

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

*Pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'Etat
En Génie Mécanique*

THEME

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

**QUANTIFICATION DE L'ENDOMMAGEMENT SOUS
SURCHARGE EN FLEXION ROTATIVE PAR DES ESSAIS
DE TRACTION STATIQUE**

Présenté par :

Melle. BOUZIDI Safia

Proposé et dirigé par :

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

**PROMOTION
JUN 2000**

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

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

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

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département de Génie Mécanique**

MEMOIRE

**Pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'Etat
En Génie Mécanique**

THEME

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

**QUANTIFICATION DE L'ENDOMMAGEMENT SOUS
SURCHARGE EN FLEXION ROTATIVE PAR DES ESSAIS
DE TRACTION STATIQUE**

Présenté par :

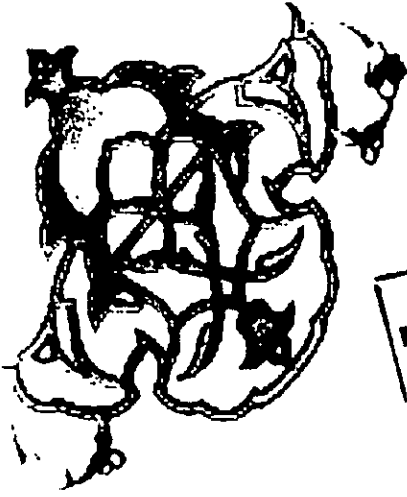
Melle. BOUZIDI Safia

Proposé et dirigé par :

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

**PROMOTION
JUN 2000**

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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



DIDICACES

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de ma sœur Dalila.

- ❖ Aux êtres les plus chers au monde : ma mère et mon père.
- ❖ A mes frères, mes sœurs, surtout Aïcha.
- ❖ A mes amies, Chorouk, Chafika, Souhila, Faïza, Anissa, Nawel.

Safia

REMERCIEMENT

Je remercie dieu tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.

Je remercie vivement Mr. Belkacemi et Mr. Guergueb d'avoir accepté de m'encadrer et de me diriger pendant cette étude.

Je tiens à remercier sincèrement Mr. Mecheri pour ses conseils.

Je remercie tous les travailleurs de l'atelier, surtout Abdessalem, Mustapha et Rachid.

J'adresse ma profonde reconnaissance à Mr. Bennour, Mr. Riache, Mr. Bouaziz, Mr. Halli, Mr. Madani et à tous ceux qui de près ou de loin ont participé d'élaborer ce mémoire.

ملخص:

إن أعراض التضرر تظهر عندما تفقد المواد القدرة على المقاومة. إن الهدف من هذه الدراسة هو التقدير الكمي للتضرر تحت الهميل المفرط عن طريق اختبارات الشد السكوني لعينات مشققة مكونة من الفولاذ الين بعد اخضاعها لاجهادات دورية بواسطة آلة الإنحناء الدوراني.

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

RESUME

L'endommagement se manifeste par une perte de résistance. Le but de cette étude est de quantifier l'endommagement sous surcharge, par des essais de traction statique sur des éprouvettes entaillées en acier doux ayant subies des sollicitations cycliques sur la machine de flexion rotative.

Mots clés : Fatigue, endommagement, surcharge, perte de résistance, concentration de contraintes, flexion rotative.

ABTRACT

The damage manifesting the loss of the capability to resist, the goal of this study is to quantify the damage under overloading by the traction test using split samples in soft steel having been subjected to stresses on rotative bending machine.

Key words: Fatigue, damage, overloading, loss of resistance, stress concentration, rotative bending.

Sommaire



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

Chapitre I : Généralités sur l'endommagement

Introduction.....	5
I.1- Différents mécanismes de l'endommagement.....	5
I.1.1- L'endommagement plastique ductile.....	5
I.1.2- L'endommagement viscoplastique fragile(ou de fluage).....	5
I.1.3- L'endommagement macrofragile.....	5
I.1.4- L'endommagement de fatigue.....	5
I.2- L'endommagement de fatigue.....	6
I.2.1- Fatigue.....	6
I.2.2- Endurance.....	7
I.2.3- Notions de limite d'endurance et de limite de fatigue.....	7
I.2.3.1- Limite d'endurance.....	7
I.2.3.2- Limite de fatigue.....	7
I.2.4- Détériorations dues à la fatigue.....	7
I.2.5- Définition du dommage.....	8
I.3- L'essai de fatigue.....	9
I.3.1- Définitions et symbolisation des termes utilisés en fatigue.....	9
I.3.1.1- Contrainte nominale.....	9
I.3.1.2- Cycle de contrainte.....	10
I.3.1.3- Rapport d'endurance.....	11
I.3.2- Classification des sollicitations des essais de fatigue.....	11
I.3.2.1- Essai sous amplitude constante.....	11
I.3.2.2- Essai sous amplitude variable.....	12
I.3.3- Classification des modes de sollicitations.....	13
I.3.4- Les éprouvettes d'essais.....	13
I.3.4.1- Formes des éprouvettes.....	13
I.3.4.2- Dimensions des éprouvettes.....	14
I.3.5- Présentation pratique des résultats.....	15
I.3.5.1- Courbe de Wöhler.....	15
I.3.5.1.1- Tracé de la courbe de Wöhler-Estimation de la limite d'endurance à partir d'une formule analytique de la courbe de Wöhler.....	16
I.3.5.2- Courbes d'équiprobabilités.....	16
I.3.5.3- Diagrammes d'endurances.....	17
I.3.6- Estimation des caractéristiques de résistance et d'endurance en fatigue.....	17
I.3.6.1- Méthodes d'estimation de l'endurance à N cycles.....	18
I.3.6.1.1- Méthode des probits.....	18
I.3.6.1.2- Méthode de l'essai en escalier.....	19
I.3.6.1.3- Méthode d'itération.....	20
I.3.6.2- Choix de méthode d'essai.....	20

