

Ecole Nationale Polytechnique

D.E.R. de Génie Mécanique et Métallurgie
Département de Mécanique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'études

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

Thème

*Quantification de l'endommagement par fatigue
en flexion rotative par la traction*

Proposé et dirigé par :

Mr Y.Belkacemi

Etudié par :

A.Serraye

Promotion : juin 99

E.N.P.10, Avenue Hassen-Badi, EL-HARRACH, ALGER.

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

Ecole Nationale Polytechnique

D.E.R. de Génie Mécanique et Métallurgie
Département de Mécanique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'études

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

Thème

*Quantification de l'endommagement par fatigue
en flexion rotative par la traction*

Proposé et dirigé par :

Mr Y.Belkacemi

Etudié par :

A.Serraye

Promotion : juin 99

E.N.P.10, Avenue Hassen-Badi, EL-HARRACH, ALGER.



الهدف من هذه الدراسة هو تقييم الخسارة في مقاومة الجذب لعينات مخدوشة متكونة من نوعين من الفولاذ و ذلك بمقارنة مقاومة عينات تعرضت لاعياء بواسطة اجهادات اللي الدوراني مع مقاومة عينات جربت بالجذب فقط . النتائج المتحصل عليها تثبت ان المعدن يفقد بعضا من مقاومته بسبب الاعياء .
الكلمات المفتاح : الاعياء . فقدان المقاومة

Résumé :

Dans cette étude on a essayé de quantifier l'endommagement par fatigue sur des éprouvettes en acier ayant subies des sollicitations de flexion rotative. Pour cela, on a comparé la résistance des éprouvettes endommagées avec celle des éprouvettes, essayées en traction seulement

Mots clés: Fatigue , Perte de résistance

Abstract :

In this survey one tried to quantify the endommagement by tiredness on some test-tubes in steel having undergone some sollicitations of rotary bending. For it, one compared the resistor of the test-tubes hurt with the one some test-tubes, tried in hauling only.

Keys words: Tiredness, Loss of resistor

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A toute ma famille, surtout à mes parents .

A tous mes amis .

Ali.



Remerciements

Je tiens à remercier :

- Mr Belkacemi d'avoir accepté de me diriger pour la réalisation de ce travail.
- Messieurs les membres de jury d'avoir accepté de me juger sur le travail que j'ai fait.
- Tous les enseignants du département et surtout ceux qui m'ont aidé cette année.
- Tous les travailleurs de l'atelier, surtout Abdessallem, Mustapha et Rachid.
- Tous les amis qui m'ont aidé dans la réalisation de ce document, surtout Said, Zakaria, Adel, Rabiaa, Rachek, Yacine, Issam, Halim et Ahmed .

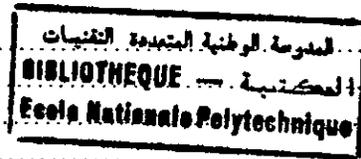
Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur la fatigue

Introduction.....	4
I.1 Fatigue et endurance.....	4
I.1.1 Définition.....	4
I.1.2 Endommagement par fatigue.....	4
I.1.3 Dommage cumulatif.....	5
I.1.4 Notions de limite d'endurance et de limite de fatigue.....	7
I.1.4.1 Limite d'endurance.....	7
I.1.4.2 Limite de fatigue.....	7
I.2 L'essai de fatigue.....	8
I.2.1 Définitions et symbolisation des termes utilisés en fatigue.....	8
I.2.1.1 Cycle de contrainte.....	8
I.2.1.2 Rapport d'endurance.....	9
I.2.2 Classification des essais de fatigue.....	9
I.2.2.1 Essais sous amplitude constante.....	9
I.2.2.2 Essais sous amplitudes variables.....	11
I.2.3 Les éprouvettes d'essais.....	11
I.2.3.1 Formes des éprouvettes.....	11
I.2.3.2 Dimensions des éprouvettes.....	12
I.2.4 Présentation pratique des résultats.....	13
I.2.4.1 Courbe de WOHLER.....	13
I.2.4.2 Courbes d'équiprobabilités.....	15
I.2.4.3 Diagrammes d'endurances.....	16
I.2.5 Estimation des caractéristiques de résistance et d'endurance en fatigue.....	17
I.2.5.1 Méthodes d'estimation de l'endurance à N cycles.....	17
I.2.5.1.1 Méthode des probits.....	17
I.2.5.1.2 Méthode de l'escalier.....	19
I.2.5.1.3 Méthode d'itération.....	20
I.2.5.1.4 Méthode des K éprouvettes non rompues.....	20
I.2.5.2 Choix de méthode d'essai.....	20
Conclusion.....	21

Chapitre II : Facteurs d'influence sur la tenue en fatigue

Introduction.....	22
II.1 Influence de l'environnement.....	22
II.1.1 Influence de la température.....	22
II.1.1.1 Fatigue à basse température.....	23
II.1.1.2 Fatigue à haute température.....	23
II.1.2 Influence de la corrosion.....	25
II.2 Influence des facteurs métallurgiques.....	24
II.3 Influence des caractéristiques mécaniques sur la tenue en fatigue.....	25
II.4 Influence des conditions de sollicitation.....	26
II.4.1 Influence de la fréquence d'essai.....	26
II.4.2 Influence du type de sollicitation.....	27



II.4.3 Effets de surcharge et sous charge.....	27
II.4.4 Effets des contraintes résiduelles.....	28
II.5 Influence des conditions géométriques.....	28
II.5.1 Effet d'échelle.....	28
II.5.1.1 Coefficient d'effet d'échelle.....	28
II.5.1.2 Diagramme permettant d'estimer K_e	29
II.5.2 Influence de l'état de surface.....	29
II.5.2.1 Facteur d'état de surface.....	30
II.5.2.2 Abaque permettant d'estimer K_s	30
II.5.3 Effet d'entaille.....	31
II.5.3.1 Concentration de contraintes.....	32
II.5.3.2 Facteur de concentration de contrainte théorique.....	33
II.5.3.3 Facteur de concentration des contraintes en fatigue.....	35
II.5.3.4 Facteur de sensibilité à l'effet d'entaille.....	35
Conclusion.....	39

Chapitre III : Etude de l'endommagement par fatigue

Introduction.....	40
III.1 Dommages en fatigue à amplitude constante.....	41
III.1.1 Définition du dommage.....	41
III.1.2 Evolution du dommage.....	42
III.1.3 Dommages cumulatifs.....	43
III.2 Etude expérimentale.....	44
III.2.1 Dispositifs expérimentaux.....	44
III.2.1.1 Machine de flexion rotative.....	44
III.2.1.1.1 Chargement de l'éprouvette.....	45
III.2.1.2 Machine de traction simple.....	46
III.2.1.2.1 Chargement de l'éprouvette.....	47
III.2.2 Les éprouvettes d'essai.....	47
III.2.2.1 Usinage des éprouvettes.....	48
III.2.3 Méthode d'essai.....	50
Conclusion.....	
Conclusion générale.....	55

Bibliographie

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction générale

Introduction générale

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Les observations faites sur les pièces mécaniques en service ont montré que celles-ci se rompent sous l'effet des chargements de service qui paraissent modestes devant leurs capacités de supporter des charges statiques. Ces observations ont aussi montré l'insuffisance des essais statiques, comme les essais de traction-compression et essais de dureté, pour le dimensionnement des pièces. Ce phénomène est connu sous le nom de fatigue ou endommagement par fatigue.

La fatigue est, dans la majorité des cas, la cause de la rupture ou de la défaillance des pièces soumises à des efforts variables qui ont un effet plus dangereux que les efforts statiques, et entraînent la perte graduelle des caractéristiques du métal et par conséquent, sa rupture brutale.

L'endommagement par fatigue est influencé par différents facteurs tel que la géométrie des pièces (présence des entailles, état de surface, ...etc.) ou la nature des sollicitations (type de sollicitation, amplitude de la contrainte appliquée, ...etc.).

Ce travail constitue un pas dans l'étude du phénomène de fatigue, il comporte trois chapitres. Dans le premier chapitre, on va essayer de donner des notions sur la fatigue et sur les mécanismes d'apparition et de développement des fissures, ensuite, on parlera de l'essai fatigue et de son objectif. On exposera les différentes méthodes d'analyse des résultats des essais et des diagrammes représentatifs.

Dans le deuxième chapitre, on va étudier les différents facteurs qui influent sur la limite d'endurance des pièces métalliques, ces facteurs sont très variés et leurs rôle est plus ou moins appréciables. On parlera aussi de l'effet d'entaille et les différents facteurs liés à cet effet.

Dans le dernier chapitre on examinera les essais réalisés et le matériel utilisé. On expliquera aussi le traitement des résultats par les méthodes statistiques et on essayera de les interpréter.

Chapitre I

Généralités sur la fatigue

Chapitre I

Généralités sur la fatigue

Introduction :

L'expérience a montré depuis longtemps que les ruptures des pièces en fonctionnement normal sont le plus souvent dues à la fatigue. Celle-ci est particulièrement insidieuse du fait de son caractère progressif masqué [1].

Ceci est d'autant plus grave que la fissuration par fatigue conduit très souvent à la rupture brutale avec des charges nettement inférieures à la résistance à la rupture du matériau. Donc, la gravité de ces charges réside dans le fait qu'elles sont variables.

I.1- Fatigue et endurance :

I.1.1- Définition :

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

I.1.2- Endommagement par fatigue :

Dès les premiers cycles appliqués à la pièce, on observe la formation des bandes de glissement. Avec l'augmentation de nombre de cycles, il y aura multiplication de ces bandes et surtout leur renforcement et l'apparition des bandes persistantes. Ces bandes sont caractéristiques de la fatigue. Leur rôle est déterminant dans l'endommagement des matériaux. Ces dernières sont le siège de l'apparition de microfissures le long des lignes de glissement [1].

En pratique, toutes les pièces soumises à la fatigue contiennent des défauts, irrégularités de surface ou inclusions qui provoquent des concentrations locales de contraintes conduisant à la formation de micro-fissures.

Les micro-fissures, dans un premier stade, se propagent en restant dans le plan de glissement initial où elles sont apparues (plan de scission maximale).

Dans un deuxième stade, on observe un changement de direction lors du franchissement des joints de grains. Les fissures quittent le plan de scission maximale pour suivre le plan de contrainte normale maximale.

Le développement des fissures diminue la section soumise aux sollicitations, ce qui provoque en troisième période, la rupture brutale du métal[1].

I-1-3-Dommage cumulatif :

La notion du dommage présente deux aspects, l'un physique (le plus intuitif), l'autre descriptif, très important du point de vue de l'emploi des matériaux dans la construction.

L'aspect physique du dommage correspond aux variations des propriétés physiques des matériaux pendant la fatigue, variations qui reflètent les modifications que subit la matière sous l'action des sollicitations.

L'aspect descriptif de la notion du dommage consiste dans la représentation quantitative de l'endurance des matériaux soumis aux efforts plus ou moins variés.

Miner [1], reprenant les études de Palmegren, a proposé une loi simple du dommage qui repose sur l'hypothèse de linéarité, l'application de n_i cycles au niveau

contrainte σ_i , auxquelles le nombre moyen de cycles à la rupture est N_i , entraîne un accroissement du dommage égal à n_i/N_i et la rupture intervient quand $\sum n_i/N_i = 1$.

Donc, et d'après cette hypothèse, si une certaine fraction $n_1/N_1 = Z$ est accomplie à un niveau σ_1 , l'endurance restant à un autre niveau σ_2 est :

$$n_2/N_2 = (1-Z). \quad (1.1)$$

D'après cette conception du dommage, il n'est fait aucune distinction suivant que σ_2 est supérieur ou inférieur à σ_1 [1].

Des vérificateurs expérimentaux ultérieurs ont montré que cette loi risquait de conduire à des prévisions dangereuses dans le cas des pointes de contrainte, soit à une prudence exagérée s'il y avait un effet de sous charge.

Henry [3], exprime le dommage, pour un niveau σ de la contrainte par la relation.

$$D = \frac{n}{N} \left[1 + \alpha \left(1 - \frac{n}{N} \right) \right] \quad (1.2)$$

Où

D : dommage au niveau σ

n : nombre de cycles

N : nombre de cycles à rupture au niveau σ

α : coefficient d'endommagement est plus important pour des efforts élevés :

$$\alpha = \sigma_D (\sigma - \sigma_D) \quad (1.3)$$

σ_D étant la limite de fatigue.

I.1.4- Notions de limite de fatigue et de limite d'endurance :

On peut dire, pour simplifier que l'endurance d'une pièce ou d'un élément de structure est la résultante de plusieurs phénomènes compétitifs.

D'une part, l'endommagement progressif du métal par suite de l'existence de concentrations locales de contraintes qui entraînent des déformations plastiques, et de l'irréversibilité des glissements au cours des cycles successifs. Ces phénomènes entraînent, comme nous l'avons déjà dit, la fissuration du métal [1].

D'autre part, l'adaptation, c'est à dire, la modification du régime des contraintes internes par relaxation consécutive à la déformation plastique localisée, puis la modification des propriétés du métal qui le rend plus apte à supporter des effets cycliques par consolidation liée à l'écroutissage et par le durcissement du métal écroui. Il en résulte que tous les facteurs qui agissent sur ces différents phénomènes joueront un rôle vis-à-vis l'endurance des pièces mécaniques [1].

