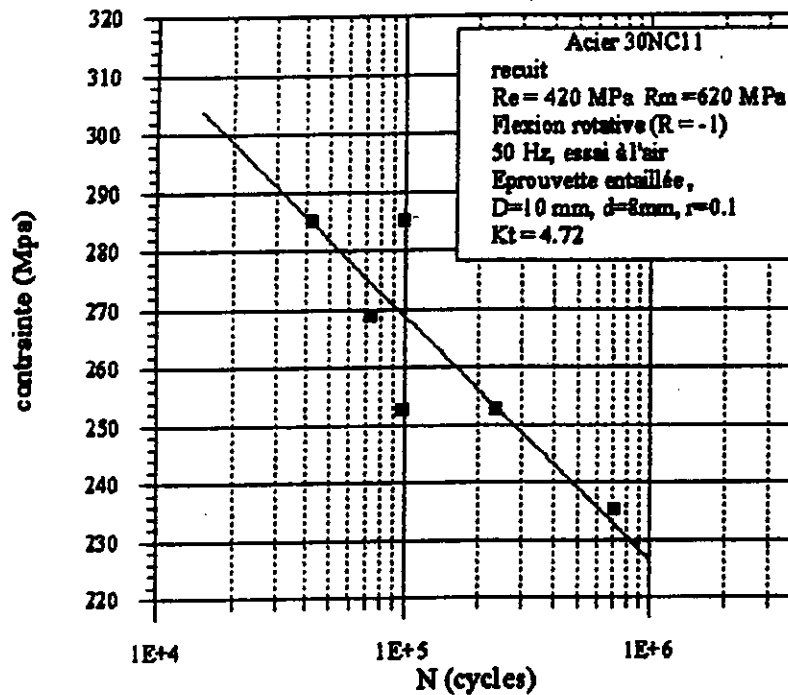


fig. III-9 : courbe d'endurance d'éprouvettes entaillées,  $r=0.1\text{mm}$  à l'état recuit

Comme le montre la figure ci-dessus, les résultats sont toujours dispersés. Au quatrième niveau de contraintes, une éprouvette qu'on a pas représenté sur la figure, a dépassé



un million de cycles sans être rompue ; et au deuxième niveau de contraintes on a accepté un seul essai à cause d'un manque éprouvettes.

L'équation de la courbe d'interpolation, obtenue avec un facteur de corrélation égal à 0.93 est :

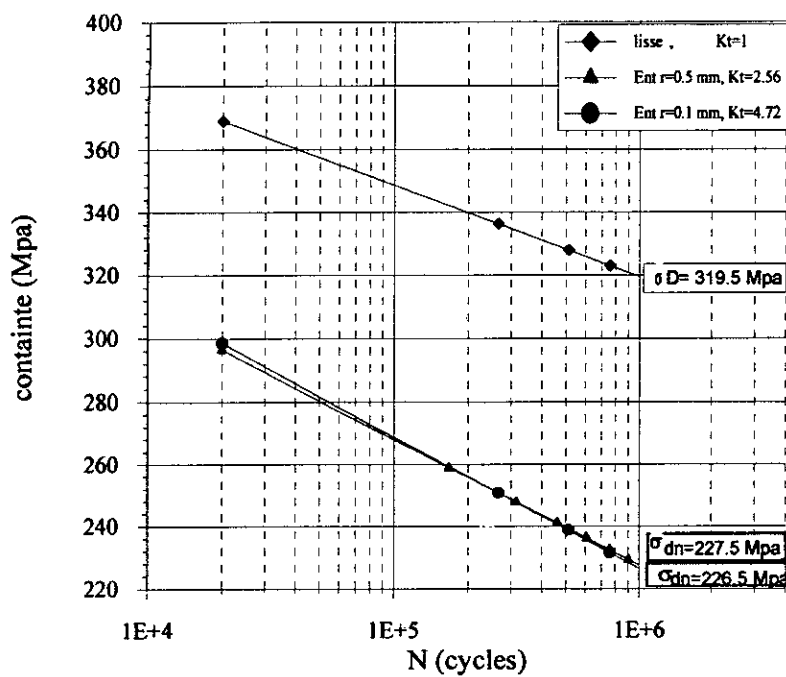
$$\sigma = -18.424 \text{ Ln}(N) + 480.98 \quad (\text{Mpa}). \quad (\text{III-6})$$

D'où la limite d'endurance à un million de cycles est :

$$\sigma_{dn}(10^6) = 227 \text{ MPa}.$$

Ainsi, le rapport d'endurance est :  $R_D = 0.365$ .

Pour montrer l'effet d'entaille, nous avons couplé la courbe correspondante aux éprouvettes lisses avec les courbes correspondantes aux éprouvettes entaillées.



**Fig.III-10 : courbes d'endurances des éprouvettes à l'état recuit**

Nous remarquons pour les rayons 0.5 mm et 0.1 mm, que les courbes de WOHLER sont pratiquement confondues.