Conclusion.....	20
-----------------	----

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.....	22
II.1.1.2- Fatigue à haute température.....	23
II.1.2- Influence de la corrosion.....	23
II.2- Influence des facteurs métallurgiques.....	23
II.3- Influence des caractéristiques mécaniques.....	24
II.4- Influence des conditions de sollicitation.....	25
II.4.1- Influence de la fréquence d'essai.....	25
II.4.2- Influence du type de sollicitation.....	26
II.4.3- Influence des contraintes appliquées.....	26
II.4.3.1- Influence d'une sous-charge.....	26
II.4.3.2- Influence d'une surcharge.....	26
II.4.4- Influence des contraintes résiduelles.....	27
II.5- Influence des conditions géométriques.....	27
II.5.1- Effet d'échelle.....	27
II.5.1.1- Coefficient d'effet d'échelle.....	28
II.5.1.2- diagrammes permettant d'estimer K_e	28
II.5.2- Influence de l'état de surface.....	29
II.5.2.1- Facteur d'état de surface.....	29
II.5.2.2- Abaques permettant d'estimer K_s	29
II.5.3- Effet d'entaille.....	30
II.5.3.1- Concentration de contrainte.....	30
II.5.3.2- Facteur de concentration de contrainte théorique K_t	31
II.5.3.3- Facteur de concentration de contrainte en fatigue K_f	33
II.5.3.4- Facteur de sensibilité à l'effet d'entaille.....	33
Conclusion.....	36

Chapitre III : Etude théorique du phénomène de surcharge

Introduction.....	38
III.1- Dommage cumulatif.....	38
III.1.1- Evolution du dommage.....	38
III.1.1.1- Evolution linéaire.....	39
III.1.1.2- Evolution non linéaire.....	39
III.1.1.2.1- Loi de Miner modifiée.....	40
III.1.1.2.2- Théorie de Marco et Starkey.....	40

III.1.1.2.3- Théorie de Shanley.....	40
III.1.1.2.4- Théorie de Corten-Dolan.....	40
III.1.2- Cumul du dommage.....	41
III.1.2.1- Cumul linéaire.....	41
III.1.2.1.1- Loi de Miner.....	41
III.1.2.1.2- Loi de Miner modifiée.....	41
III.1.2.2- Cumul non linéaire.....	41
III.2- Lacunes de la règle linéaire.....	42
III.3- Domaine de validité de la loi de Miner.....	42
Conclusion.....	45

Chapitre IV : Etude expérimentale de l'endommagement sous surcharge

Introduction.....	47
IV.1- Dispositifs expérimentaux.....	47
IV.1.1- Machine de flexion rotative.....	47
IV.1.1.1- Mode de sollicitation de l'éprouvette.....	48
IV.1.2- Machine de traction simple.....	49
IV.1.2.1- Chargement de l'éprouvette.....	49
IV.2- Les éprouvettes d'essais.....	49
IV.2.1- Usinage des éprouvettes.....	50
IV.3- Méthode d'essai.....	51
Interprétation et Conclusion.....	60
Conclusion générale.....	62

Table des figures



I.1- Propagation de fissures de fatigue sous diverses contraintes constantes.....	7
I.2- Influence de la fatigue sur la résistance à la rupture et limite d'endurance.....	9
I.3- Cycle de contrainte.....	11
I.4- types de cycles de contraintes.....	12
I.5- Chargement avec modulation de l'amplitude.....	13
I.6- Formes des éprouvettes.....	14
I.7- Courbe de Wöhler.....	15
I.8- Courbes d'équiprobabilités.....	17
I.9- Estimation de la limite d'endurance par la méthode des probits.....	18
II.1- Facteurs α et β pour la formule de Krey.....	24
II.2- Limite d'endurance σ_D en fonction de la limite à la rupture R_m	25
II.3- Evolution de « K_e » en fonction de « d ».....	28
II.4- Evolution de K_s en fonction de R_m et de R_t	29
II.5.a- Flexion d'un cylindre de diamètre constant.....	30
II.5.b- Flexion d'un cylindre entaillé.....	31
II.6- Abaque donnant K_t en fonction de r/d et d/D	32
II.7- Constante de Neuber en fonction de la limite de rupture.....	34
II.8- Facteur de sensibilité de Neuber en fonction de r et R_m	35
II.9- Facteur de Heywood en fonction de r (entaille en « V »).....	36
III.1- Evolution du dommage.....	39
III.2- Encadrement de la valeur n_2 réelle.....	43
IV.1- Sollicitation de l'éprouvette.....	49
IV.2- Formes des éprouvettes.....	50
IV.3- Formes des entailles.....	51

Table des tableaux

IV.1- Résistance à la rupture des éprouvettes lisses (d =8 mm).....	51
IV.2- Résistance à la rupture des éprouvettes entaillées (d = 8 mm).....	52
IV.3- Résistance à la rupture des éprouvettes endommagées (sans surcharge, n = 10 ⁺⁵).....	54
IV.4- Résistance à la rupture des éprouvettes endommagées (avec surcharge, n = 10 ⁺⁵).....	55
IV.5- pourcentages des pertes de résistance (n = 10 ⁺⁵).....	56
IV.6- Résistance à la rupture des éprouvettes endommagées (sans surcharge, n = 2.10 ⁺⁵)...56	
IV.7- Résistance à la rupture des éprouvettes endommagées (avec surcharge, n = 2.10 ⁺⁵)...57	
IV.8- pourcentages des pertes de résistance (n =2. 10 ⁺⁵).....	58
IV.9- Variation du dommage en fonction du nombre de cycle n.....	58

Notations

- K_t : Coefficient de concentration de contrainte théorique.
 K_f : Coefficient de concentration de contrainte en fatigue.
 q : Facteur de sensibilité à l'effet d'entaille.
 K_e : Coefficient d'effet d'échelle.
 K_s : Facteur d'état de surface.
 K_p : Facteur de passage.
 R_e : Limite d'élasticité.
 R_m : Résistance à la rupture.
 σ_D : Limite d'endurance.
 σ_m : Contrainte moyenne.
 σ_{nom} : Contrainte nominale.
 M : Moment fléchissant.
 I : Moment d'inertie.
 d : Diamètre de la section nette de l'éprouvette.
 P : Charge appliquée.
 S : Section nette de l'éprouvette.
 r : Rayon en fond d'entaille.
 v : Distance de la fibre neutre à la fibre externe.
 n_i : Nombre de cycles appliqué au niveau de la contrainte σ_i .
 N_i : Nombre de cycles à la rupture d'amplitude σ_i .
 D : Dommage.
 ε : L'écart maximum.
 α : Coefficient réel.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Depuis fort longtemps, toute pièce mécanique est construite, très souvent à partir de critères de résistance. Malheureusement, on constate, et cela également depuis longtemps, la ruine parfois catastrophique des structures qui ne sont pourtant soumises qu'à des contraintes modestes par rapport aux caractéristiques mécaniques : résistance à la traction et même très inférieur à la limite d'élasticité des matériaux utilisés.

Le responsable étant l'endommagement par fatigue, que l'on repère en fonction du nombre de cycles.