I.1.4.1- Limite d'endurance :

C'est pour une contrainte moyenne donnée, l'amplitude de la contrainte pour laquelle on constate 50 % de rupture après un nombre fini N de cycles. Cette valeur peut être déterminée à l'aide des méthodes statistiques et est notée $\sigma_{D(N)}$ [2].

I.1.4.2- Limite de fatigue :

C'est pour une contrainte moyenne donnée, la plus grande amplitude de contraintes pour laquelle il y aura pas de rupture quelque soit le nombre de cycles N [2].

I.2- L'essai de fatigue :

Les recherches poursuivies sur les métaux ont montré l'insuffisance des essais ordinaires par traction, dureté, et par choc... etc. Il est donc indispensable de faire des essais de fatigue pour la prévision de la défaillance du métal au cours de son utilisation.

1.2.1- Définitions et symbolisation des termes utilisés en fatigue :

1.2.1.1- Cycle de contrainte :

C'est la plus petite partie de la fonction contrainte-temps qui se répète périodiquement. Elle est considérée comme la superposition d'une contrainte statique constante et une contrainte variable fonction du temps le plus souvent sinusoïdale.

a/ Contrainte maximale (σ_{\max}) :

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

b/ Contrainte minimale (σ_{\min}) :

Plus petite valeur algébrique prise périodiquement par la contrainte.

c/ Contrainte moyenne (σ_m) :

Moyenne algébrique des deux contraintes précédentes. $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$

d/ Amplitude de contrainte (σ_a) :

Contrainte alternée égale à la moitié de la différence algébrique entre σ_{\max} et

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

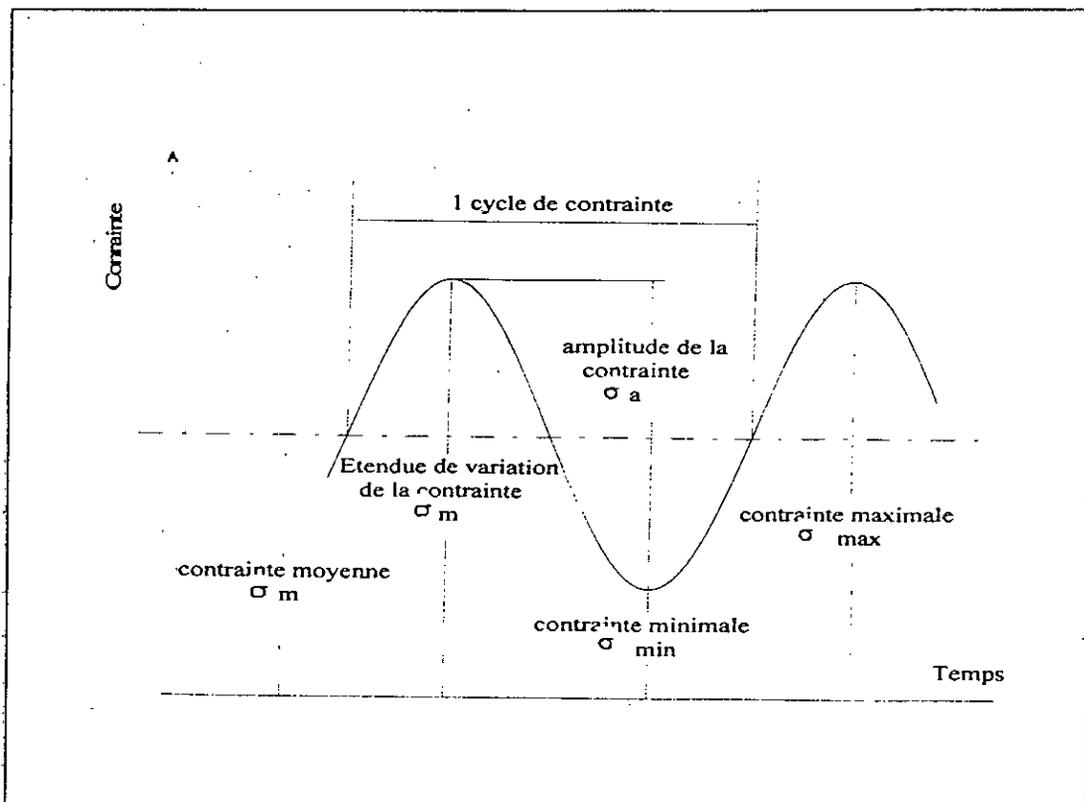


Fig.I.1- Cycle de contrainte

I.2.1.2- Rapport d'endurance :

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

I.2.2- Classification des essais de fatigue :

Comme nous l'avons dit, les essais de fatigue se font par l'application des charges variables. On peut distinguer deux grandes catégories d'essais de fatigue[2].

I.2.2.1- Essais sous amplitude constante :

Dans cette catégorie, les sollicitations de service se placent-elles à un seul niveau d'amplitude.

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

1/ Sollicitation aux efforts statiques et variables de même nature et de même direction, dans ce cas, et quelque soit la nature des efforts agissants, on peut considérer trois sortes de sollicitations en fonction du temps.

- Efforts alternés pour $\sigma_m < \sigma_a$ (l'effort est symétrique si $\sigma_m = 0$ et est dissymétrique pour $0 < \sigma_m < \sigma_a$).
- Efforts répétés pour $\sigma_m = \sigma_a$
- Efforts ondulés pour $\sigma_m > \sigma_a$.

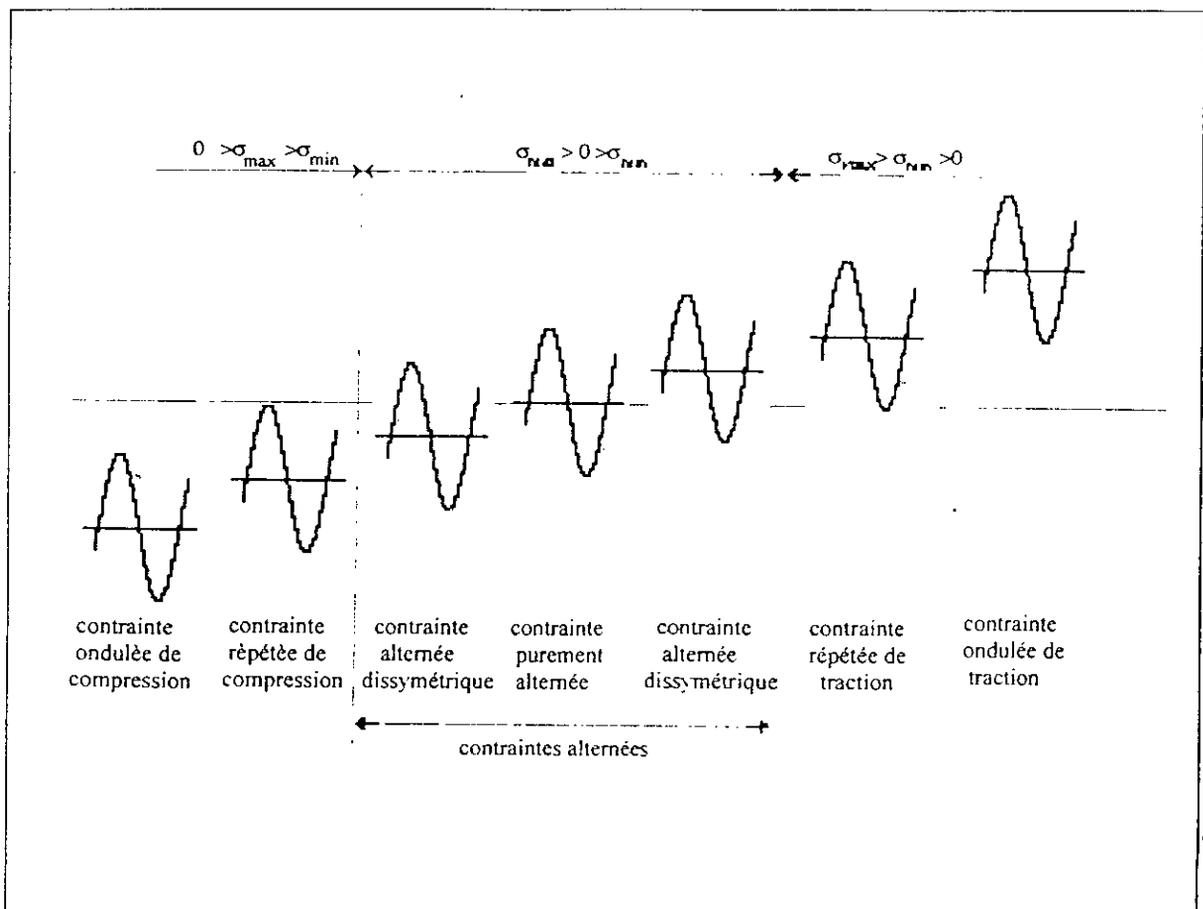


Fig.I.2- Types de cycles de contraintes.

2/ Sollicitations aux efforts statiques et variables de nature différentes.

3/ Sollicitations aux efforts variables de natures différentes.

1.2.2.2- Essais sous amplitudes variables :

Actuellement, on utilise de plus en plus en pratique les résultats d'essais effectués sous amplitudes variables de manière à se rapprocher des conditions réelles de service.

Des expérimentateurs ont imaginé des essais avec modulation d'amplitude, sinusoïdal ou à programme.

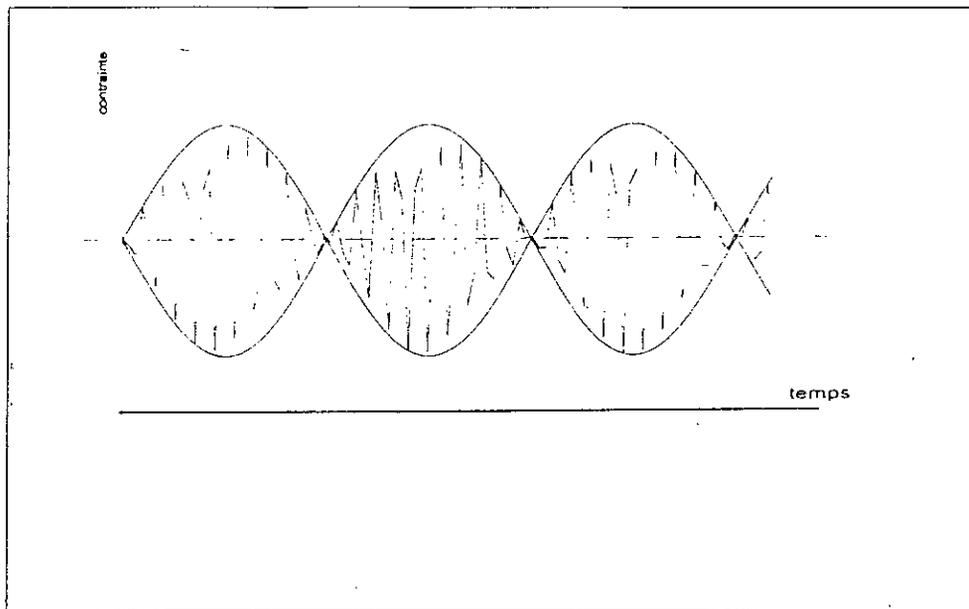


Fig.1.3- Chargement avec modulation de l'amplitude.

1.2.3- Les éprouvettes d'essais :

1.2.3.1- Formes 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 laquelle le métal est disponible.

L'éprouvette peut être à :

a/ Section circulaire avec des congés raccordant tangentiellement entre la partie utile aux extrémités (Fig. I.4.a) [2].

b/ Section rectangulaire d'épaisseur uniforme sur toute la partie soumise à l'essai raccordant tangentiellement la partie soumise à l'essai aux têtes, le raccordement peut aussi être fait avec un arc de cercle (Fig. I.4.b).

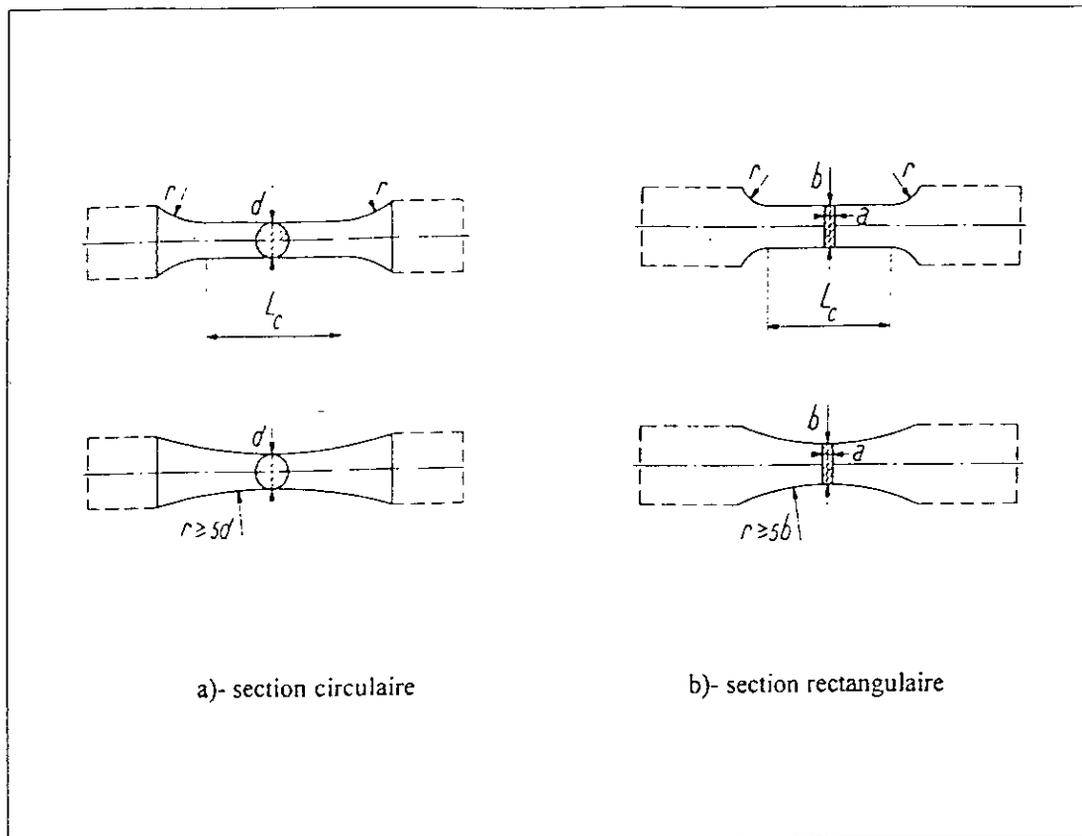


Fig.I.4- Forme des éprouvettes.