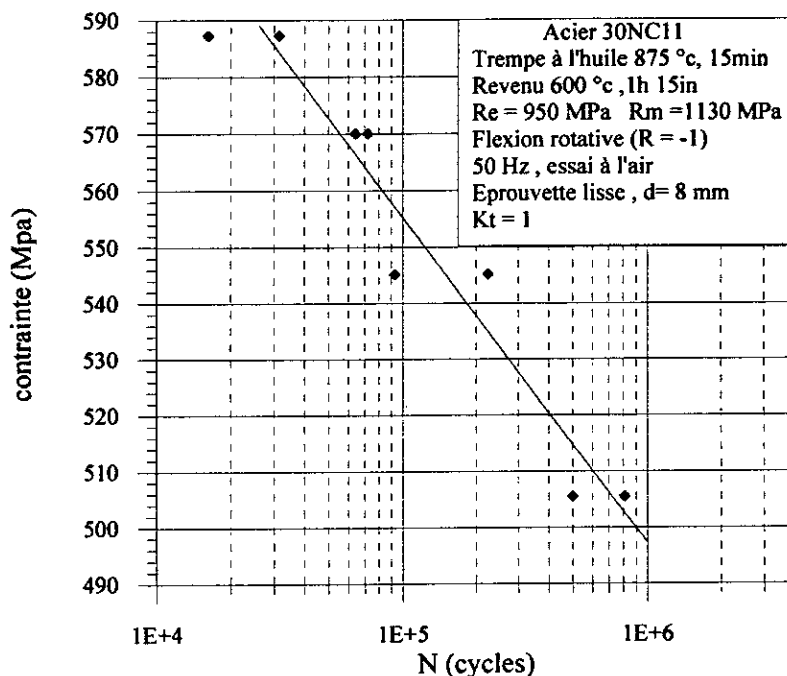
**III-6-2 : Résultats sur éprouvettes trempées-revenues :**

En suivant, la même démarche pratiquée aux essais de fatigue sur éprouvettes à l'état recuit, on a eu les résultats suivants pour les éprouvettes trempées-revenues.

**III-6-2-1 : Eprouvettes lisses :**

**Tableau III-7:** Nombre de cycles jusqu'à rupture en fonction de la contrainte maximale de flexion.

Contrainte $\sigma$ [MPa]	Nombre de cycles jusqu'à rupture	
	Essai N° 1	Essai N° 2
587	16200	31500
570	64200	72100
545	224300	93000
505	498500	809500



**fig. III-11 : courbe d'endurance d'éprouvettes lisses à l'état trempée revenue**

Là aussi, nous observons la dispersion des résultats mais cette dispersion est restée dans des limites acceptables. Et pour couvrir toute la partie linéaire de la courbe de WOHLER on a varié le pas choisi en l'augmentant chaque fois qu'on descend d'un niveau de contrainte à l'autre.

L'équation de la courbe d'interpolation, obtenue avec un facteur de corrélation égal à 0.99 est :

$$\sigma = -25.196 \ln(N) + 845.4 \quad (\text{Mpa}). \quad (\text{III-7})$$

D'où la limite d'endurance à un million de cycles est:

$$\sigma_d(10^6) = 497 \text{ MPa}.$$

Ce qui donne un rapport d'endurance  $R_D = 0.44$ .

### III-6-2-2 : Eprouvettes entaillées, $r=0.5$ mm:

**Tableau III-8 :** Nombre de cycles jusqu'à rupture en fonction de la contrainte maximale de flexion.

Contrainte $\sigma$ [MPa]	Nombre de cycles jusqu'à rupture	
	Essai N° 1	Essai N° 2
342	39600	40000
321	253300	67300
306	265200	518300
293	485200	807400

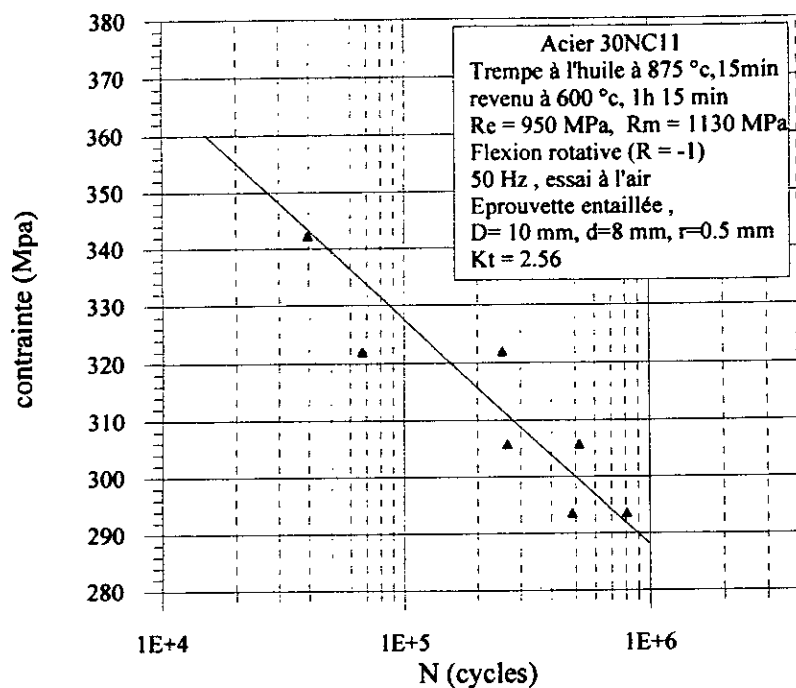


fig. III-12 : courbe d'endurance d'éprouvettes entaillées, r=0.5mm à l'état trempée revenu

Le tracé de cette courbe a été obtenu pour quatre niveaux de contraintes, dont le premier ne contient qu'une seule mesure du nombre de cycles jusqu'à rupture au lieu de deux à cause du nombre limité éprouvettes. Notons ici qu'on a raté pas mal d'éprouvettes pendant l'usinage qui demande beaucoup de précision.

L'équation de la courbe d'interpolation, obtenue avec un facteur de corrélation égal à 0.99 est :

$$\sigma = -17.51 \ln(N) + 528.8 \quad (\text{Mpa}). \quad (\text{III-8})$$

D'où la limite d'endurance à un million de cycles est :

$$\sigma_{dn}(10^6) = 287 \text{ MPa}.$$

Ainsi, le rapport d'endurance est :  $R_D = 0.25$ .