On appelle fatigue la cause de la défaillance des pièces soumises à des efforts variables qui ont un effet plus dangereux que les efforts statiques.

La fatigue est un mode important de comportement de tous les matériaux, de types les plus différents, comme les métaux, les plastiques, le caoutchouc et le béton, ce comportement se caractérise par trois particularités principales : perte de résistance, perte de plasticité et augmentation de l'incertitude.

Les recherches poursuivies sur la fatigue ont montré l'insuffisance des essais ordinaires des métaux par traction, dureté, chocs... etc, il est donc apparu 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.

La concentration de contrainte est un problème rencontré dans la conception mécanique d'un composant ou organe mécanique, elle est provoquée par les changements brusques de sections, par les entailles, les trous... etc. La zone de concentration de contraintes est souvent le site d'amorçage des fissures de fatigue mais peut être aussi l'origine d'une rupture brutale dans le cas d'un matériau fragile.

Ce travail constitue une étude du phénomène de surcharge. Il comporte quatre chapitres. Dans le premier chapitre, on définira les différents mécanismes de l'endommagement, des notions de base sur la fatigue; enfin, de l'essai de fatigue et de son objectif.

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

Le chapitre III est consacré à l'étude théorique du phénomène de surcharge. Nous présentons dans ce chapitre les différentes lois de cumul du dommage. Nous donnons ensuite, les lacunes de la loi linéaire; enfin, nous cherchons à déterminer théoriquement le domaine de validité de cette loi.

Quant au chapitre IV, il est consacré à l'étude expérimentale de l'endommagement sous surcharge par la traction. On examinera les essais réalisés et le matériel utilisé. Le but étant de vérifier une des conditions trouvées au chapitre III, prenant comme variable le nombre de

cycle au premier niveau de chargement. Cette étude nous permet de prévoir le nombre de cycles à la rupture.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I

GENERALITES SUR L'ENDOMMAGEMENT

Chapitre I

Généralités sur l'endommagement.

Introduction :

L'état initial d'un matériau est l'état à partir duquel l'histoire de sollicitations est connue, le stade final de l'endommagement est la rupture de l'élément de volume, l'élément de volume est considéré comme totalement endommagé c'est à dire rompu, lorsqu'une fissure macroscopique est amorcée.

I.1- Différents mécanismes de l'endommagement :

La théorie de l'endommagement décrit l'évolution des phénomènes de dégradation de la pièce entre l'état vierge jusqu'à la rupture, cette évolution est due à plusieurs mécanismes :

I.1.1- L'endommagement plastique ductile :

Il accompagne les grandes déformations plastiques des métaux aux températures ambiantes et peu élevées[3].

I.1.2- L'endommagement viscoplastique fragile (ou de fluage) :

Fonction du temps qui, pour les métaux aux températures moyennes et élevées, correspond aux décohésions intergranulaires accompagnant les déformations viscoplastiques[3].

I.1.3- L'endommagement macro fragile :

Qui peut être provoqué par des sollicitations monotones sans déformation irréversibles appréciables (le cas de béton)[3].

I.1.4- L'endommagement de fatigue :

Du à la répétition des contraintes et que l'on repère en fonction du nombre de cycles[3].

L'endommagement par fatigue mené jusqu'à rupture, comprend trois périodes : .

a) Période de germination ou période d'amorçage :

La fatigue des métaux commence par un dépassement très localisé de la limite élastique, au voisinage des défauts, les concentrations de contraintes créent des microdéformations plastiques 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 localisés souvent à la surface de l'échantillon.
- Mécanismes d'intrusion-extrusion.

Au cours de cette phase, les défauts suivent le plus souvent des plans orientés à 45° de la contrainte principale maximale.

b) Période de propagation :

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

Stade 1 : (ou période de propagation interne des microfissures précitées).

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

Stade 2 :

Le champ de contrainte évoluant lorsque l'on pénètre à l'intérieur de la pièce, une des microfissures va quitter le plan de la scission maximale pour suivre le plan perpendiculaire de la contrainte de tension maximale.

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

c) Rupture brutale :

Le développement des fissures diminue la section soumise aux sollicitations, ce qui provoque la rupture du métal.

I.2- L'endommagement de fatigue :

I.2.1- Fatigue :

La fatigue désigne le comportement des matériaux sous des cycles répétés de contrainte ou de déformation, qui causent une détérioration de la matière qui aboutit en phase finale à une rupture brutale.

I.2.2- Endurance :

On appelle endurance la capacité de résistance à la fatigue des pièces et des assemblages[1].

I.2.3- Notions de limites d'endurances et de limite de fatigue :

I.2.3.1- limite d'endurance :

Pour une contrainte moyenne donnée, la limite d'endurance est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle on constate 50% de rupture après un nombre fini N de cycles[10].

Cette valeur peut être déterminée à l'aide des méthodes statistiques et est notée $\sigma_D(N)$.

I.2.3.2- Limite de fatigue :

Pour une contrainte moyenne donnée, la limite de fatigue est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'est pas constaté de rupture après un nombre infini de cycles N [10].

I.2.4- Détérioration dues à la fatigue :

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

La figure(I.1) montre certaines courbes typiques de croissance des fissures à différents niveaux de contraintes. Chaque courbe se termine par la rupture pour une certaine longueur critique des fissures[5].

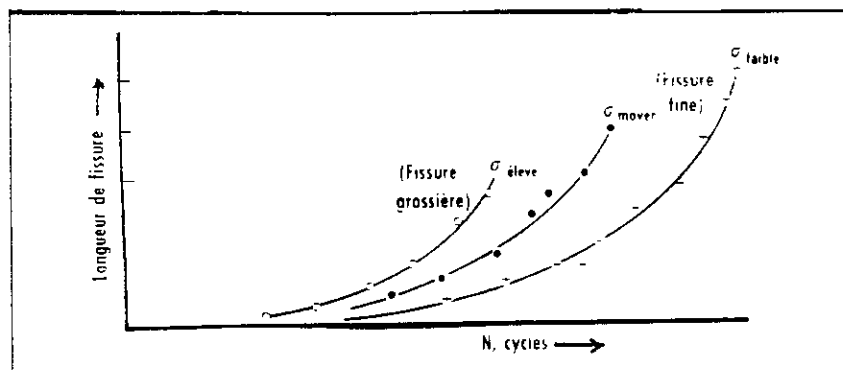


Fig1.1- Propagation de fissures de fatigue sous diverses contraintes constantes.