Les extrémités de l'éprouvette doivent être d'une forme convenant au type de machine d'essai.

I.2.3.2- Dimensions des éprouvettes :

En règle générale, les dimensions des éprouvettes devront être telles que l'amplitude de la contrainte d'essai ne soit jamais inférieure à 25 % de la gamme de la charge de la machine d'essai[4].

De plus, les dimensions de l'éprouvette devront être choisies de façon que la fréquence de l'éprouvette montée sur la machine soit au moins le double de la fréquence d'essai.

Pour les éprouvettes de section circulaire, sauf pour les produits de faible section, il est conseillé de prendre la valeur maximale du diamètre d , à l'endroit où la contrainte est maximale, supérieur à 5 mm afin de réduire les causes de dispersion. La tolérance sur l'excentricité doit être inférieure à $\pm 0,025$ mm [4].

La tolérance de forme sur la partie cylindrique soumise à l'essai ne doit pas être supérieure à $\pm 0,02$ mm[4].

I.2.4- Présentation pratique des résultats :

Il existe un certain nombre de représentations possibles des résultats obtenus au cours d'essais, suivant l'arrangement que l'on adopte pour les paramètres intervenant[5].

Ces représentations sont faites, sous la forme de courbes d'équiprobabilité et de diagrammes d'endurance[5].

I.2.4.1- Courbe de WOHLER : (Courbe σ -N) :

Cette courbe représente la variation d'une des contraintes précitées en fonction du nombre de cycles à rupture (reporté sur échelle logarithmique). Son tracé résulte d'essais de fatigue conduits pour une même valeur de la contrainte moyenne σ_m , sur un nombre d'éprouvettes identiques aussi élevé que possible suivant une méthodologie appropriée[2].

Pour un acier, on obtient une courbe qui a la forme donnée par la figure (I.5).

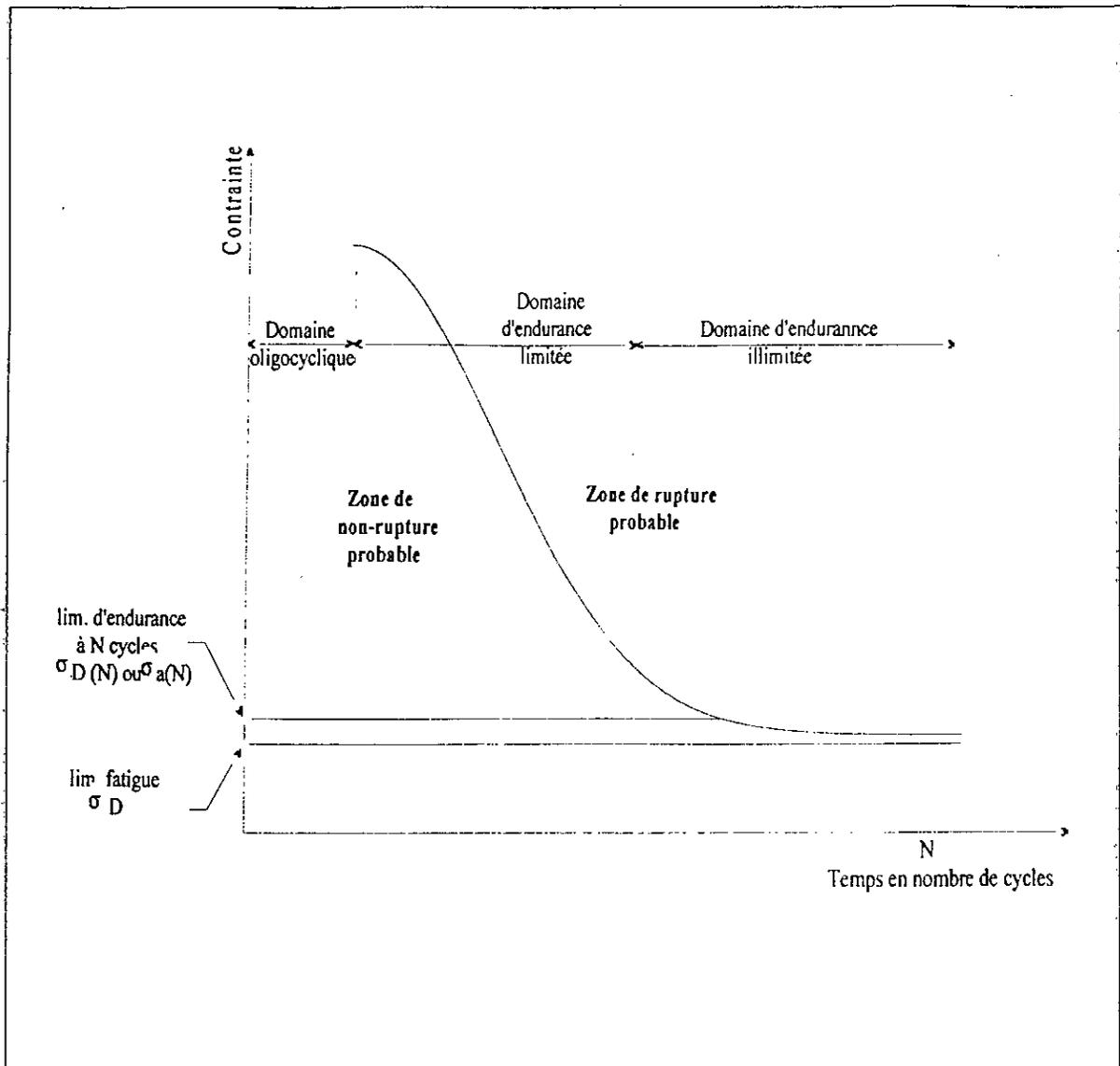


Fig.I.5- Courbe de Wöhler.

Cette courbe partage le plan de coordonnées en trois domaines.

- 1/ Domaine de la fatigue oligocyclique où les ruptures surviennent après un petit nombre de cycle ($N_R \leq 10^4$ cycles) [2].
- 2/ Domaine d'endurance limitée ($N_R > 10^4$ cycles) où les ruptures surviennent systématiquement après un nombre de cycles croissant avec la décroissance de la contrainte.
- 3/ Domaine d'endurance illimitée où les ruptures ne se produisent pas avant un nombre de cycles supérieur à la durée de vie envisagée.

Diverses expressions analytiques ont été proposées pour représenté la courbe de Wöhler, dans le domaine d'endurance limitée, ces équations permettent de déterminer le nombre de cycles à rupture en fonction de la contrainte [6], parmi

celle-ci, on cite :

$$\text{- La formule de Weibull : } N_R = K(\sigma - \sigma_D)^n \quad (1.4)$$

$$\text{- la formule de stromeyer : } \sigma a = \sigma_D + (A/N)^C \quad (1.5)$$

$$\text{- la formule de Polmingreen : } \sigma a = \sigma_D + (A/(N+B))^C \quad (1.6)$$

$$\text{- la formule de Corson : } N = A \cdot \exp(-C(\sigma_a - \sigma_D)) / (\sigma_a - \sigma_D) \quad (1.7)$$

$$\text{- la formule de Bastenaire } N + B = A \exp. (-C(\sigma_a - \sigma_D)) / (\sigma_a - \sigma_D) \quad (1.8)$$

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

1.2.4.2-Courbes d'équiprobabilités :

La courbe 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 chance de se rompre que de ne pas se rompre[2].

Les courbes d'équiprobabilité de rupture, dont la courbe de Wohler 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'essai et du niveau de confiance accordée(Fig.1.6).

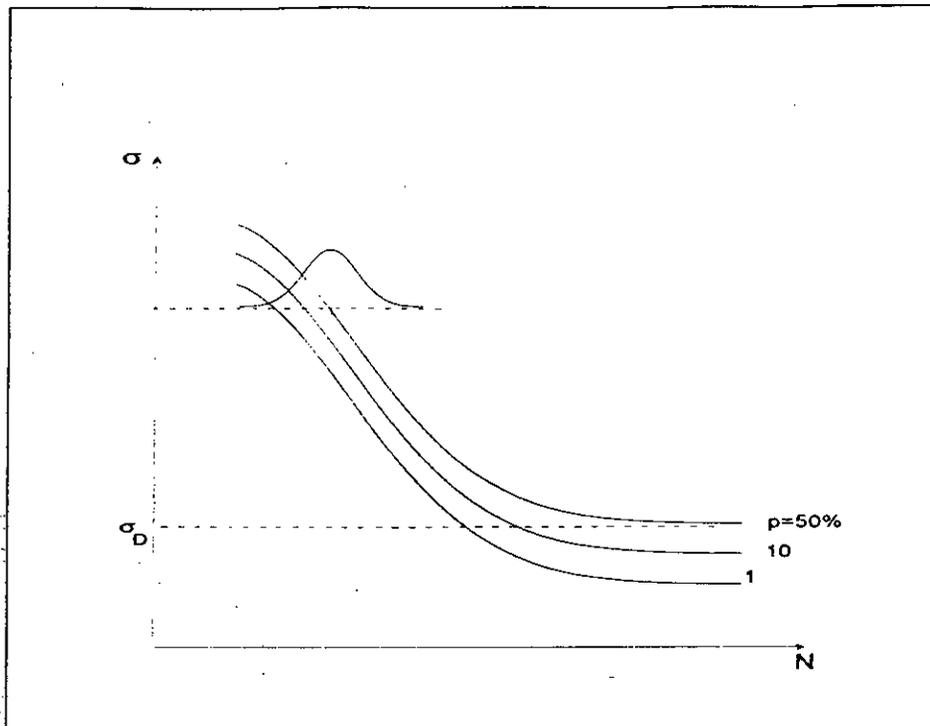


Fig.I.6- Courbes d'équiprobabilité.

1.2.4.3-Diagramme d'endurance :

Pour des durées de vie données, on peut considérer les diagrammes suivants :

- Diagramme de Goodman Smith donnant les contraintes minimales et maximales en fonction de la contrainte moyenne.
- Diagramme de Ros donnant la contrainte maximale σ_{\max} en fonction de la contrainte minimale σ_{\min} .
- Diagramme de Moor-Jasper donnant la contrainte maximale (σ_{\max}) en fonction de la contrainte minimale (σ_{\min})
- Diagramme de Haigh donnant l'amplitude de contrainte (σ_a) en fonction de la contrainte moyenne (σ_m).

1.2.5-Estimation des caractéristiques de résistance et d'endurance en fatigue :

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

L'action simultanée de ces deux causes se traduit par une dispersion des résultats d'essais dont l'ordre de grandeur est le plus souvent important et parfois considérable.

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

La dispersion des résultats est due essentiellement à trois causes principales :

- 1- Causes internes au matériau : ce sont l'hétérogénéité, les inclusions...etc.
- 2- Causes dues ou liées à la préparation des éprouvettes.: les opérations d'usinage des éprouvettes ont une influence sur l'endurance des pièces ainsi que les traitements thermiques sont aussi des causes de dispersion parce qu'il est impossible de reproduire le même traitement d'une façon rigoureuse.
- 3- Causes extérieures à l'éprouvette :Elles comprennent les incertitudes de montage et le réglage de la charge appliquée et de la fréquence des cycles.

1.2.5.1- Méthodes d'estimation de l'endurance à N cycles :

1.2.5.1.1- Méthode des probits :

Dans cette méthode, on choisit des niveaux de contraintes espacés régulièrement de manière à encadrer la limite d'endurance présumée. L'espacement est choisi pour qu'il donne des ruptures et des non-rupture. A chaque niveau, on utilise plusieurs éprouvettes et on détermine la proportion des éprouvettes rompues avant le

nombre de cycle fixé. Les valeurs de la fréquence de rupture et du niveau de contrainte sont reportées sur 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 correspondent à 50 % de rupture.

La méthode des probits est à la fois longue et coûteuse et d'un emploi délicat, on en réservera l'emploi à des études fondamentales dans lesquelles des déterminations assez précise de la résistance à la fatigue sont exigées.

Dans les autres cas on a intérêt à utiliser d'autres méthodes plus simples.