### III-6-2-3 : Eprouvettes entaillées, $r=0.1$ mm :

Tableau III-9 : Nombre de cycles jusqu'à rupture en fonction de la contrainte maximale de flexion.

Contrainte $\sigma$ [MPa]	Nombre de cycles jusqu'à rupture	
	Essai N° 1	Essai N° 2
326	73300	39700
310	103000	158400
293	227500	87300
277	763400	489300

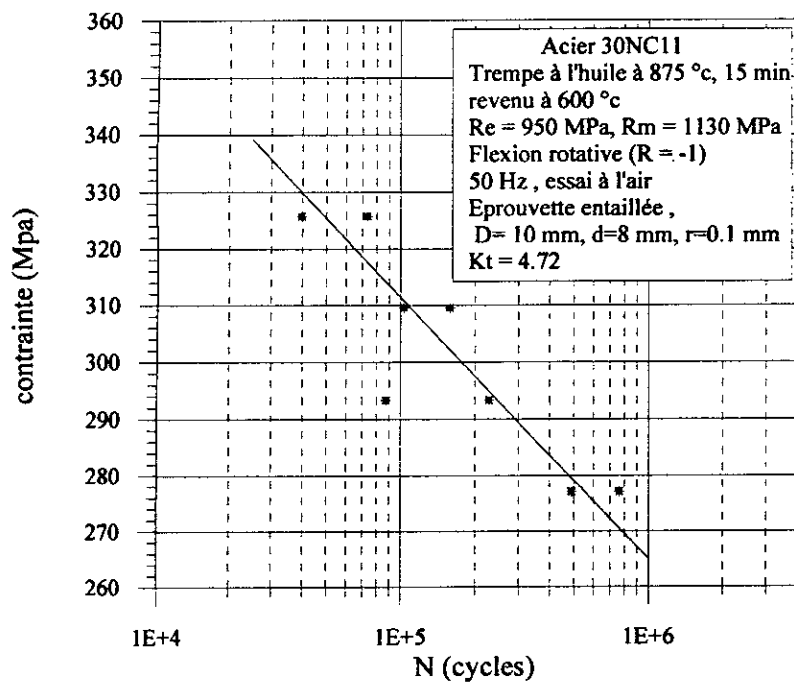


fig. III-13 : courbe d'endurance d'éprouvettes entaillées,  $r=0.1$  mm à l'état trempé - revenu

Dans ces essais on a réussi à prendre des niveaux de contraintes équidistants. En revanche, les résultats ont été dispersés, mais cette dispersion a été dans des limites acceptables.

L'équation de la courbe d'interpolation, obtenue avec un facteur de corrélation égal à 0.96 est :

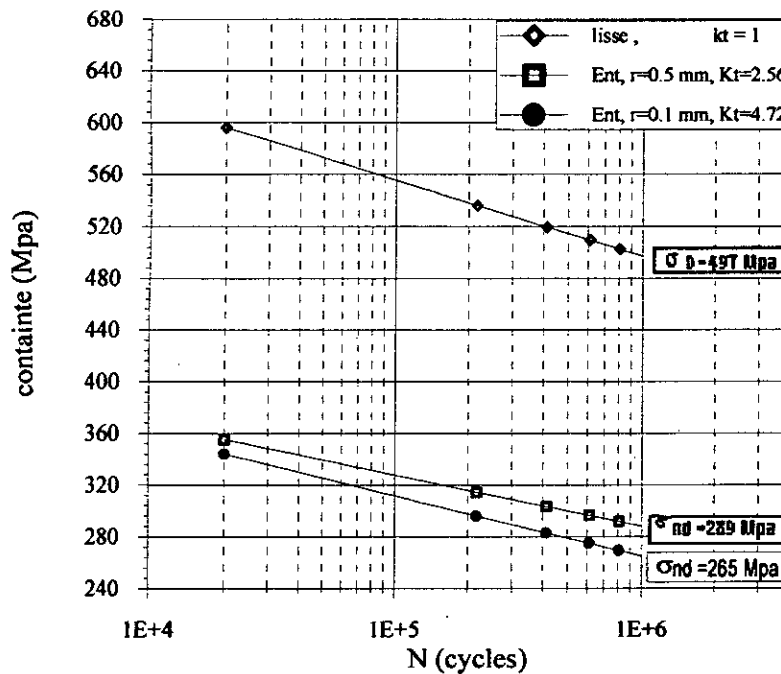
$$\sigma = -20.131 \text{ Ln}(N) + 543.194 \quad (\text{Mpa}) \quad (\text{III-9})$$

D'où la limite d'endurance à un million de cycles est :

$$\sigma_{dn}(10^6) = 265 \text{ MPa.}$$

Ainsi, le rapport d'endurance est :  $R_D = 0.235$ .

On a couplé la courbe correspondante aux éprouvettes lisses avec les courbes correspondantes aux éprouvettes entaillées.



**Fig.III-14 : Courbes d'endurances des éprouvettes à l'état trempées à 875 °C ,revenues à 600°C**

Comme dans le cas des éprouvettes à l'état recuit ; là aussi, nous observons une diminution de la limite d'endurance des éprouvettes entaillées par rapport aux éprouvettes lisses, mais dans ce cas elle est plus importante. La courbe pour le rayon 0.1 mm est en dessous de celle de 0.5mm. La différence est plus nette entre ces deux courbes par rapport aux résultats de l'état recuit. Cela est dû à l'augmentation de la dureté du matériau à l'état trempé-revenu (plus le matériau est doux plus il s'adapte)

### III-6-3 : Résultats sur éprouvettes trempées :

#### III-6-3-1 : Eprouvettes lisses :

Pour une contrainte maximale de la machine d'essai (650 MPa), ces éprouvettes ont dépassé un million de cycles sans être rompues. Donc, on n'a pas pu parvenir à la limite d'endurance. Un calcul de cette dernière à l'aide de la formule (II-12) :

$$\sigma_D(50\%) = R_m(0.58 - 1.1 E-4 R_m) \quad (\text{III-10})$$

a trouvé pour  $R_m = 1850$  MPa une limite d'endurance :

$$\sigma_D = 696.5 \text{ MPa.}$$

D'où le rapport d'endurance est :  $R_D = 0.376$ .