L'ordre suivant lequel on exerce les niveaux de contraintes a des effets importants sur la progression des détériorations de fatigue, par exemple, il semble logique qu'une grosse fissure, déclenchée par une contrainte élevée antérieure, ne se propage pas très rapidement sous l'effet d'une faible contrainte ultérieure. Une fissure fine, laissée par un niveau antérieur de faible contrainte, peut se propager très rapidement sous l'action d'une contrainte élevée ultérieure, en même temps, l'écroutissement local par déformation à l'extrémité de la fissure, peut avoir une grande importance sur la façon dont elle se comporte sous des contraintes ultérieures plus élevées ou plus basses.

Toutes ces variations tendent à prendre une valeur moyenne si les niveaux de contrainte sont exercés au hasard, comme un grand nombre de spectres de sollicitations sont exercés au hasard, il est raisonnable de penser que les variations prennent une valeur moyenne : c'est sur cette base que la théorie des détériorations cumulatives est établie[5].

I.2.5- Définition du dommage :

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 de construction[1].

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 à des histoires de contraintes plus ou moins variées.

Le dommage a souvent été défini en terme des paramètres suivants :

a)- Evolution de la fissure et absorption de l'énergie plastique :

L'extension d'une fissure de longueur L au cours d'un essai de fatigue est caractérisée par sa longueur L_0 correspondant à une fissure microscopique ($n=1$) jusqu'à une valeur critique L_c correspondant à la rupture ($n=N$).

Plusieurs mécanismes de déformation ont été proposés pour expliquer l'extension de la fissure, par exemple, on peut expliquer la formation de nouveaux fronts reliés à la vitesse de fissuration par l'absorption de l'énergie dans la zone plastique qui existe aux extrémités de la fissure[1].

b)- Perte de résistance en traction statique :

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

R_m est la résistance du matériau vierge en traction statique et σ_a est l'amplitude de la contrainte appliquée.

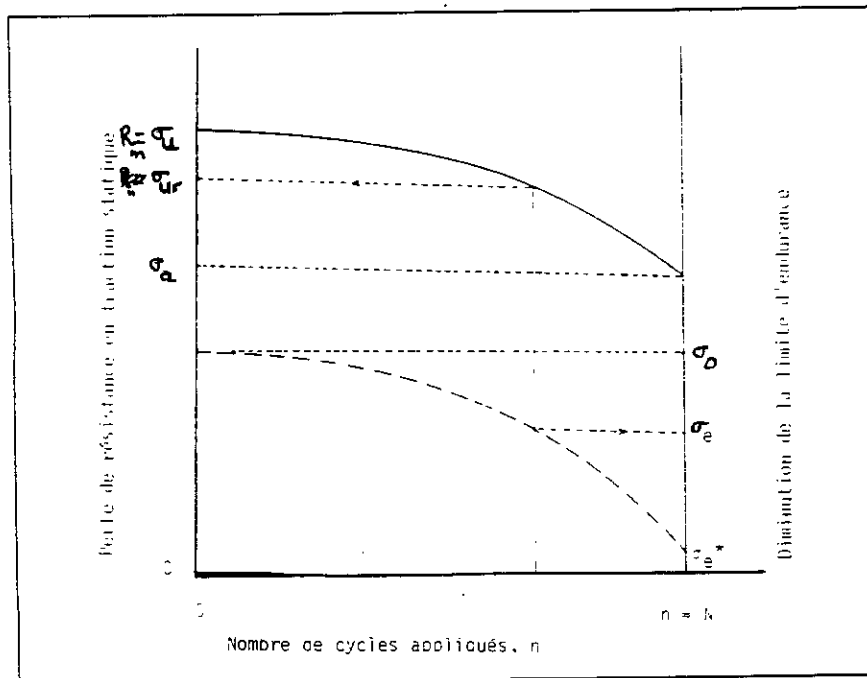
c)- Réduction de la limite d'endurance :

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

La fig (I.2) montre l'influence des sollicitations de fatigue sur la limite d'endurance et la résistance à la rupture.

d)- Accroissement de la déformation plastique:

La variation de la déformation plastique croît avec l'augmentation du nombre de cycle appliqué sous chargement cyclique élevé.



FigI.2- Influence de la fatigue sur la résistance à la rupture et la limite d'endurance.

I.3- L'essai de fatigue :

I.3.1- Définitions et symbolisation des termes utilisés en fatigue :

I.3.1.1- Contrainte nominale :

La contrainte prise en compte au cours de l'essai de fatigue, (contrainte de calcul) est une contrainte nominale. Elle est calculée par rapport à la section nette de la pièce considérée,

à l'aide des formules usuelles de la résistance des matériaux relative au domaine élastique[10].

I.3.1.2- Cycle de contrainte :

Il y a cycle de contrainte quand une contrainte d'amplitude variable dans le temps se répète périodiquement. Le plus utilisé est le cycle sinusoïdal.

La contrainte cyclique peut être considérée comme la superposition d'une contrainte statique qui est la contrainte moyenne et une contrainte purement alternée considérée comme dynamique[10].

a)- Contrainte maximale σ_{max} :

La 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} :

La plus petite valeur algébrique prise périodiquement par la contrainte.

c)- Contrainte moyenne σ_m :

La moyenne algébrique des contraintes maximale et minimale.

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$$

d)- Amplitude de contrainte σ_a :