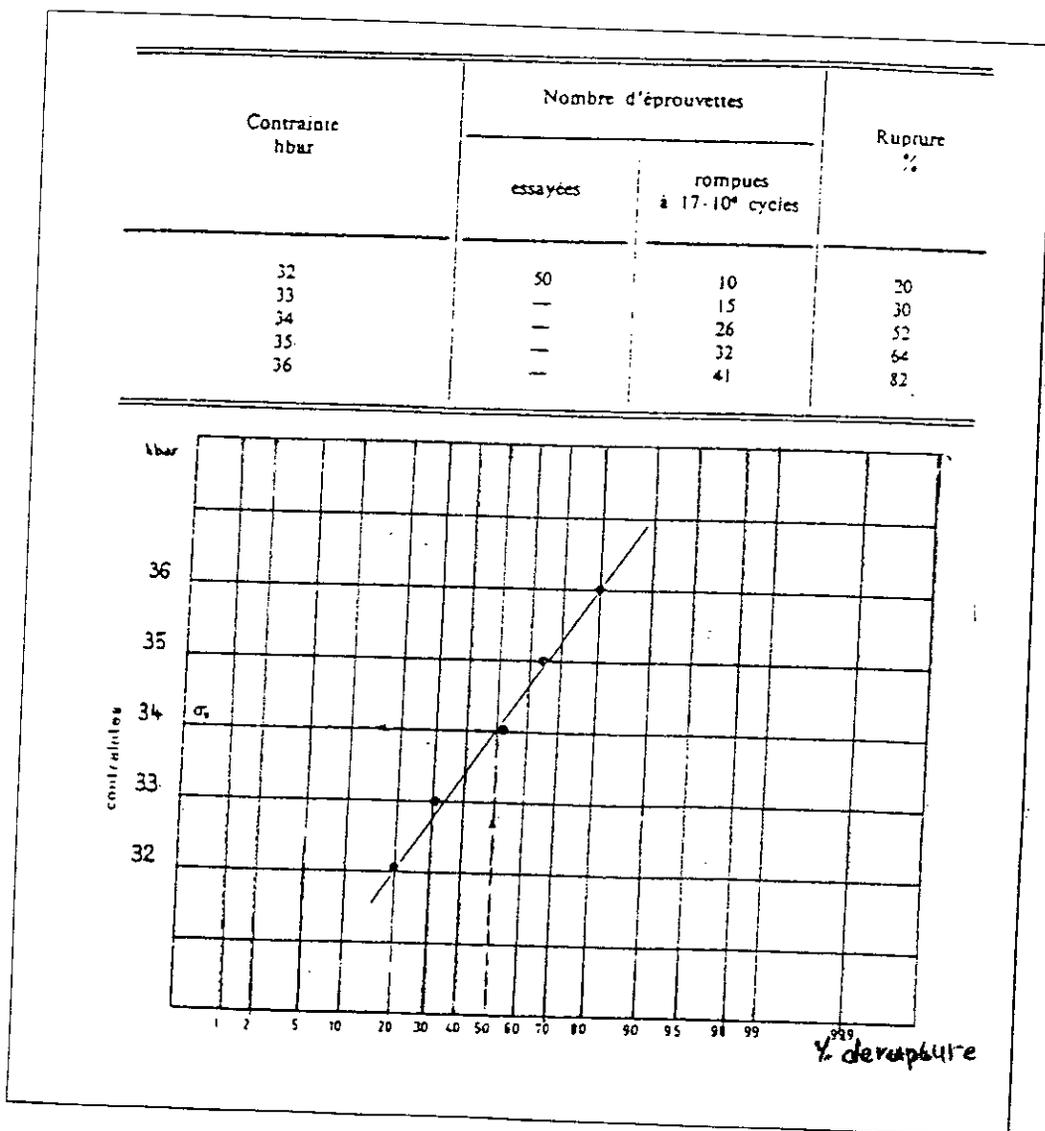


Fig.I.7- Estimation de la limite d'endurance par la méthode des probits

I.2.5.1.2-Méthode de l'escalier :

Comme pour la méthode des probits, on fixe un nombre de cycle N et on définit un échelonnement d'amplitude de contrainte. Si le premier essai était effectué au niveau de contrainte jugé le plus proche de la limite d'endurance se traduit par une non-rupture, on choisit pour le nouvel essai 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 déterminée par la moyenne statistique de résultats obtenus.

Cette moyenne est estimée par la relation :

$$de = S_0 + d \left(\frac{A}{N} \pm \frac{I}{2} \right) \quad (\text{I.9})$$

où :

d : pas d'échelonnement.

$$N = \sum n_i \quad (\text{I.10})$$

$$A = \sum i.n_i \quad (\text{I.11})$$

$$B = \sum i^2.n_i \quad (\text{I.12})$$

N_i : Nombre de réponses les moins fréquentes pour chaque niveau.

I : Rang du niveau de contrainte.

S_0 : Plus petite contrainte utilisée.

L'écart type est donné par :

$$S = 1.62d \left(\frac{(N.B - A^2)}{N^2} + 0.028 \right) \quad (\text{I.13})$$

Selon Dixon et Mood, cette formule ne peut être utilisée qu'à condition que :

$$\frac{N.B - A^2}{N^2} > 0.3 \quad (1.14)$$

I.2.5.1.3- Méthode d'itération :

Comme la méthode de l'escalier, la méthode d'itération définit pour chaque essai (sauf le premier) la contrainte à appliquer en fonction des résultats obtenus à l'essai précédent, mais le pas dans cette méthode est variable.

Le choix de la contrainte à appliquer lors du premier essai est important, elle doit être le plus proche possible de la limite d'endurance.

I.2.5.1.4- Méthode des K éprouvettes non rompues :

Cette méthode consiste à rechercher par palier de contraintes successifs et décroissant en progression, un niveau auquel K essais donnent des non-ruptures.

Le niveau de départ ayant été choisi sensiblement au-dessus de la limite d'endurance.

I.2.5.2- Choix de méthode d'essai :

Pour la commodité, nous distinguerons trois degrés différents de précision.

- 1- L'estimation approchée.
- 2- L'estimation de précision moyenne.
- 3- l'estimation précise

Les méthodes d'estimation approchée sont applicables à un nombre d'éprouvettes ne dépassant pas 10 à 15.

Cette catégorie comprend les méthodes suivantes :

- Méthode de l'escalier.
- Méthode d'itération.

Les méthodes d'estimation de précision moyenne nécessitent un nombre d'éprouvettes entre 15 et 40, toutes les méthodes, sauf la méthode des probits, peuvent être réalisées avec cette précision.

Les méthodes d'estimation précise sont réalisées avec un nombre d'éprouvettes supérieur à 40.

Toutes les méthodes sont utilisables avec cette précision, on note aussi que la méthode des probits n'est utilisée qu'avec un nombre d'éprouvettes supérieur à 60.

Conclusion :

La fatigue est un phénomène auquel aucun métal ne peut s'échapper. Elle peut provoquer la ruine des pièces au cours de fonctionnement. L'endommagement par fatigue est due essentiellement à l'effet des charges variables.

L'étude de la fatigue nécessite l'utilisation des méthodes expérimentales. Il est donc nécessaire de faire des essais sur des éprouvettes et sur les pièces. Ces essais ont pour but l'étude du comportement du métal soumis à des sollicitations de fatigue et la détermination de sa limite d'endurance.

Il existe une multitude de méthodes permettant l'estimation de la limite d'endurance des matériaux. Le traitement des résultats des essais se fait par les méthodes statistiques afin de remédier à la dispersion des résultats.

Chapitre II

Facteurs d'influence sur la tenue en fatigue

Chapitre II

Facteurs d'influence sur la tenue en fatigue

Introduction :

On peut, soit par l'analyse des résultats bibliographique soit (c'est préférable) à partir d'essais dynamiques réels, connaître la limite d'endurance d'un matériau dans des conditions bien précises (forme de l'éprouvette, conditions d'essais...etc). Mais au stade de la fabrication ou en cours d'utilisation, d'autres facteurs vont intervenir qui, finalement auront une influence primordiale, bénéfique ou néfaste, sur la tenue en service du produit fini [5].

Il est nécessaire donc, de connaître dans quelles mesures les résultats obtenus sur éprouvettes sont applicables aux pièces de grandes dimensions.

La résistance à la fatigue d'une pièce quelconque est conditionnée par de nombreux facteurs qui peuvent être d'origine mécanique, métallurgique, géométrique ou liées aux conditions de travail de la pièce [2].

Dans ce chapitre, on exposera en détails, l'influence des différents facteurs sur la tenue en fatigue.

II.1- Influence de l'environnement:

II.1.1- Influence de la température:

De nombreux résultats d'essais montrent que le rapport d'endurance (σ_D/R_m) reste généralement constant lorsque la température varie. La limite d'endurance varie donc dans le même sens que les caractéristiques mécaniques des aciers lorsque

ceux-ci sont soumis à des sollicitations de fatigue, à une température autre que la température ambiante [5].

Il est toutefois nécessaire de prendre un certain nombre de précautions si la pièce risque de travailler dans des conditions limites, à savoir à basse et à haute température [5].

II.1.1.1- Fatigue à basse température:

La résistance à la rupture R_m augmente lorsque la température diminue, il en sera de même de la limite d'endurance. Mais dans le cas des éprouvettes entaillées, il faut tenir compte de la diminution, voir de la disparition du phénomène d'adaptation à fond d'entaille. C'est ainsi que la valeur de coefficient de contrainte effectif K_f à basse température a tendance à se rapprocher de la valeur du coefficient théorique K_t [5].

II.1.1.2- Fatigue à haute température:

La limite d'endurance diminue lorsque la température s'élève, par contre la sensibilité à l'effet d'entaille diminue avec l'élévation de la température.

Ceux-ci élèvent les caractéristiques mécaniques et surtout la limite d'endurance[1].

A très haute température, il peut y avoir fluage, ce qui entraîne une baisse rapide de la limite apparente d'endurance [1].

II.1.2- Influence de la corrosion :

Haigh a fait des essais comparatifs de résistance à la fatigue sur éprouvettes préalablement attaquées ou non par la corrosion ou corrodées au cours même de l'essai de fatigue. Il résulte de ces expériences que la diminution de résistance à la

fatigue par corrosion avant l'essai est en général faible, tandis que l'influence de la corrosion exercée durant l'essai de fatigue est considérable [3].

II.2- Influence des facteurs métallurgiques:

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

La structure finale, et par suite, les caractéristiques d'une pièce lui sont apportées progressivement au cours de sa fabrication.

On peut ranger dans cette catégorie tous les facteurs liés à la nature du métal (Composition chimique, structure cristallographique), à son élaboration et sa mise en forme (inclusions, défauts, fibrage), ainsi les traitements thermiques subis par la pièce [1].

Comme la limite de fatigue est directement en corrélation avec la charge de rupture, tous facteurs qui modifie cette dernière entraîne une modification de la limite de fatigue [2].

Les observations faites sur des pièces rompues par fatigue montrent que les inclusions, lorsqu'elles sont assez grosses, sont toujours l'origine des fissures, de plus, celles-ci cheminent au sein du métal d'une inclusion à l'autre, mettant en évidence leur rôle dans la propagation des fissures [1].

Plus généralement, la résistance à la fatigue dépend de la quantité, de la taille, de la nature et de la répartition des inclusions, ainsi que de leur forme par rapport à la direction de l'effort appliquée [1].

II.3- Influence des caractéristiques mécaniques 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 R_e , à l'allongement A et la striction Z .

Plusieurs formules empiriques ont été proposées, les plus connues sont :

$$\text{- Roger: } \sigma_D = 0.4 R_e + 0.25 R_m \quad (\text{II.1})$$

$$\text{- Haudrement et Mailender : } \sigma_D = 0.25 (R_e + R_m) + 50 \quad (\text{II.2})$$

$$\text{- Jünger: } \sigma_D = 0.2 (R_e + R_m + Z) \quad (\text{II.3})$$

$$\text{- Lequis, Bucholtz et Shultz: } \sigma_D = 0.175 (R_m + R_e + A\% + 100) \quad (\text{II.4})$$

$$\text{- Heywood : } \sigma_D = R_m/2 \quad (\text{II.5})$$

$$\sigma_D = 150 + 0.43 R_e \quad (\text{II.6})$$

$$\text{- Brand: } \sigma_D = 0.32 R_m + 121 \quad (\text{II.7})$$

Bathias a proposé les relations suivantes :

$$\sigma_D = 0.37 R_m + 77 \quad (\text{II.8})$$

$$\sigma_D = 0.38 R_e + 16 \quad (\text{II.9})$$

$$\sigma_D = 0.41 R_m + 2 A \quad (\text{II.10})$$

$$\sigma_D = 0.39 R_m + Z \quad (\text{II.11})$$

Une autre relation proposée par Brand est donnée par :

$$\sigma_D (50\%) = R_m (0.58 - 1.1 \times 10^{-4} \times R_m) \quad (\text{II.12})$$

Cette relation résulte d'un très grand nombre d'expériences, elle donne une très bonne corrélation entre la limite de rupture et la limite de fatigue (figure II.1) [2].

La figure montre que la nature des essais de fatigue est très dispersive. Cette dispersion peut atteindre des valeurs considérables, elle est due à plusieurs facteurs (voir chapitre I).