On a choisi cette relation parce qu'elle donne pour les limites de rupture :  $R_m = 620$  MPa (acier à l'état recuit) et  $R_M = 1130$  MPa (acier trempé-revenu), des valeurs très proches de celle qu'on a trouvé expérimentalement.

En utilisant la formule (II-12), on trouve :  $\sigma_D(620 \text{ Mpa}) = 317 \text{ Mpa}$

$\sigma_D(1130 \text{ Mpa}) = 515 \text{ Mpa}$

Alors qu'on a trouvé expérimentalement:  $\sigma_D(620 \text{ Mpa}) = 320 \text{ Mpa}$

$\sigma_D(1130 \text{ Mpa}) = 497 \text{ MPa}$

#### III-6-3-2 : Eprouvette entaillées, $r = 0.5 \text{ mm}$ :

**Tableau III-10** : Nombre de cycles jusqu'à rupture en fonction de la contrainte maximale de flexion.

Contrainte $\sigma$ [MPa]	Nombre de cycles jusqu'à rupture	
	Essai N° 1	Essai N° 2
456	21500	62300
431	106200	99200
415	310800	131000
399	-	813600

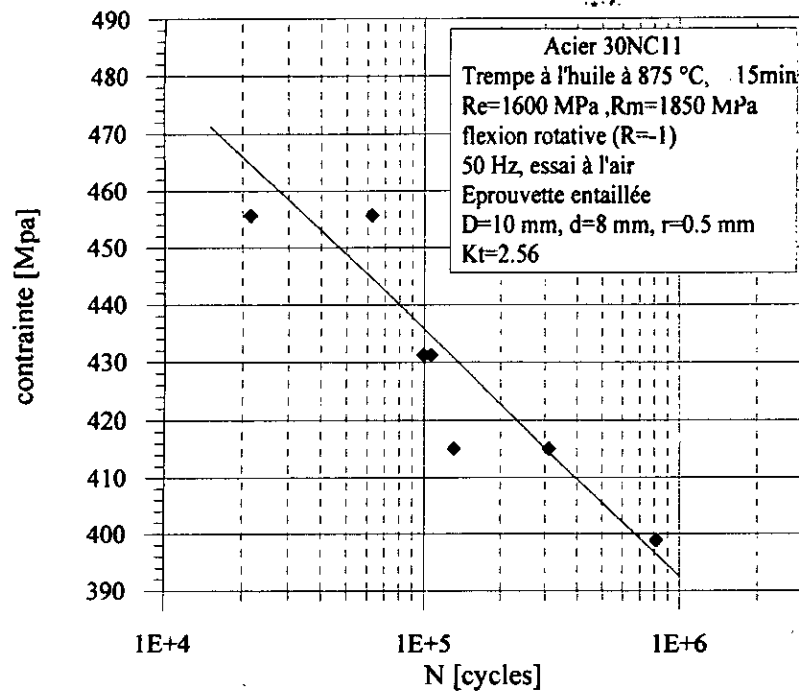


fig. III-13 : courbe d'endurance d'éprouvettes entaillées, r=0.5mm à l'état trempée

L'équation de la courbe d'interpolation, obtenue avec un facteur de corrélation égal à 0.9 est :

$$\sigma = -18.792 \ln(N) + 652.1 \quad (\text{Mpa}). \quad (\text{III-11})$$

D'où la limite d'endurance à un million de cycles est :

$$\sigma_{dn}(10^6) = 393 \text{ MPa}.$$

Ainsi, le rapport d'endurance est :  $R_D = 0.21$ .

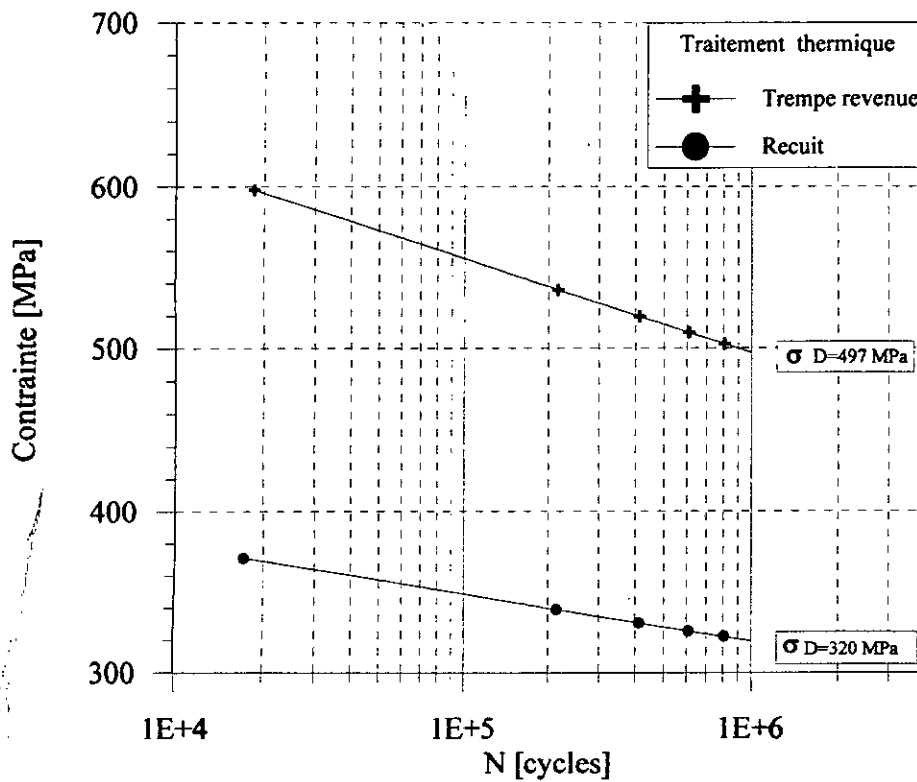
### III-6-3-3 : Eprouvettes entaillées, r=0.1 mm :