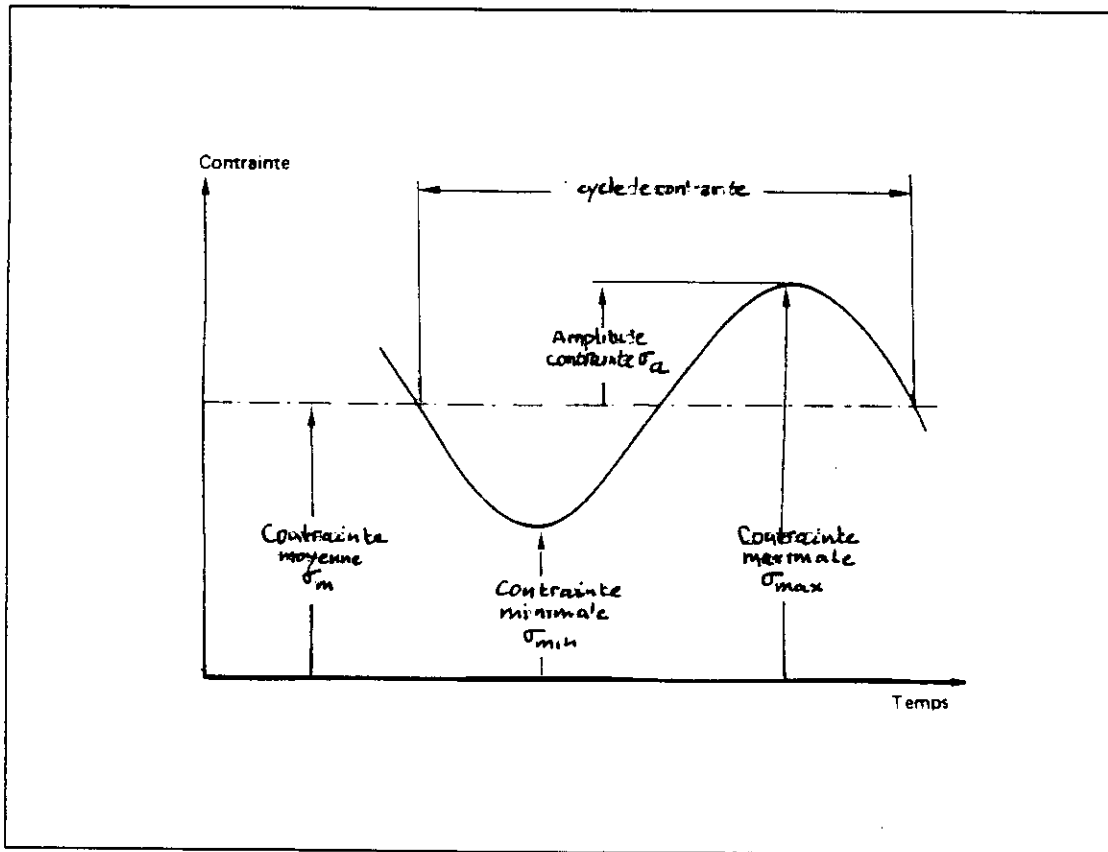
La contrainte alternée égale à la moitié de la différence algébrique entre (σ_{max}) et (σ_{min}).

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

e)- Rapport de contrainte:

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

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$



FigI.3- Cycle de contrainte.

I.3.1.3- Rapport d'endurance :

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

I.3.2- Classification des sollicitations des essais de fatigue :

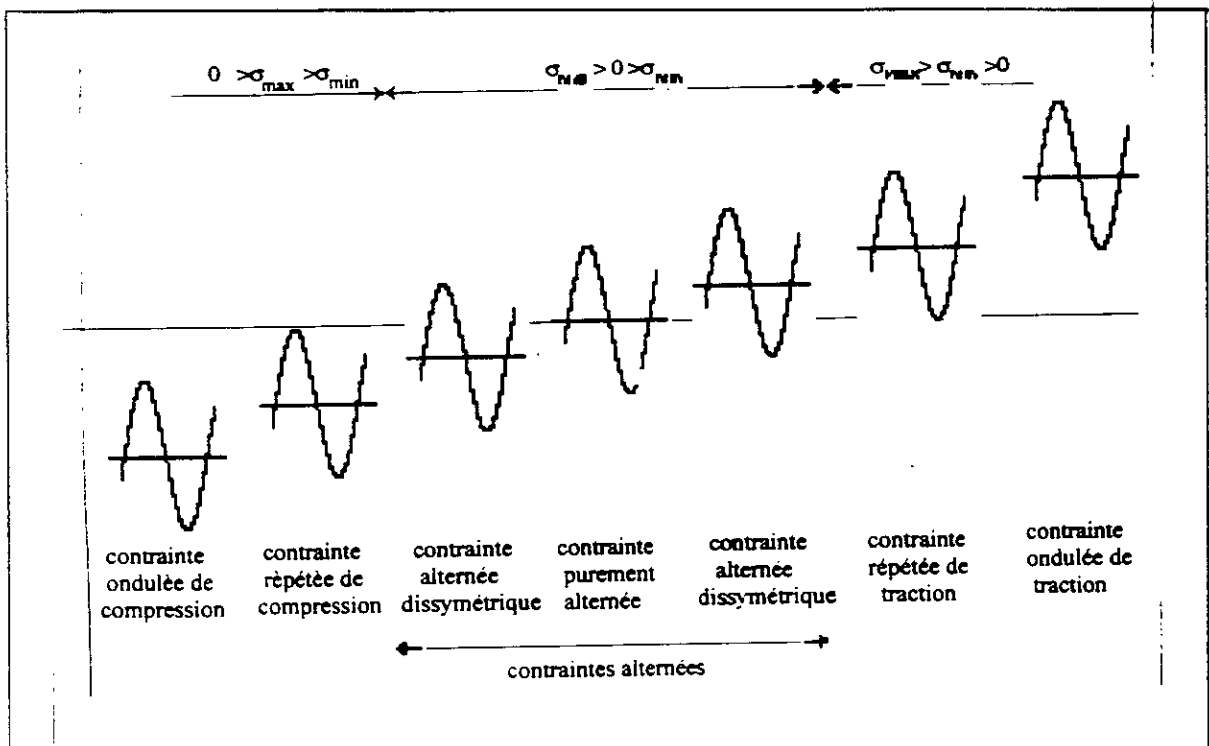
On peut distinguer deux grandes catégories d'essai de fatigue : les essais sous amplitude constante et les essais sous amplitude variable.

I.3.2.1- Essai sous amplitude constante :

Dans cette catégorie, les sollicitations de service se placent à un seul niveau d'amplitude, on peut distinguer trois cas :

- 1- Sollicitation aux efforts statiques et aux efforts variables de même nature et de même direction, dans ce cas, et quelque soit la nature des efforts agissants (traction, flexion, torsion), on peut distinguer trois sortes de sollicitations en fonction du temps.

- Efforts alternés pour ($\sigma_m < \sigma_a$), (l'effort est symétrique si ($\sigma_m=0$, $R=-1$), et est dissymétrique pour ($0 < \sigma_m < \sigma_a$, $-1 < R < 0$)).
 - Efforts répétés pour ($\sigma_m = \sigma_a$, $R=0$).
 - Efforts ondulés pour ($\sigma_m > \sigma_a$, $0 < R < 1$).
- 2- Sollicitations aux efforts statiques et variables de nature différente.
- 3- Sollicitations aux efforts variables de nature différente.