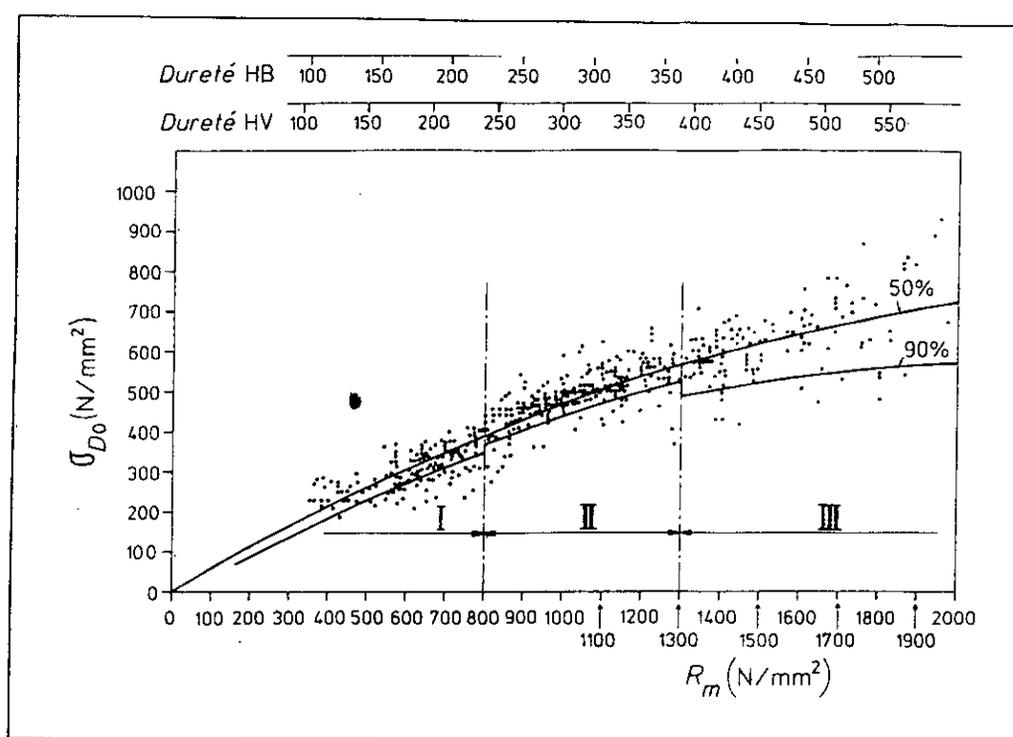


Fig.II.1- Limite d'endurance σ_D en fonction de la limite à la rupture R_m .

II.4- Influence des conditions de sollicitation:

II.4.1- Influence de la fréquence d'essai:

En règle générale, l'augmentation de la fréquence cyclique augmente la résistance du métal à la fatigue, car la durée d'application de contrainte maximale diminue.

Cependant, en élevant par trop cette fréquence, la chaleur dégagée par frottement n'est plus suffisamment éliminée, ce qui peut provoquer un échauffement local important du métal, d'où une diminution de la résistance à la fatigue [3].

II.4.2- Influence du type de sollicitation:

Lorsqu'on mesure la limite de fatigue d'un matériau avec des éprouvettes d'un type usuel, on n'obtient pas la même valeur en flexion rotative qu'en flexion plane ou en traction-compression ou en torsion [5].

Pour des efforts axiaux, traction-compression, les contraintes sont uniformes dans toute la section tandis qu'en flexion ou en torsion elles sont maximales à la surface et nulles au centre [1].

De ce fait, la limite d'endurance n'est pas la même et varie selon le type de sollicitation.

Un certain nombre de facteurs de passage K_p permettant le passage de la limite d'endurance en flexion rotative à celles des autres sollicitations a été proposé [5]:

- Flexion plane : $K_p = 1.05$
- Traction-compression : $K_p = 0.9$
- Torsion : $K_p = 0.6$

II.4.3- Effet de surcharge et sous charge :

Une surcharge temporaire peut conduire à un dépassement local de la charge de rupture du matériau et produire un endommagement irréversible sous forme de fissures.

Inversement, si l'on soumet à des charges périodiques inférieure à sa limite d'endurance, on peut avoir localement des micro-déformations plastiques qui relâcheront les concentrations des contraintes et écrouiront le matériau, le rendant plus apte à supporter des contraintes plus élevées et par suite, permettront d'augmenter sensiblement sa limite d'endurance [1].

II.4.4- Effet des contraintes résiduelles:

Aux contraintes appliquées, se superpose l'effet des contraintes résiduelles par suite d'usinage ou des traitements thermiques. C'est la somme algébrique des contraintes qui agit sur le métal.

De ce fait, on peut dire que l'effet des contraintes résiduelles est favorable à la tenue en fatigue si les contraintes ont un signe différent du signe de la contrainte appliquée et défavorable dans le cas contraire.

II.5- Influence des conditions géométriques :

II.5.1- Effet d'échelle :

A contrainte nominale égale, plus les dimensions d'une pièce croissent, plus sa résistance à la fatigue diminue. Ce fait provient de deux causes principales:

- a- Cause mécanique : lorsqu'une pièce mécanique est soumise à un champ de contrainte non homogène. On observe l'existence d'un gradient de contrainte dans les couches superficielles de la pièce. Ce gradient augmente avec les dimensions de la pièce et est l'une des causes principales de l'effet échelle en fatigue [5].
- b- Cause statistique : Plus les dimensions de la pièce augmentent, plus son volume et sa surface augmentent avec elle et ont statistiquement plus de chance de contenir des défauts qui se comporteront comme des amorces privilégiées d'une fissure de fatigue.

II.5.1.1- Coefficient d'effet d'échelle :

On définit le coefficient d'effet d'échelle K_e par le rapport de la limite d'endurance σ_D d'une éprouvette de dimensions données, à la limite d'endurance

σ_{Dref} d'une éprouvette de faible diamètre choisi comme référence et usinée dans les mêmes conditions :

$$K_e = \sigma_D / \sigma_{Dref} \quad (II.13)$$

II.5.1.2- Diagramme permettant d'estimer K_e :

A partir d'un grand nombre de résultats bibliographiques, le CETIM propose, pour des pièces non entaillées sollicitées en flexion (plane ou rotative) la courbe moyenne de la figure II.2 donnant K_e en fonction du diamètre de l'éprouvette [6].

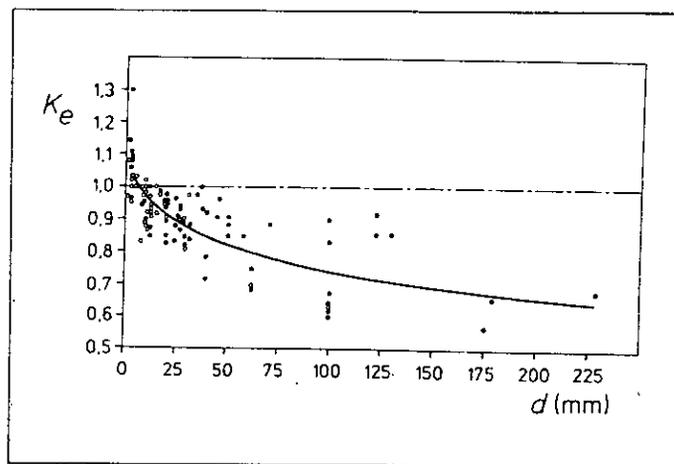


Fig.II.2- Evolution de K_e en fonction d.

II.5.2- Influence de l'état de surface :

On sait depuis longtemps que les pièces mécaniques grossièrement usinées se rompent plus vite que les pièces bien polies.

Cela s'explique par le fait que les fissures de fatigue s'amorcent le plus souvent à la surface des pièces mécaniques avant de les conduire à leur rupture.

Il faut noter que, lors de l'usinage d'une pièce, la création d'une rugosité s'accompagne toujours par une modification de l'état structural des couches superficielles du matériau et de l'état de contrainte (contrainte résiduelle).

Il convient, pour améliorer l'endurance des pièces de relever dans la mesure du possible l'endurance de la couche superficielle, on peut y arriver soit en jouant sur la nature du métal par le durcissement de cette dernière par cementation, soit par des traitements thermiques de durcissement (trempe par exemple).

II.5.2.1- Facteur d'état de surface:

Le facteur d'état de surface appelé K_s , s'exprime par le rapport de la limite d'endurance σ_D sur une éprouvette possédant un état de surface donné à la limite d'endurance σ_{Ds} de la même éprouvette parfaitement polie, dont l'état de surface est choisi comme référence :

$$K_s = \sigma_D / \sigma_{Ds} \quad (\text{II.14})$$

II.5.2.2- Abaque permettant d'estimer K_s :

La plupart des abaques de la bibliographie, permettant de déterminer K_s pour le cas d'une pièce donnée, sont généralement paramétrés en fonction:

- De la résistance à la traction du matériau R_m .
- De la rugosité superficielle R_t (ou écart total de rugosité, c'est à dire la hauteur entre le point le plus haut et le creux le plus profond du profil).

C'est en effet ce critère qui rend le mieux, compte de la profondeur d'entaille maximale qui risque de conduire à l'amorçage des fissures.

Ces abaques, comme dans le cas de l'effet d'échelle, sont très divers et conduisent malheureusement pour la même pièce, à des valeurs de K_s très éloignées entre lesquelles il est difficile de choisir.

Pour éviter cet écueil, un abaque (figure II.3) a été tracé par le CETIM à partir de très nombreux résultats bibliographiques [6].

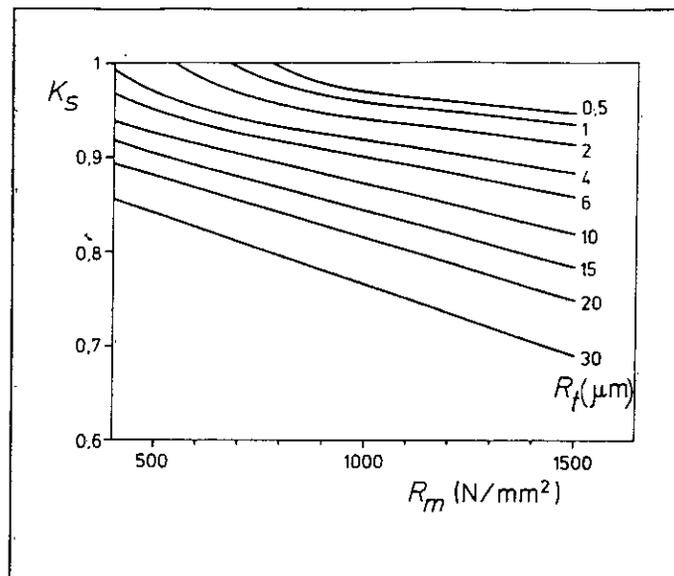


Fig.II.3- Evolution de K_s en fonction de R_m et de R_f

II.5.3- Effet d'entaille:

L'étude de cet effet constitue l'objet de notre travail. Il va être mis en évidence dans le chapitre suivant.

En pratique, le comportement des structures telles que les éprouvettes entaillées ou les assemblages soudés est influencé par différents facteurs, outre l'amplitude de la contrainte appliquée et la contrainte moyenne. La géométrie du défaut et le type de chargement auquel ils sont soumis, sont des facteurs influents qui déterminent notamment la localisation des points d'amorçage.

Le gradient de contrainte existe 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.5.3.1- Concentration de contraintes :

Soit une pièce cylindrique de diamètre constant subissant une flexion (Figure II.4), si on considère une section droite dans la pièce fléchie, on trouve dans le plan de flexion un état de contrainte linéaire donné par l'expression :

$$\sigma(x_2) = \frac{M_3}{I_{33}} \cdot x_2 \quad (\text{II.15})$$

Où:

M_3 : moment de flexion

I_{33} moment d'inertie de la section par rapport à l'axe X_3 .

$$I_{33} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (\text{II.16})$$

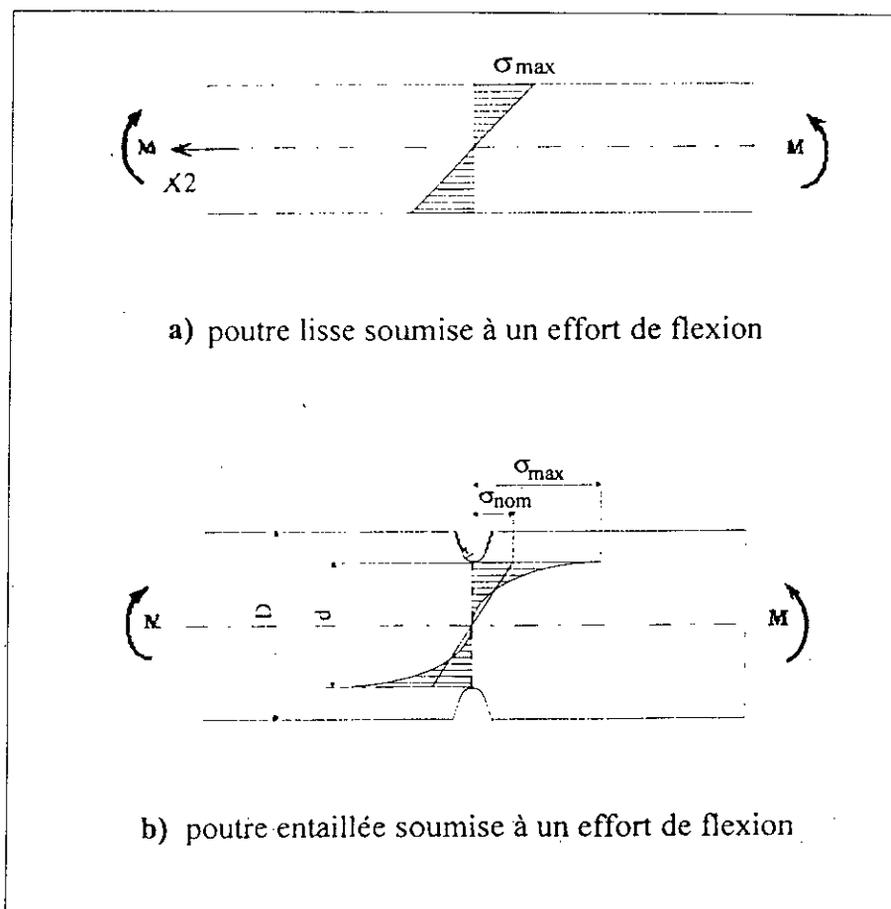


Fig.II.4- Concentration de contrainte

La valeur maximale de la contrainte sur la fibre la plus éloignée de l'axe neutre est donnée par:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{\left(\frac{\pi d^3}{32}\right)} \quad (\text{II.17})$$

Soit une autre pièce cylindrique entaillée telle que le diamètre de sa section nette soit le même que celui de la pièce décrite ci-dessus et subissant la même flexion. La répartition des contraintes, dans ce cas, n'est plus linéaire et on observe une contrainte en fond d'entaille qui dépasse la valeur maximale correspondant à l'état linéaire. On parle dans ce cas de concentration des contraintes.