L'usinage de l'entaille de rayon 0.1 mm a été très difficile à cause de la dureté élevée de l'acier trempé. L'outil à carbure n'était pas assez dur pour donner la géométrie voulue. Un agrandissement de cent fois du profil de l'entaille a montré qu'il y a arrachements de matière, et une mauvaise courbure en fond d'entaille.

Avant de passer à l'exploitation des résultats, nous voudrions faire une comparaison entre les courbes de WOHLER pour les éprouvettes lisses, entaillées 0.5 mm et entaillées 0.1mm subissant différents traitements thermiques.

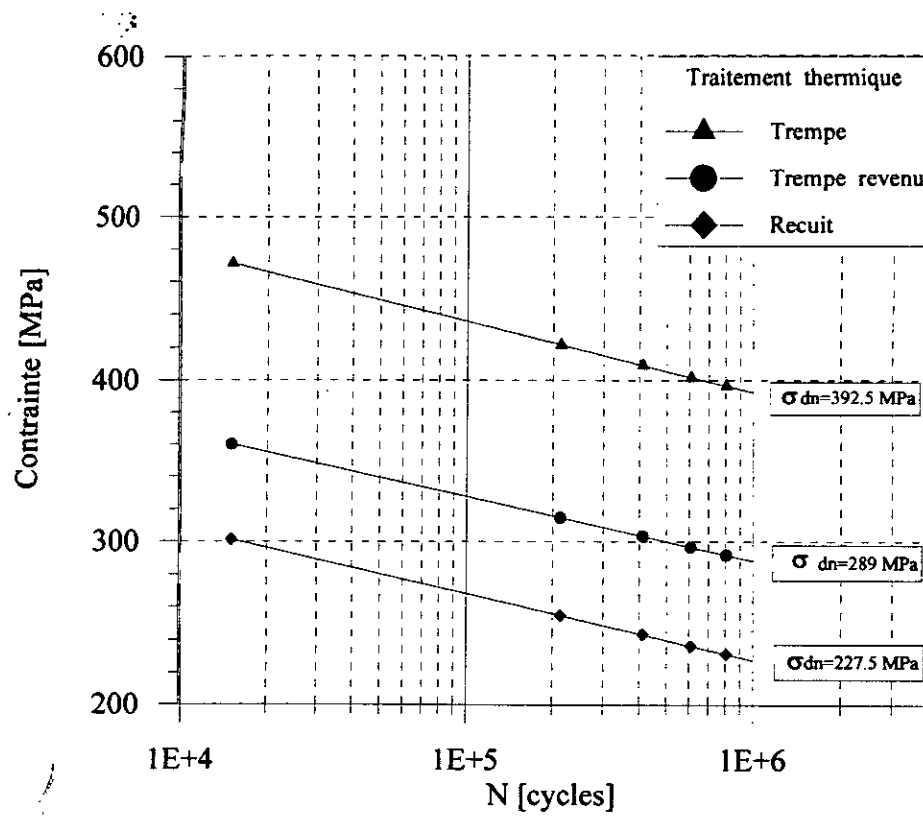


Les courbes ci dessous s'intéressent à l'effet du traitement thermique:



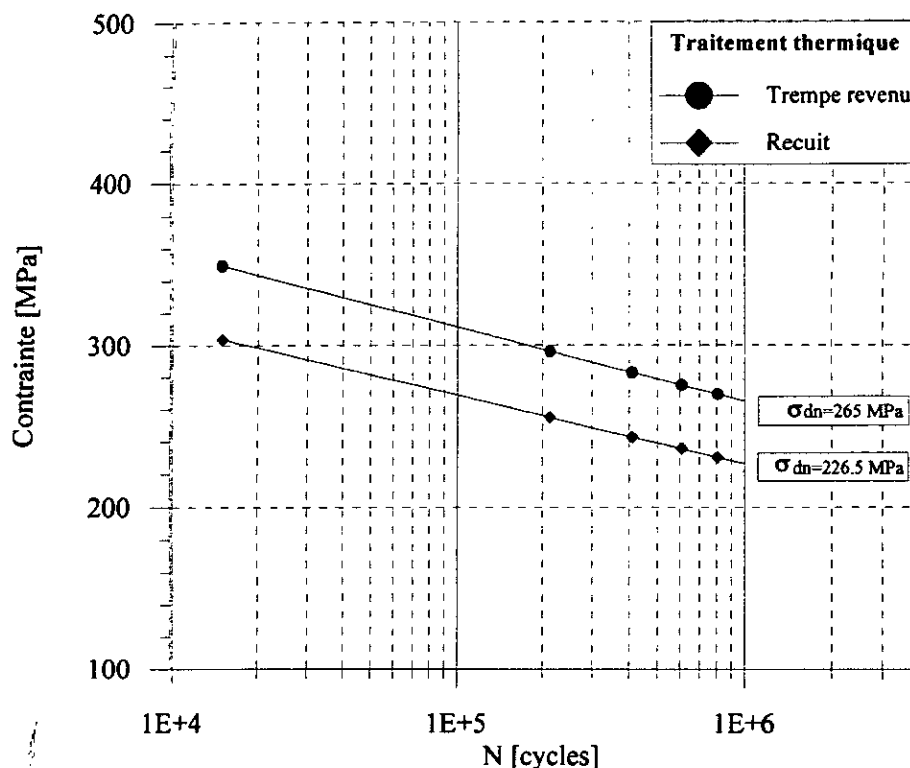
**Fig.III-14 : Courbes d'endurances des éprouvettes lisses pour différents traitements thermiques**

D'une part, nous remarquons une augmentation de la limite d'endurance des éprouvettes lisses trempées-revenues par rapport aux éprouvettes lisses à l'état recuit.