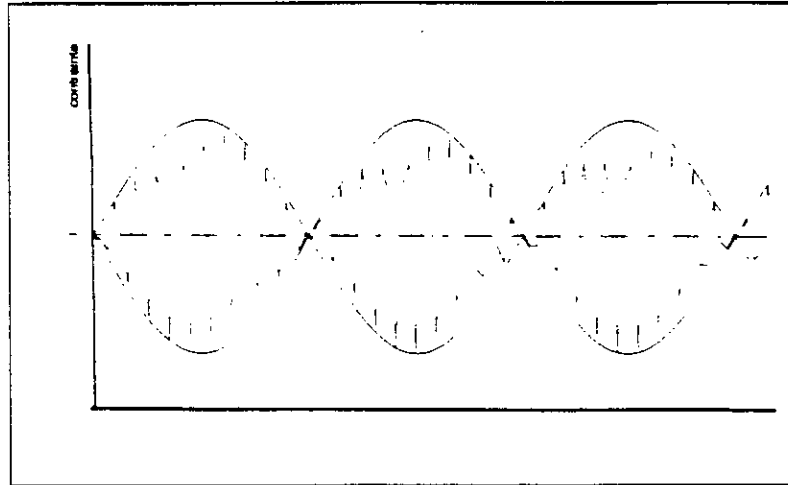


Figl.4-Types de cycles de contraintes.

I.3.2.2- Essai sous amplitude variable :

Actuellement, on utilise de plus en plus, en pratique, les résultats d'essais effectués sous programme de charge, de manière à se rapporter davantage des conditions réelles de service[7].

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



FigI.5.-Chargement avec modulation de l'amplitude.

1.3.3- Classification des modes de sollicitations :

Les sollicitations cycliques peuvent être classées selon la nature des efforts exercés par les machines sur les pièces ou les éprouvettes, on distingue ainsi :

- Les essais de flexion plane.
- Les essais de flexion rotative.
- Les essais sous efforts axiaux.
- Les essais de torsion.
- Les essais sous contrainte combinées, statique et dynamique: torsion et flexion, tension et torsion... etc.

Différentes machines d'essai permettent d'effectuer ces divers essais.

1.3.4- Les éprouvettes d'essais :

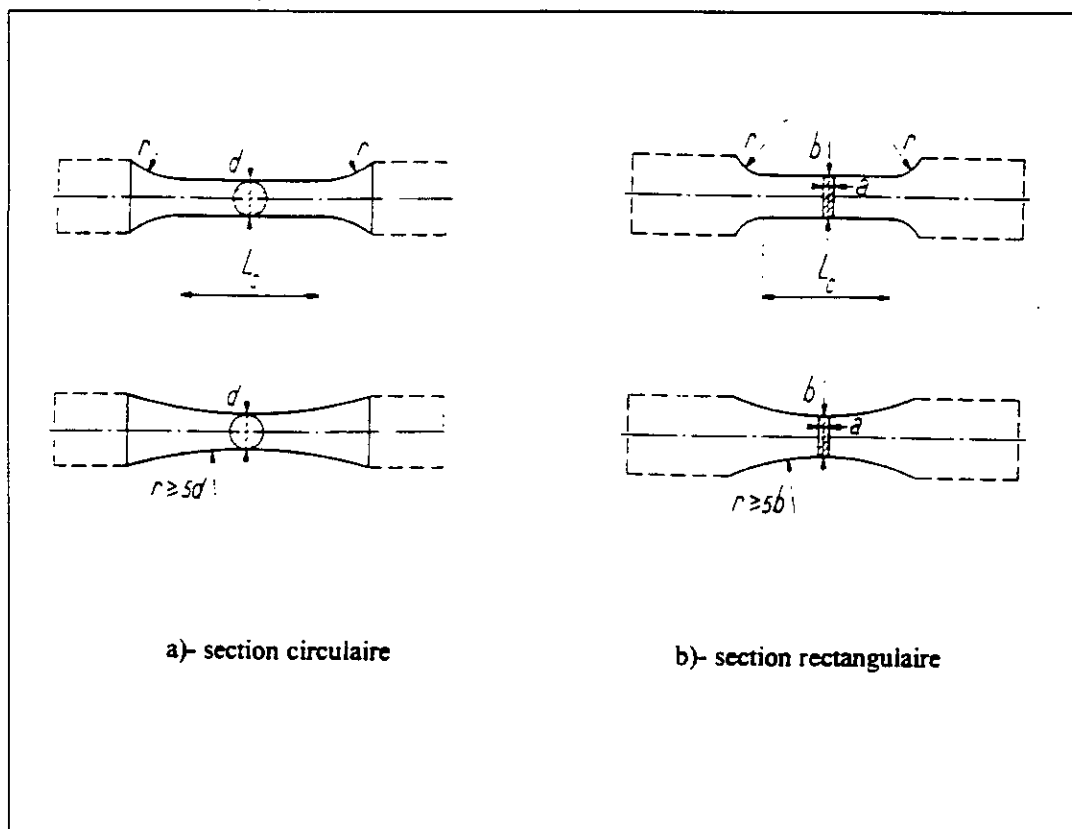
1.3.4.1- formes des éprouvettes :

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[8].

L'éprouvette peut être à :

a- section circulaire avec des congés raccordant tangentielllement entre la partie utile aux extrémités (figI.6).

b- section rectangulaire d'épaisseur uniforme sur toute la partie soumise à l'essai raccordant tangentielllement la partie soumise à l'essai aux têtes, le raccordement peut être fait avec un arc de cercle (figI.6).



FigI.6- forme des éprouvettes.

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

1.3.4.2- Dimensions des éprouvettes:

En 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[12].

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 $\pm 0.025\text{mm}$ [12].

La tolérance de forme sur la partie cylindrique soumise à l'essai ne doit pas être supérieure à $\pm 0.02\text{mm}$ [12].

1.3.5- Présentation pratique des résultats:

Il existe un certain nombre de représentations possibles des résultats obtenues au cours d'essais de fatigue, suivant l'arrangement que l'on adopte pour les paramètres intervenant dans la mesure. et qui sont [10] :

- Le temps, sous la forme du nombre de cycles N.
- Les contraintes, statiques : R_e, R_m, σ_m
dynamiques: $\sigma_{max}, \sigma_{min}, \sigma_a$

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

1.3.5.1- Courbe de Wöhler (courbe $\sigma-N$) :

La courbe de Wöhler appelée S-N (Stress-Number of cycles) permet de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans tout le domaine de fatigue

Cette courbe représente la variation d'une des contraintes précitées en fonction du nombre de cycles à rupture (reporté sur échelle logarithmique), pour tracer une telle courbe, on réalise généralement des essais à contrainte moyenne constante et on fait varier l'amplitude du cycle de contrainte appliquée.

Ainsi, à chaque pièce essayée correspond donc un point du plan (σ_a, N) et à partir d'un certain nombre d'essai à contrainte généralement décroissante, on peut tracer la courbe qui à l'allure suivante (fig1.7).