II.5.3.2- Facteur de concentration de contrainte théorique:

Pour caractériser la concentration des contraintes par rapport à l'état linéaire, on utilise un coefficient de concentration de contrainte défini comme étant le rapport de la contrainte maximale en fond d'entaille à la contrainte dans la section nette :

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{nom}} \quad (\text{II.18})$$

Où :

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

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

Ces facteurs sont calculés sur la base des hypothèses de la théorie d'élasticité pour le cas des charges statiques et dépendent de la forme géométrique des pièces et du type de sollicitation.

L'une des formules donnant les valeurs de ce facteur a été établie à partir des travaux de Neuber et celle de Peterson[2] :

$$K_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{A \frac{2r}{D-d} + B \frac{2r(1+2r/d)^2}{d}}} \quad (\text{II.19})$$

Où:

D: diamètre extérieur de la pièce.

d: diamètre de la section nette.

r: rayon d'entaille.

A, B: Facteurs dépendant de la géométrie et de la sollicitation.

Pour la flexion d'un cylindre on a: $A=0.25$, $B=1.80$

Le facteur de concentration de contrainte est présenté sous forme d'abaques ou de tableaux en fonction des paramètres géométriques des pièces et ceci pour des cas simples (figure II.5).

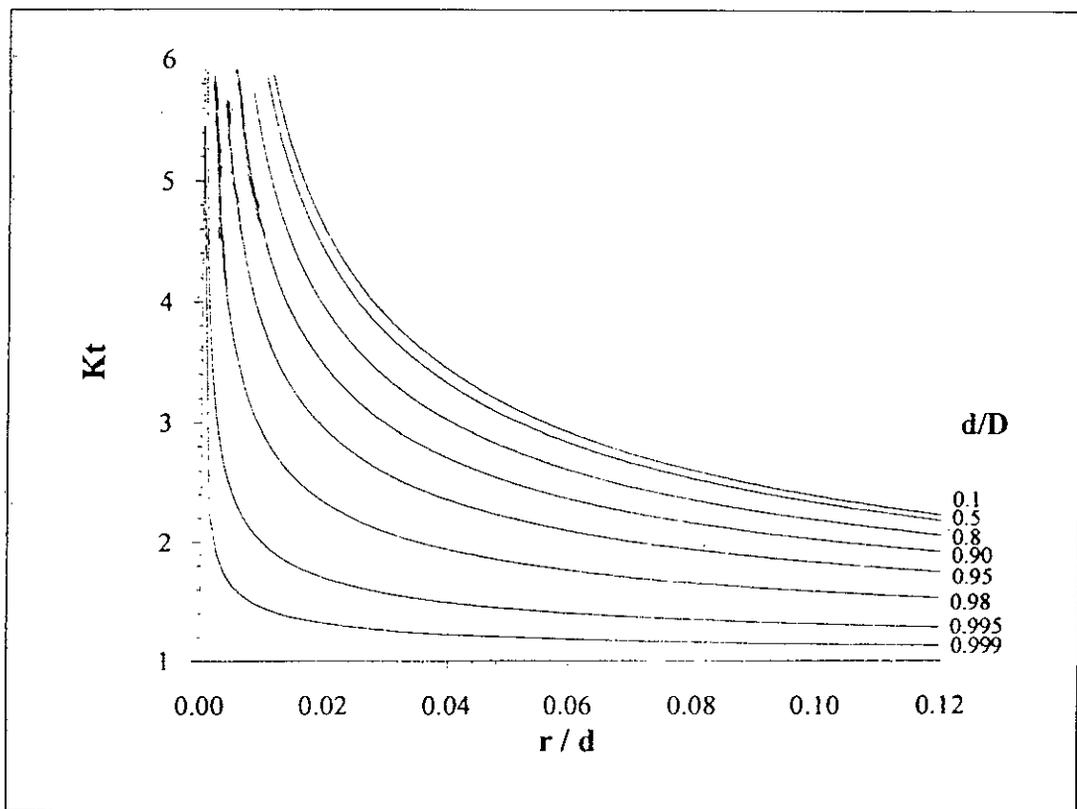


Fig.II.5- Abaque donnant K_t en fonction r/d et d/D .

II.5.3.3- Facteur de concentration des contraintes en fatigue:

La limite de fatigue des pièces entaillées notée σ_{dn} est généralement inférieure à celle d'une pièce non entaillée, le rapport entre la limite de fatigue d'une pièce lisse et la limite de fatigue d'une pièce entaillée (avec une même section nette de charge) est définie comme étant le facteur de concentration des contraintes en fatigue et est noté K_f .

$$K_f = \sigma_D / \sigma_{dn} \quad (\text{II.20})$$

Le coefficient K_f est toujours inférieur au coefficient théorique K_t en raison de l'adaptation du métal, et tend vers K_t pour les aciers à très haute limite d'élasticité. Il en résulte qu'une augmentation de résistance statique n'entraîne pas nécessairement une augmentation de résistance à la fatigue en présence d'entaille.

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

II.5.3.4- Facteur de sensibilité à l'effet d'entaille:

Au niveau conception, il est nécessaire de pouvoir estimer la limite d'endurance σ_{dn} de la pièce avec le maximum de précision. En absence d'essai sur la pièce elle-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 appelé indice de sensibilité à l'effet d'entaille et est noté q .

Thum[7] a proposé la relation suivante :

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (\text{II.21})$$

Une autre relation a été définie ensuite par Yen et Dolan[8] :

$$q_2 = \frac{K_f}{K_t} \quad (\text{II.22})$$

Cette relation est maintenant préférée parcequ'elle donne une meilleure corrélation dans l'établissement des courbes $q = f(r)$.

Plusieurs relations empiriques du facteur de sensibilité en fonction des propriétés mécaniques et géométriques des pièces ont été établies, la plus connue est celle proposé par Neuber[9], elle est de la forme :

$$q_1 = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho}{r}}} \quad (\text{II.23})$$

Où

ρ : rayon en fond d'entaille.

Neuber a relié cette constante à la grosseur des grains, mais plus tard, Khun et Hardrath[1] l'ont relié à la limite de rupture des aciers, cette relation est donnée sous forme d'une courbe dans la figure (II.6).

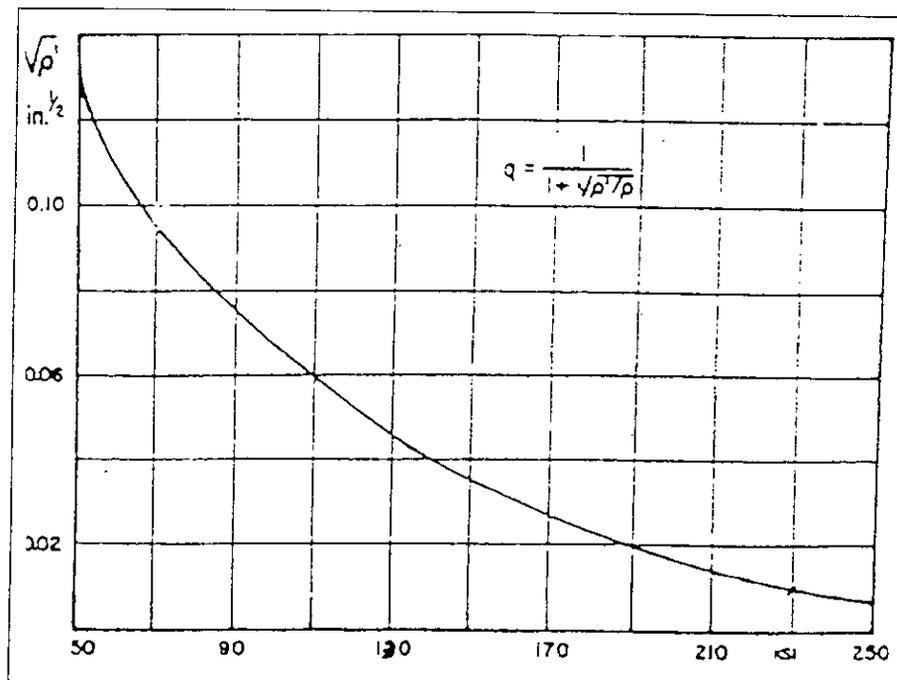


Fig.II.6-Constante de Neuber en fonction de la limite de rupture.

De cette courbe, on peut tracer des courbes reliant directement le facteur de sensibilité de Neuber au rayon en fond d'entaille pour des valeurs de la limite de rupture de l'acier. (Fig.II.7)

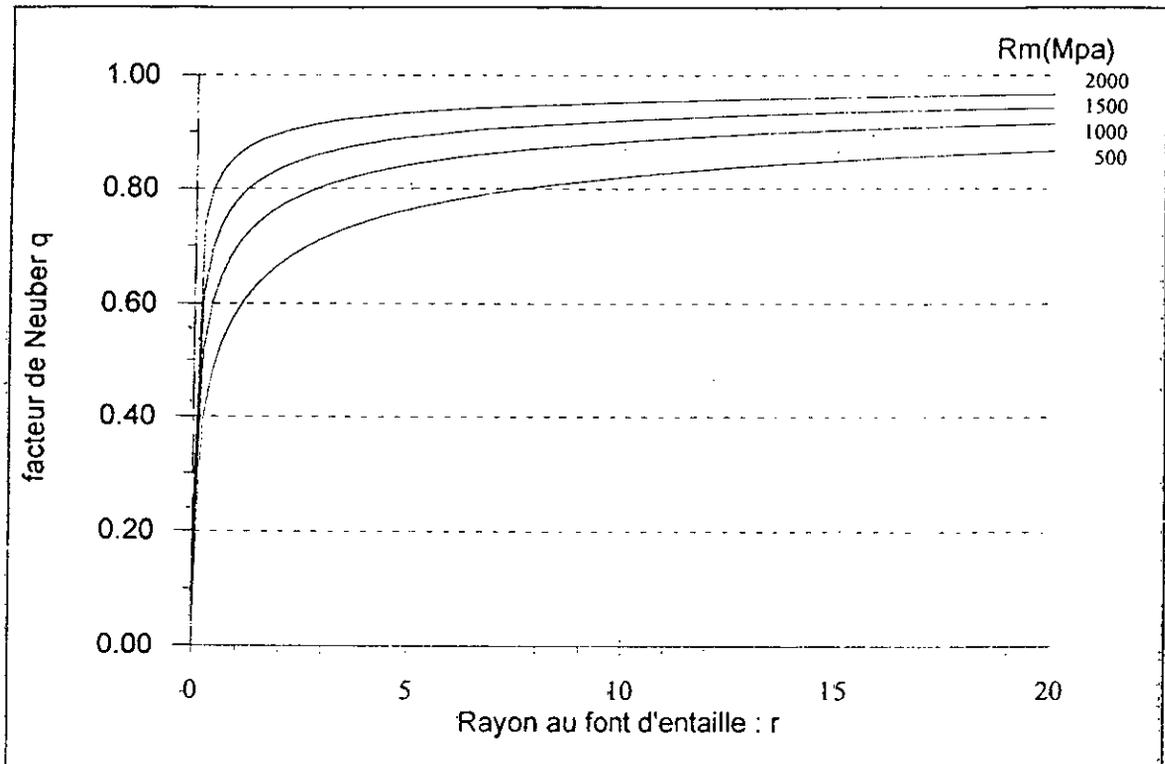


Fig.II.7-Facteur de sensibilité de Neuber en fonction de r et R_m

Une autre relation relative à la première définition du facteur de sensibilité a été proposée par Peterson [1]:

$$q_{ip} = \frac{I}{I + \left(\frac{a}{r}\right)^{1/2}} \quad (\text{II.24})$$

Où :

a : constant de matériau.