**Fig.III-15 : Courbes d'endurances des éprouvettes entaillées,  $r=0.5\text{mm}$ , pour différents traitements thermiques**

Nous observons une augmentation de la limite d'endurance en passant de l'état recuit à l'état trempé-revenu et de l'état trempé-revenu à l'état trempé. Cette augmentation est moins importante que celle vue pour le cas des éprouvettes lisses.



**Fig.III-16 : Courbes d'endurances des éprouvettes entaillées, r=0.1mm,**

Là aussi, la limite d'endurance de l'acier trempé-revenu augmente par rapport à l'acier recuit. Cette augmentation est inférieure à celle remarquée pour les éprouvettes entaillées de rayon 0.5mm.

### III-7 : Exploitation des résultats expérimentaux :

Pour le calcul du facteur de concentration de contraintes théoriques, nous avons utilisé la relation (II-17).

$$K_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{A \frac{2r}{D-d} + B \frac{2r(1+2r/d)^2}{d}}} \tag{III-12}$$

Où :

A=0.25 , B=1.80 pour le cas de flexion de cylindre.

D=10 mm , d=8 mm , r=0.5 mm ou r=0.1 mm.

Quand au calcul du facteur de concentration de contraintes en fatigue, nous avons utilisé la relation (II-18) :

$$K_f = \sigma_d / \sigma_{dn} \quad (\text{III-13})$$

Le calcul des facteurs de sensibilité à l'effet d'entaille a été fait en utilisant les deux définitions (II-19) et (II-20) :

$$q_1 = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (\text{III-14})$$

$$q_2 = \frac{K_f}{K_t} \quad (\text{III-15})$$

Les résultats ainsi que les calculs sont regroupés dans le tableau ci-dessous pour chaque traitement thermique :

**Tableau III-11: Resultats des essais.**

Traitement thermique	R <sub>m</sub> (MPa)	r (mm)	σ <sub>D</sub> (MPa)	R <sub>D</sub>	K <sub>t</sub>	K <sub>f</sub>	q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>
Recuit	620	∞	320	0.515	1	1	1	1
		0.5	228	0.367	2.56	1.404	0.258	0.548
		0.1	227	0.365	4.72	1.410	0.110	0.298
Trempe-revenue	1130	∞	497	0.44	1	1	1	1
		0.5	287	0.25	2.56	1.719	0.461	0.671
		0.1	265	0.235	4.72	1.876	0.235	0.397
Trempe	1850	∞	697	0.376	1	1	1	1
		0.5	393	0.21	2.56	1.775	0.496	0.693
		0.1	349	0.18	4.72	1.996	0.26	0.423

(Les valeurs soulignées ne sont pas des résultats expérimentaux).

En tenant compte des facteurs de sensibilité à l'effet d'entaille trouvé expérimentalement, pour les trois traitements thermiques, on a modifié les valeurs des exposants relatifs aux relations empiriques (II-21) et (II-23), proposées respectivement par NEUBER et HEYWOOD.

- Cas de l'acier recuit, on a trouvé :

$$q_{1,N} = \frac{1}{1 + (2.58/r)^{0.64}} \quad (\text{III-16})$$

$$q_{2,H} = \frac{1}{1 + \frac{0.22}{(0.26r)^{0.65}}} \quad (\text{III-17})$$

- Cas de l'acier trempé-revenu, on a trouvé :

$$q_{1,N} = \frac{1}{1 + (0.64/r)^{0.64}} \quad (\text{III-18})$$

$$q_{2,H} = \frac{1}{1 + \frac{0.117}{(0.26r)^{0.70}}} \quad (\text{III-19})$$

- Cas de l'acier trempé : nous n'avons pas assez de données pour modifier les relations des NEUBER et HEYWOOD.

En constatant que les exposants dans les relations de NEUBER modifiées (III-16) et (III-18) sont identiques, on a supposé l'exposant constant et égal à 0.64.

D'où on aura pour l'acier trempé :

$$q_{1,N} = \frac{1}{1 + (0.51/r)^{0.64}} \quad (\text{III-20})$$

Dans les relations de HEYWOOD modifiées (III-17) et (III-19), l'exposant a augmenté de 0.65 à 0.70. Ce qui nous a amené à supposer que l'exposant augmente avec la limite de rupture ; par contre, la constante du matériaux a diminué avec la limite de rupture.