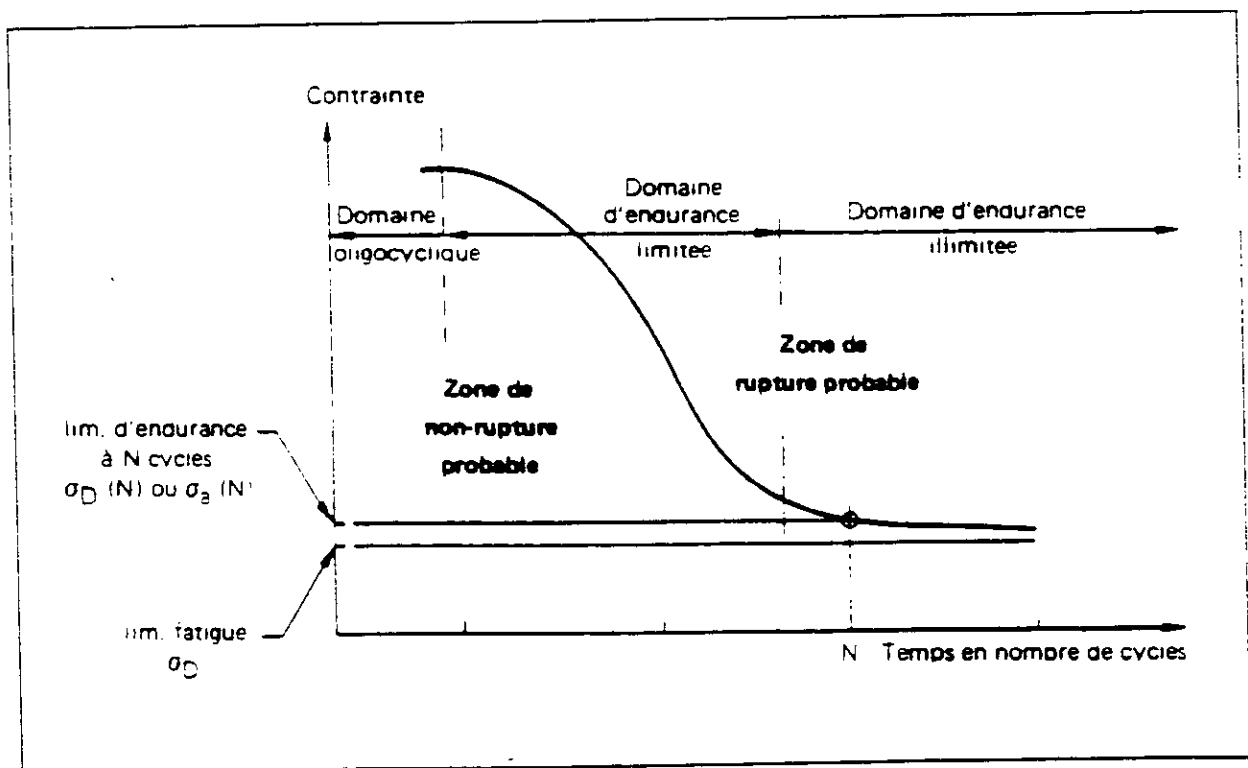


Fig1.7. Courbe de Wöhler.

Une courbe de Wöhler comprend trois domaines :

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

I.3.5.1.1- Tracé de la courbe de Wöhler - Estimation de la limite d'endurance à partir d'une formule analytique de la courbe de Wöhler :

Diverses expressions analytiques ont été proposées pour représenter la courbe de Wöhler, dans le domaine d'endurance limitée, ces équations permettent de déterminer le nombre de cycle à rupture en fonction de la contrainte, parmi celle-ci, on cite [4]:

- La formule de Weibull : $N_R = K(\sigma - \sigma_D)^n$ (I.1)

- La formule de Stromeyer : $\sigma_a = \sigma_D + (A/N)^c$ (I.2)

- La formule de Polmingreen : $\sigma_a = \sigma_D + \left(\frac{a}{(N+B)} \right)^c$ (I.3)

- La formule de Corson : $N = A \cdot \text{EXP}[-C(\sigma_a - \sigma_D)] / (\sigma_a - \sigma_D)$ (I.4)

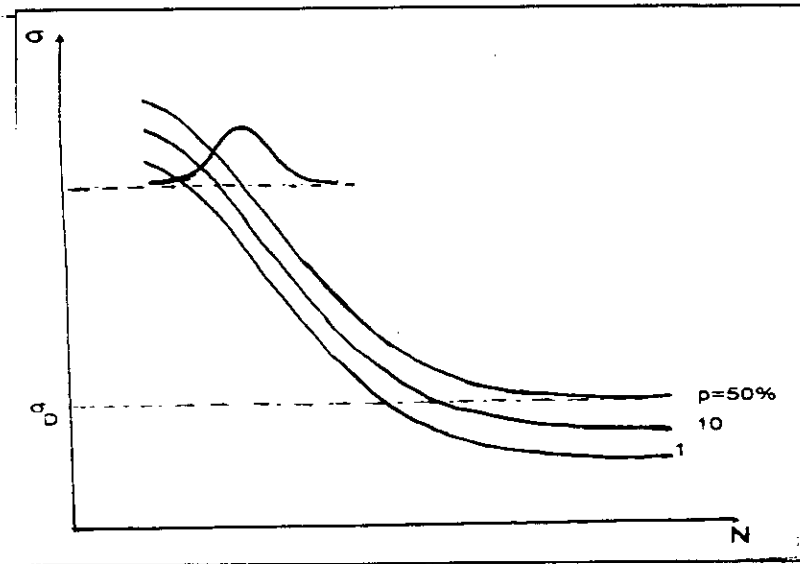
- La formule de Bastenaire : $N + B = A \cdot \text{EXP}[-c(\sigma_a - \sigma_D)] (\sigma_a - \sigma_D)$ (I.5)

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

I.3.5.2- Courbes d'équiprobabilités :

La courbe de Wöhler dont nous venons de parler était 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 [8].

Les courbes d'équiprobabilités 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'essai et du niveau de confiance accordé (figI.8) [7].



FigL.8- Courbes d'équiprobabilités.

I.3.5.3- Diagrammes d'endurances :

Pour un matériau et une éprouvette de forme donnée, l'ensemble de limites d'endurances obtenues lorsque σ_m varie peut se représenter sur un diagramme appelé diagramme d'endurances, il en existe plusieurs types dus à différents auteurs[4] :

- 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} du fonction du rapport de contrainte R_σ .
- Diagramme de Heigh donnant l'amplitude de la contrainte σ_a en fonction de la contrainte moyenne σ_m .