Nous donnons aussi une autre relation relative à la deuxième définition du facteur de sensibilité à l'entaille proposée par Heywood :

$$q_{2H} = \frac{1}{1 + \frac{a}{(br)^{1/2}}} \quad (II.25)$$

Où :

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 (Fig.II.8)

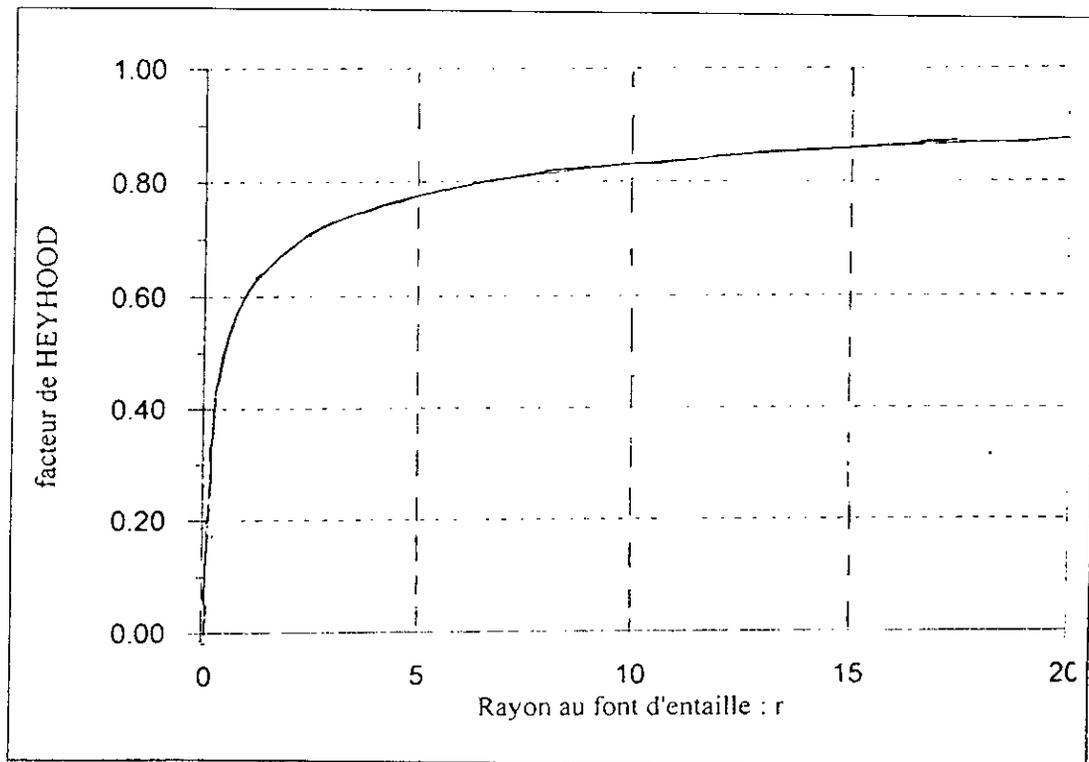


Fig.II.8-Facteur de Heywood en fonction de r(entaille en « V »).

Conclusion :

Les facteurs d'influence sur la tenue en fatigue sont multiples. Ils ont des influences plus ou moins appréciables sur la limite d'endurance des pièces.

Le facteur le plus important est l'effet d'entaille. Son influence est déterminant, elle fonction de rayon en fond d'entaille, des dimensions de la pièce (diamètre de la pièce, diamètre de la section nette) et des caractéristiques mécaniques de la pièce.

Cet effet est caractérisé par un coefficient de concentration de contrainte théorique. En fatigue, l'effet de l'entaille est caractérisé par le facteur de concentration de contrainte en fatigue et par le facteur de sensibilité à l'effet d'entaille.

Chapitre III

Etude de l'endommagement par fatigue

Chapitre III

Etude de l'endommagement par fatigue

Introduction :

Le comportement fondamental des matériaux en fatigue est étudié en général sous des sollicitations cycliques à amplitude constante. Les résultats sont représentés soit sous forme de diagramme $\sigma-N$ en fatigue à contrainte contrôlée, soit sous forme de diagramme $\varepsilon-N$ (ou $\Delta\varepsilon$) en fatigue à déformation contrôlée. En pratique, les éléments structuraux sont presque inévitablement sollicités à différents niveaux de chargement. Il est important donc de savoir comment évaluer la capacité de résistance à la fatigue d'une pièce afin d'être en mesure d'évaluer sa vie résiduelle en fonction du dommage accumulé[3].

L'endommagement par fatigue est la détérioration des propriétés du matériau suite à l'application répétitive des charges. Même sous un chargement cyclique à amplitude constante, il y a du dommage qui s'accumule dès le début jusqu'à la fin de la vie de la pièce sollicitée. Ce dommage est relié étroitement aux modifications internes de la structure au cours du processus de fatigue, ces modifications sont caractérisées par l'évolution des micro et macro-fissures jusqu'à la rupture finale.

Comme il existe une multitude de combinaison de niveaux de contrainte ou de déformation, les résultats des essais effectués en laboratoire suivant un programme particulier de chargement ne permettent pas de procéder à des applications généralisées. Des théorie du dommage cumulatif en fatigue sont donc nécessaires pour évaluer la durée de vie du matériau.

En cumul du dommage à contrainte contrôlée, les méthodes proposées sont nombreuses. Par contre, les procédures appropriées pour le cumul du dommage à déformation contrôlée n'ont été développées que récemment.

III.1- Dommages en fatigue à amplitude constante :

III.1.1- Définition du dommage :

Le dommage a souvent été défini en terme paramètres suivants :

a- Perte de la résistance en traction statique :

On sait que le matériau original (vierge) possède une résistance en traction statique R_m , cette résistance diminue graduellement au fur et à mesure que le nombre de chargements cycliques augmente jusqu'à la rupture. Si on arrête un essai de fatigue avant la rupture finale et on soumet l'échantillon à un essai en traction statique, la rupture se produit à un niveau de contrainte R'_m , située entre R_m et σ_a (amplitude de la contrainte appliquée). La figure(III.1) montre l'influence des sollicitations de fatigue sur la résistance à la rupture du métal[1].

L'objet de notre travail est d'essayer de quantifier cette perte due aux sollicitations de fatigue.

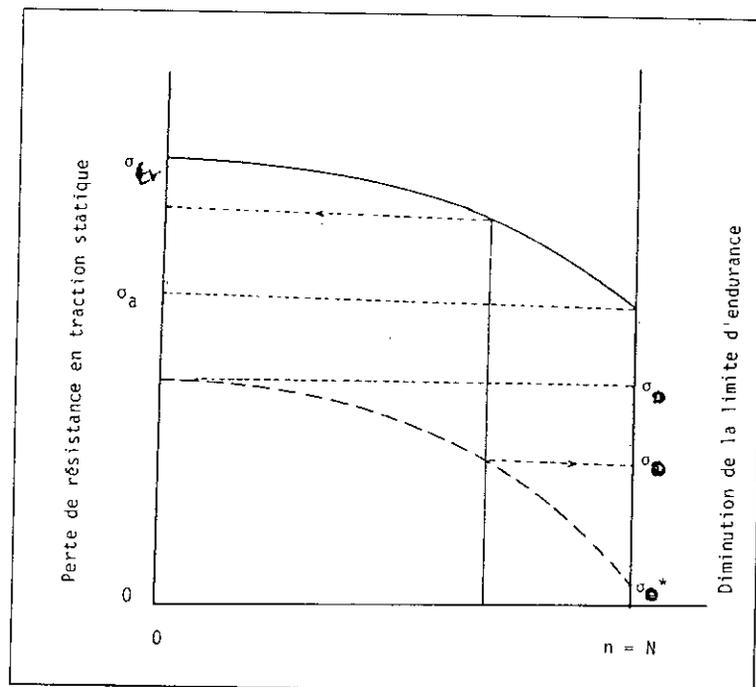


Fig.III.1– Influence de la fatigue sur résistance à la rupture et la limite d'endurance .

b- Réduction de la limite d'endurance :

La limite d'endurance du métal original σ_D diminue au cours d'un essai de fatigue pour atteindre σ_a au moment de la rupture (fig. III.1).

c- Accroissement de la déformation plastique :

Sous une charge cyclique assez élevée, la variation de déformation plastique croît avec l'augmentation du nombre de cycle appliqués pour atteindre finalement une valeur critique à la rupture [1].

III.1.2- Evolution du dommage :

Le processus d'endommagement peut être représenté schématiquement par la figure (III.1), où le dommage D est nul pour le matériau original et égal à l'unité à la rupture. On peut diviser le processus en deux grandes catégories [1] :

a- Processus A : Le dommage augmente de façon linéaire avec le nombre de cycles appliqués n ;

b- Processus : Le dommage s'accumule de façon non linéaire avec n . La concavité de la courbe représentative de $D=f(n)$ est dirigée vers le haut, ce qui signifie que le dommage s'accélère vers la fin de la vie du matériau.

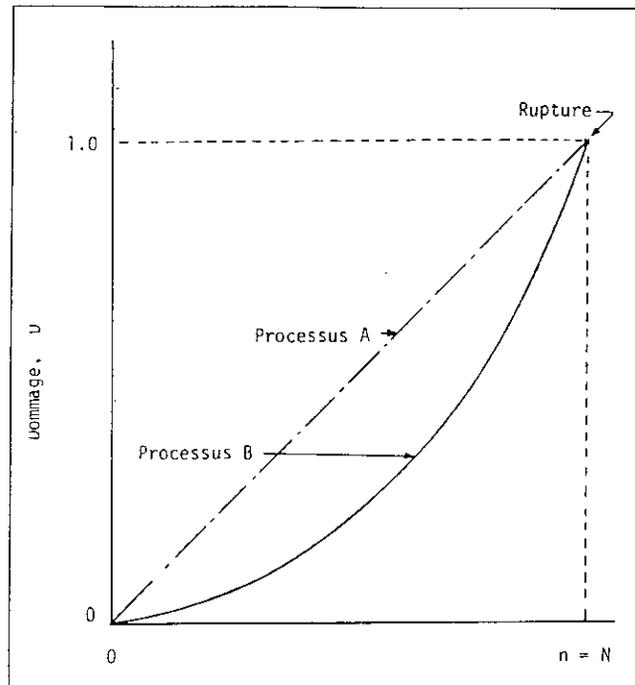


Fig.III.2– Représentation schématique du processus d'endommagement au cours d'un essai de fatigue.

Il n'y a pas de méthode expérimentale fiable pour vérifier les processus de dommage, cependant, on peut prouver la validité d'un processus en vérifiant seulement les conséquences qui en découlent.

III.1.3- Dommage cumulatif

Le dommage peut être relié étroitement aux paramètres déjà mentionnés. Par exemple, si le dommage est exprimé uniquement en fonction de la longueur de la fissure, l'accumulation de dommage n'est pas linéaire en fonction de n , mais prend plutôt la forme représentée par le processus B de la figure(III.1).

Il existe une caractéristique particulière qui fait la différence entre diverses approches théorique de cumul du dommage. D'après Kaechele [1], une « théorie fondamentale du dommage en fatigue » est définie comme étant une approche permettant d'établir la courbe de fatigue (diagramme σ - N) aussi bien d'évaluer l'effet du dommage cumulatif, tandis qu'une « théorie de cumul du dommage » traite

uniquement de l'effet du dommage accumulé sous différents niveaux de chargement en utilisant la courbe expérimentale de fatigue (diagramme σ -N).

III.2- Etude expérimentale de l'endommagement par fatigue :

Dans cette étude, le but est de quantifier le dommage causé par les sollicitations qui se traduit par une perte de la résistance à la rupture du matériau. Pour se faire, on fait subir les éprouvettes des sollicitations cycliques de flexion rotatives avant de les rompre sur la machine de traction et on compare les résultats obtenus sur ces éprouvettes avec les résultats obtenus des essais de traction sur des éprouvettes qui n'ont pas été soumises à la fatigue. Pour arriver à réaliser les expériences on utilise les machines, de flexion rotative et de traction. Les éprouvettes sont préparées à partir de deux nuances d'acier.

III.2.1- Dispositifs expérimentaux :

Pour arriver à quantifier la perte de la résistance à la traction des éprouvettes on a utilisé les machines suivantes.

III.2.1.1- Machine de flexion rotative :

On a utilisé une machine de flexion rotative de type « Shenck » de capacité 650MPa. La machine est composée de deux parties principales :

- Une partie tournante : composée de deux fourreaux (1), à l'intérieur de chaque fourreau est montée une pince qui permet le serrage de l'éprouvette (2) lors du

montage, sur chaque fourreau sont montés deux roulements rotules à deux rangés de billes, l'un des fourreaux est relié à un moteur électrique (4) tournant à 2760tr/min par l'intermédiaire d'un accouplement élastique(3), un compte tour permet d'afficher le nombre de cycles et relié au moteur.

- 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 300mm. Le levier est relié aux deux fourreaux par une chape (9) servant à transmettre l'effort produit par la masse à la partie tournante de la machine.

Le levier peut entrer en contact avec un coupe circuit, lors de la rupture de l'éprouvette, afin de nous permettre de mesurer le nombre de cycles effectués.

III.2.1.1.1- Chargement de l'éprouvette :

La machine d'essai est à deux appuis, le moment est constant le long de la partie utile de l'éprouvette (entre les deux appuis) (fig.III.2). Les contraintes agissant sur chaque fibre varient ainsi en fonction du temps suivant une fonction sinusoïdale et sont purement alternées ($\sigma_m = 0$ et $R = -1$). Chaque tour correspond à un cycle ou une période d'effort.

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

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot y \quad (III.1)$$

Où :

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

P : charge appliquée

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 de l'axe neutre à la fibre externe égale $d/2$

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

tel que

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

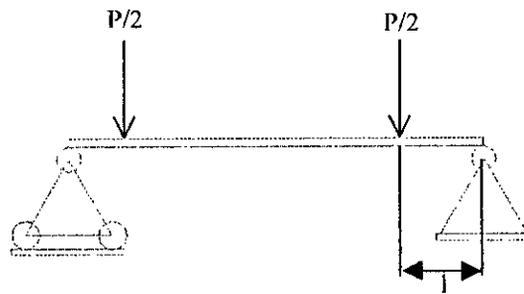


Fig.III.3- Chargement de l'éprouvette.