Si on prend dans le cas de l'acier trempé un exposant égal à 0.70 on aura la relation suivante :

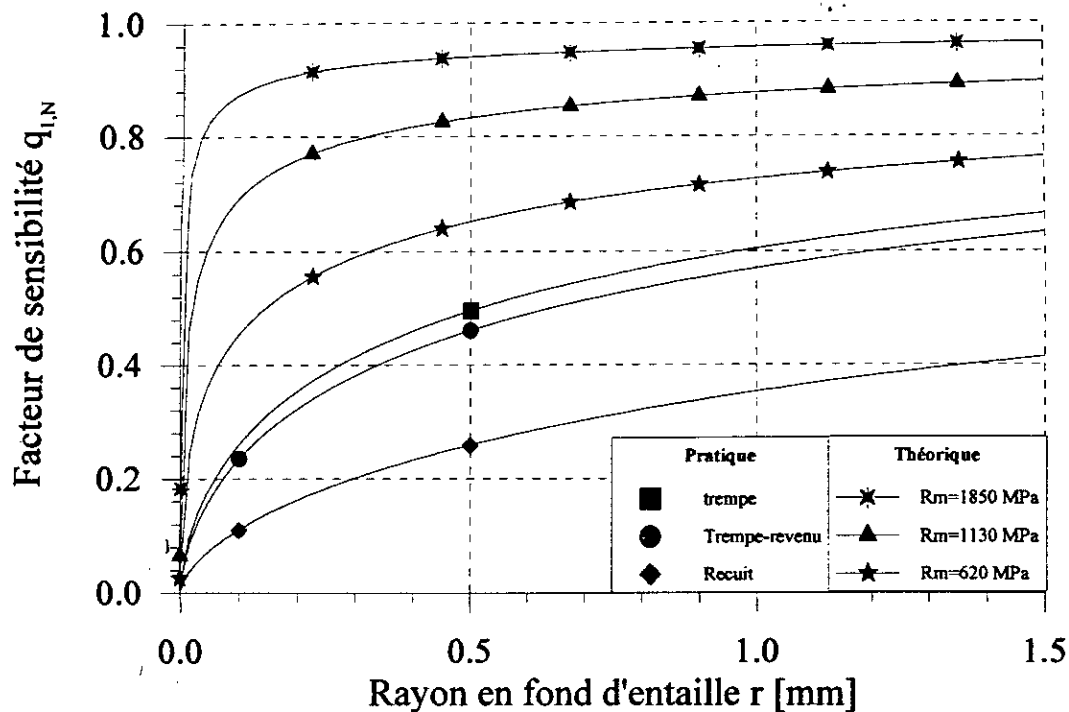
$$q_{2,H} = \frac{1}{1 + \frac{0.106}{(0.26r)^{0.70}}} \quad (\text{III-21})$$

En prenant un exposant plus grand, on aura une constante du matériaux plus petite. Ce qui confirme notre supposition.

Les facteurs de sensibilité modifiés sont représentés dans les figures (III-17) et (III-18).

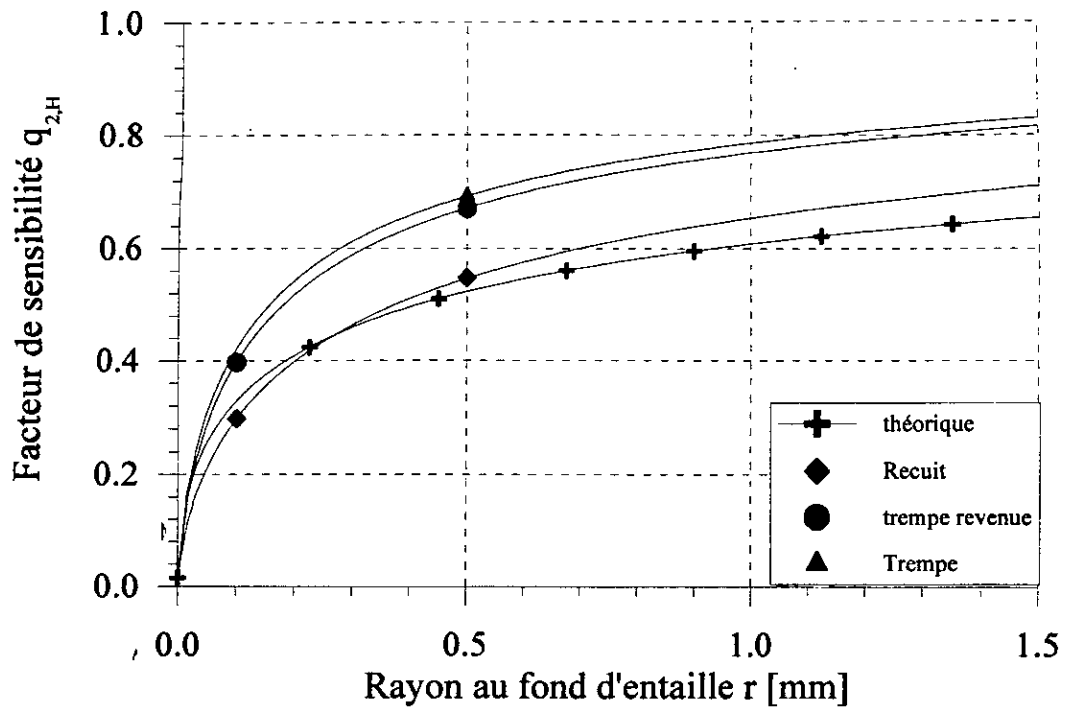
Ces figures montrent une augmentation du facteur de sensibilité à l'effet d'entaille avec le rayon en fond d'entaille. Pour un rayon en fond d'entaille fixé, le facteur de sensibilité augmente en passant de l'acier recuit à l'acier trempé-revenu, et de l'acier trempé-revenu à l'acier trempé.

Donc la sensibilité à l'effet d'entaille est proportionnelle à la limite de rupture et à la dureté.



**Fig.III-17 : Variation du facteur de facteur de NEUBER en fonction du rayon en fond d'entaille.**

Nous observons dans la figure (III-17) que la relation de NEUBER classique donne des valeurs plus grandes que la relation de NEUBER modifiée, avec un écart important entre les deux.



**Fig. III-18 : variation du facteur de HEYWOOD en fonction du rayon en fond d'entaille.**

Nous remarquons, que la relation de HEYWOOD classique et les relations de HEYWOOD modifiées donnent des valeurs proches dans le cas de très petits rayons. Pour les rayons plus grands la relation classique donne des valeurs inférieure à celles données par les relations modifiées expérimentalement.