III.2.1.2- Machine de traction simple :

La machine de traction est de type «Stinco »de capacité maximale 100 kN, elle est constituée de deux parties, l'une fixe et l'autre peut se déplacer verticalement :

- La partie fixe : cette partie est composée de deux mors servant à fixer l'éprouvette dans une position verticale. Elle peut être réglée en hauteur suivant les dimensions de l'éprouvette.

- La partie mobile : cette partie sert au chargement de l'éprouvette en se déplaçant verticalement, elle contient, elle aussi, deux mords de fixation. Le déplacement de cette partie se fait au moyen d'un vérin hydraulique. La vitesse de déplacement est réglée en contrôlant le débit d'huile qui s'écoule à l'intérieur du vérin. L'alimentation du vérin en huile est assurée par une pompe électrique. La charge est lue sur un cadran gradué.

III.2.1.2.1- Chargement de l'éprouvette :

La contrainte est constante sur toute la section de chargement, elle est égale :

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{P}{S} \quad (\text{IV.3})$$

Où :

P : charge appliquée

S : section nette de l'éprouvette

III.2.2 Les éprouvettes d'essais :

On a utilisé des éprouvettes cylindriques comprenant des entailles situés au milieu de leurs parties utiles. Elles sont constituées de deux parties :

- Partie utile : elle a un diamètre de 10mm avec un entaille au milieu de profondeur de 1mm ce qui donne un diamètre de 8mm pour la section nette de travail.
- Partie de fixation : elle est composée de deux têtes de serrage ayant un diamètre égale à 12 ± 0.1 mm compatible avec les fourreaux de la machine.

Les deux parties de l'éprouvette (partie utile et têtes) sont reliées entre eux tangentiellement de façon à diminuer les concentrations de contraintes. Les éprouvettes ont été préparées à partir de deux nuances d'acier, des éprouvettes en acier A60 ayant un entaille de rayon de fond $r = 0.1$ mm et des éprouvettes en acier doux étiré avec un rayon en fond d'entaille $r = 0.5$ mm. La longueur des éprouvettes est égale à 180 ± 0.1 mm avec longueur de la partie utile égale à 30 ± 0.1 mm.

III.2.2.1- Usinage des éprouvettes :

Les éprouvettes en acier doux ont été réalisées sur tour et usinées à partir d'une barre de 15mm de diamètre. L'opération d'usinage comprend trois étapes :

- Ebauche : pour se rapprocher du diamètre voulu, on a effectué une opération d'ébauche en deux passes de 1mm pour chacune.
- Semi-finition : cette opération a été faite en une seule passe de profondeur égale à 0.7mm à une vitesse de rotation plus grande que celle de l'opération d'ébauche.
- Finition : cette dernière opération a pour but d'obtenir un état de surface acceptable. Elle est faite en une seule passe de profondeur 0.3mm.

La partie utile a été obtenue par des passes de 0.5mm, l'entaille est réalisé avec un outil de filetage d'angle 60° et de rayon 0.5mm.

Les éprouvettes en acier A60 ont les mêmes dimensions et la même forme que celles en acier doux sauf que pour ces éprouvettes, le rayon en fond d'entaille

$r = 0.1 \text{ mm}$.

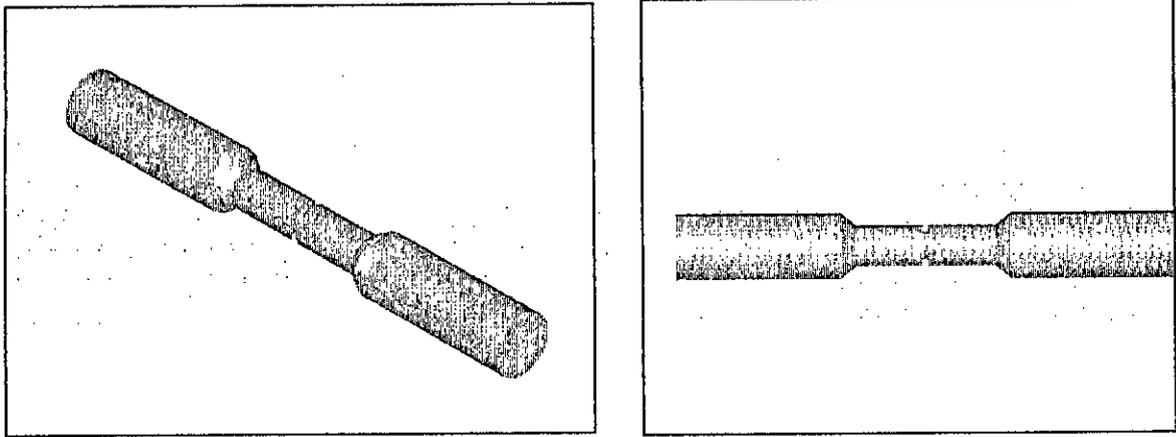


Fig.III.4 – Forme des éprouvettes

Les entailles ont une forme en « V », d'un angle de 60° et de profondeur de 1mm.

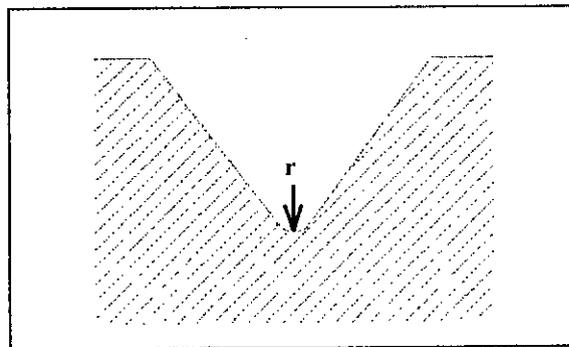


Fig.III.5- Forme des entailles

III.2.3- Méthode d'essai :

Le premier but de cette étude est de déterminer la charge à rupture des éprouvettes, pour atteindre ce but, on commence par des essais de traction afin de déterminer la résistance à la rupture des éprouvettes. On a abouti aux résultats suivants :

Pour les éprouvettes en acier doux :

N° d'Essai	Charge de rupture (kN)	Contrainte nominale σ_{nom} (MPa)
Essai 1	20.3	404
Essai 2	20.3	404
Essai 3	20.2	402
Essai 4	20.1	400

Tableau III.1 : Résistance à la rupture des éprouvettes en acier doux.

Nous constatons d'après la table précédente que les valeurs obtenues ne sont pas dispersées. Après calcul, on obtient la valeur moyenne suivante qui représente la résistance à la rupture de l'acier considéré :

$$R_m = 402 \text{ Mpa}$$

Puisqu'on connaît pas la nuance de l'acier essayé, on ne peut pas déduire l'effet de l'entaille sur la résistance à la rupture.

Pour les éprouvettes en acier A60 :

N° d'Essai	Charge de rupture (kN)	Contrainte nominale σ_{nom} (Mpa)
Essai 1	27.7	550
Essai 2	25.2	502
Essai 3	25.2	502

Tableau III.2 : Résistance à la rupture des éprouvettes en acier A60.

Nous remarquons que le résultat de l'essai 1 est plus grand que les deux autres. Cela peut être dû aux tolérances sur les dimensions de l'éprouvette. La résistance à la rupture est obtenue en faisant la moyenne des valeurs obtenues expérimentalement :

$$R_m = 518 \text{ MPa}$$

Cette valeur, comparée à la valeur de résistance du métal original (sans entaille), nous renseigne sur la perte due à la présence d'entaille. Cette perte est égale à 82 MPa et représente 14% de la résistance du matériau original.

Le deuxième groupe d'éprouvettes ont subi des sollicitations cycliques de flexion rotative où le nombre de cycle a été fixé à 100 000 cycles. La contrainte est choisie égale à la moitié de la limite élastique du matériau.

Après cette opération, on soumet ces mêmes éprouvettes à des essais de traction menés jusqu'à rupture. Les résultats obtenus sont mentionnés sur les tableaux ci-dessous.

Dans la littérature, on a trouvé que les limites élastiques des aciers doux sont souvent comprises entre 260 et 340 MPa. Vu que la limite élastique du métal étudié est

inconnue, on a adopté une limite égale à 280 MPa. D'où la contrainte appliquée pour la flexion rotative est 140 MPa. Après un nombre de cycle égale à 100000 cycles, on soumet les éprouvettes à des essais de traction menés jusqu'à rupture.

On a enregistré les résultats suivants :

$$\sigma_a = 140 \text{ Mpa.}$$

N° d'Essai	Charge de rupture (kN)	Contrainte nominale σ_{nom} (Mpa)
Essai 1	16.2	323
Essai 2	17.3	344
Essai 3	19.0	378
Essai 4	17.7	352
Essai 5	16.7	332
Essai 6	15.3	304
Essai 7	16.4	327
Essai 8	17.0	338
Essai 9	17.5	348

Tableau III.3 : Résistance à la rupture des éprouvettes en acier doux après sollicitation de fatigue.

Les résultats sont relativement dispersés, ce qui est expliqué par la nature même des essais de fatigue. La résistance à la rupture est estimée par la moyenne des résultats expérimentaux :

$$R_m = 338 \text{ MPa}$$

La perte de résistance (par rapport aux éprouvettes n'ayant pas subies une sollicitation de flexion rotative) due au chargement de fatigue en flexion rotative est égale à 64 MPa et représente 16% de la résistance des éprouvettes essayées en traction seulement. Cette perte est due à l'endommagement par fatigue.

Pour les éprouvettes en acier A60, l'amplitude des contraintes de flexion est $\sigma_d = 167.5 \text{ MPa}$. Les résultats obtenus après les sollicitations de fatigue sont mentionnés sur le tableau ci-dessous :

N° d'Essai	Charge de rupture (kN)	Contrainte nominale σ_{nom} (Mpa)
Essai 1	20.3	404
Essai 2	20.3	404
Essai 3	20.2	402
Essai 4	20.1	400
Essai 5	22.8	454
Essai 6	22.8	454
Essai 7	23.0	458

Tableau III.4 : Résistance à la rupture des éprouvettes en acier A60 après sollicitation de fatigue.

La résistance à la rupture est estimée à 425 MPa. La perte par rapport aux éprouvettes non chargées en flexion est égale à 93 MPa et constitue 18% de la résistance des éprouvettes non endommagées essayées en traction seulement.

Interprétation :

En calculant le coefficient de concentration des contraintes K_t par la formule (II.19) avec $d = 8 \text{ mm}$, $D = 10 \text{ mm}$ on trouve :

- Pour les éprouvettes en acier A60 ($r = 0.1$) : $K_t = 4.72$
- Pour les éprouvettes en acier doux ($r = 0.5$) : $K_t = 2.56$

On remarque que les éprouvettes en acier A60 perdent plus de résistance que les éprouvettes en acier doux. Ceci peut s'expliquer par deux choses :

- La concentration des contraintes est plus importante dans le cas des faibles rayons en fond d'entaille.
- La capacité d'adaptation aux sollicitations de fatigue est plus grande dans le cas des aciers doux.

Conclusion :

Les résultats obtenus montrent que le métal sollicité en fatigue perd de la résistance. Cette perte est due à l'endommagement par fatigue. On a trouvé aussi que la dispersion des résultats de fatigue est parfois considérable.

Cette perte est plus grande dans le cas des faibles rayons en fond d'entaille et dans le cas des aciers durs.

*Conclusion
générale*

Conclusion Générale

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à la quantification expérimentale de l'endommagement par fatigue qui se manifeste par une perte de la résistance à la rupture du métal.

Après rappel des généralités sur les facteurs d'endurance des métaux et les facteurs d'influence sur la tenue en fatigue, nous avons procédé à l'étude expérimentale pour pouvoir quantifier la perte de résistance due aux chargements cycliques de flexion rotative.

Les essais ont été effectués sur des éprouvettes entaillées. On a utilisé deux nuances d'acier, un acier A60 de résistance $R_m=600$ MPa et un acier doux. La méthode utilisée consiste à comparer la résistance des éprouvettes ayant subies un chargement de fatigue en flexion rotative à celles des éprouvettes non sollicitées en fatigue.

Les résultats obtenus montrent que les métaux perdent de la résistance sous l'effet des chargements cycliques ce qui est confirmé par les différentes théories. Cette perte est due à l'endommagement par fatigue.

On a trouvé que la perte de résistance est plus importante pour les aciers durs parcequ'ils une faible capacité d'adaptation.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **C.Bathias, J.P.Bailon,** ' La fatigue des matériaux et des structures', **Presse de l'université de Montréal, 1989.**
- [2] **T.Boudaoud, A.Chabane,** ' Etude expérimentale du phénomène de fatigue sous entaille en flexion rotative ,' **Pfe ENP 1997.**
- [3] **Cazaud,** ' La fatigue des métaux ', **Edition Dunod 1969.**
- [4] **Normes françaises des produits sidérurgiques- NF A 03-401-1986.**
- [5] **A.Brand,** ' Fatigue des métaux ferreux', **Technique de l'ingénieur, b5050.**
- [6] **A.Brand,** ' Rapport de CETIM données technologiques sur la fatigue 1989.
- [7] **A.Thum, O.Svensen,** ' Double Notch Effect ', **VDI.Zeitschr, 92, Nr-1950.**
- [8] **Neuber, N.E.Frost, K.Marchet,** ' Metal fatigue ,' **Edition Oxford university. 1952**