### III-8 : Conclusion :

Comme il était attendu, la limite d'endurance pour éprouvettes entaillées a été plus faible que celles des éprouvettes lisses. En général elle est inversement proportionnelle avec le facteur de concentration de contrainte théorique  $K_t$ . Cette variation était plus prononcée pour le cas d'acier dur que celui de l'acier doux. « L'expérience a montré que, dans tous les cas, la limite d'endurance est réduite en présence d'une entaille mais son influence est d'autant plus grande que le métal a une faible capacité d'adaptation. » [ 4 ].

Le rapport d'endurance mesurée  $R_D$  est d'autant plus faible que la limite de rupture est grande, la limite d'endurance augmentant moins rapidement que la charge de rupture  $R_m$ . Les aciers doux ont une plus grande capacité d'adaptation que les aciers durs (les aciers doux s'endurcissent alors que les aciers durs s'adoucissent) .

On a calculé les facteurs de sensibilité expérimentaux qui étaient un peu différents des relations empiriques de NEUBER et de HEYWOOD qu'on a utilisées, ce qui nous a conduit à les modifier pour notre cas.

Les résultats du facteur de sensibilité de NEUBER, relatifs à la première définition du facteur de sensibilité et qui sont représentées sur la figure Fig.(III-17) sont plus distancées en fonction de la limite de rupture (plus de dispersion), alors que cette dispersion a diminué dans le cas du facteur de HEYWOOD relatif à la deuxième définition du facteur de sensibilité, ceci explique la préférence de l'utilisation de ce dernier. Un traitement de données bibliographiques a montré les mêmes chose [ 1 ].

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

L'étude du phénomène de la fatigue, sous entaille en flexion rotative, a été menée sur l'acier faiblement allié 30NC11. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes lisses et entaillées de forme en « V », de rayons en fond d'entailles 0.5 mm et 0.1 mm pour avoir des valeurs différentes du facteur de concentration de contrainte théorique  $K_t$ . Pour apprécier la variation du facteur de sensibilité à l'effet d'entaille avec la limite de rupture, nous avons utilisé les éprouvettes sous différents états en fonction du traitement thermique que nous leurs avons fait subir : état recuit (acier doux), état trempé-revenu (trempé à l'huile à 875 °C pendant 15 minutes et revenu à 600 °C pendant 1h15 minutes , ce qui donne un acier mi-durs) et finalement à l'état trempé seulement (trempé à l'huile à 875 pendant 15 minutes) . Ce qui a donné des valeurs de la limite de rupture dans l'ordre précédent : 620 Mpa, 1130 Mpa et 1850 Mpa.

Pour déterminer la limite d'endurance nous avons utilisé la méthode qui consiste à tracer la partie linéaire de la courbe de WOHLER , permettent d'avoir les limites d'endurances conventionnelles à un million de cycles avec un nombre d'éprouvettes réduit.

Nous avons remarqué que la limite d'endurance augmente avec la limite de rupture de l'acier mais moins rapidement que cette dernière, ce qui entraîne une diminution du rapport d'endurance  $R_D$  .

La présence d'une entaille diminue la limite d'endurance, en terme de contrainte globale Cette diminution est plus prononcée . Pour le cas des aciers durs que pour les aciers doux . pour le cas de l'acier à l'état recuit on a remarqué même que la limite d'endurance pour le rayon 0.1mm est égale à celle du rayon 0.5mm.

Pour déterminer le facteur de sensibilité à l'effet d'entaille, nous avons utilisé la définition de THUM et celle de YEN et DOLAN. Nous avons remarqué que les deux définitions donnent des valeurs proportionnelles aux valeurs du rayon en fond d'entaille. et de la limite de rupture. Les résultats que nous avons obtenus sont peu différents des valeurs données par les formules empiriques cette différence est plus grande pour la relation de NEUBER. Nous avons

## *CONCLUSION GENERALE*

---

HEYWOOD pour une meilleur corrélation avec nos résultats expérimentaux. Nous expliquons cette différence par le type de sollicitation utilisée . En effet, les essais menés sont en flexion rotative, alors que les relations de NEUBER et de HEYWOOD ont été déterminés à partir des essais de traction-compression.

Les résultats, en utilisant le modèle de HEYWOOD montrent une meilleure approche du facteur de sensibilité à l'entaille .

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Rapport d'étude du CETIM - Données technologiques sur la fatigue - A.Brand - 1989.
- [2] Normes Françaises de Produits Sidérurgiques - NF A 03-401 - 1986.
- [3] La Fatigue des Matériaux et des Structures - C.Bathias, J.P.Bailon - Presse de l'Université de Montréal - 1980.
- [4] La fatigue des Métaux - Cazaud - Edition Dunod - 1969.
- [5] « Double Notch Effect » - A.Thum et O.Svenson - VDI.Zeitschr, 92, Nr -1950.
- [6] « A critical Review of the Criteria for the Notch sensitivity in the Fatigue of Metals » - Yen & Dolan - University of Illinois bulletin, Volume 49 n°53. Series 398- 1952.
- [7] « Metal Fatigue » - Neuber, Ne.Frost, K.Marchet L.P.Pook - Edition Oxford University. London - 1974.
- [8] « An Engineering Method for Estimating Notch Size Effect in Fatigue Test of Steel » - Khun et Hardrath - T.N. 2805. Washington - 1982.
- [9] « Notch Sensitivity, Metal Fatigue » - R.E. Peterson - Edition Mc Grow Hill, N.Y - 1959.
- [10] Disigning by Photo Elasticity » - R.B. Heywood - Edition Chapman & Hill. London - 1952.