I-3.6- Estimation des caractéristiques de résistance et d'endurance en fatigue :

Le phénomène de dispersion des résultats d'essais de fatigue est accepté actuellement comme un fait d'expérience et comme un fait physique.

Les seules méthodes rigoureuses de détermination de la limite d'endurance font appel à des méthodes statistiques.

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

- 1- Causes internes au matériau : inclusions, hétérogénéité de structures.
- 2- Causes dues ou liées à la préparation des éprouvettes : les opérations d'usinage, les traitements thermiques.

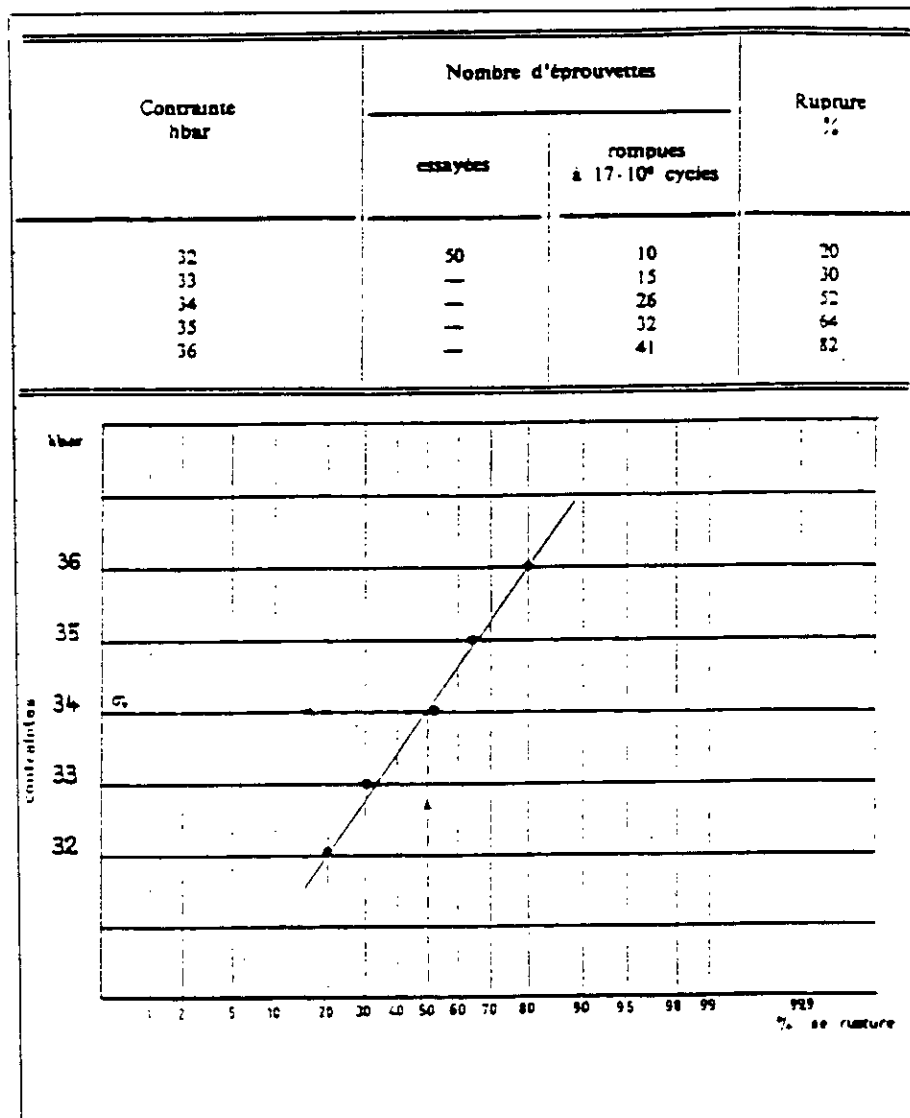
- 3- Causes extérieures à l'éprouvette : tolérance de montage sur la machine, le réglage de charge appliquée, la fréquence des cycles et la variation de la température au cours de l'essai.

Nous présentons les principales méthodes statistiques qui peuvent être utilisées pour caractériser le comportement en fatigue d'un matériau à partir de résultats d'essais.

I.3.6.1- Méthodes d'estimation de l'endurance à N cycles :

I.3.6.1.1- Méthodes des probits :

La méthode dite des probits est une méthode de calcul numérique d'estimation des paramètres d'une courbe, elle consiste dans le choix de niveaux de contrainte espacé régulièrement, de manière à encadrer la limite d'endurance présumée.



FigI.9. Estimation de la limite d'endurance par la méthode des probits.

A chaque niveau de contrainte, plusieurs éprouvettes sont utilisées, l'espacement des niveaux est choisi pour qu'ils restent dans la zone d'endurance et donnant à la fois des ruptures et des non-ruptures, pour 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 permet de déterminer la contrainte correspondant à 50% de rupture.

Cette méthode est longue, coûteuse et d'emploi délicat, on en réservera l'emploi à des études fondamentales dans lesquelles des déterminations assez précises de la résistance à la fatigue sont recherchées.

Dans les autres cas, on a intérêt à appliquer des méthodes d'application plus simples.

I.3.6.1.2- Méthode de l'essai en escalier (Stair-Case) :

Cette méthode proposée par Dixon et Mood, citée par Bathias, nécessite au moins 15 éprouvettes (20 à 30 de préférence). On choisit des niveaux de contraintes régulièrement espacés, l'espacement étant voisin de l'écart type. Ensuite, on choisit un niveau de contrainte supposé proche de la limite d'endurance pour un nombre de cycles fixé. Si l'éprouvette testée à ce niveau est rompue avant le nombre de cycles fixé, on choisit le niveau de contraintes immédiatement inférieur. Par contre, si l'éprouvette n'est pas rompue, on choisit le niveau de contrainte immédiatement supérieur, on répète la procédure jusqu'à épuisement des éprouvettes[9].

La limite d'endurance à 50% d'éprouvettes rompues est déterminée par la moyenne statistique des résultats obtenus.

Pour le calcul, on considère les résultats relatifs à l'éventualité la moins fréquente de rupture ou de non rupture[9].

La moyenne est estimée par la relation suivante :

$$\sigma_D = S_0 + d \left(A / N \pm 1 / 2 \right) \quad (I.6)$$

où :

S_0 : plus petite contrainte utilisée.

d : pas de l'échelonnement.

$$N = \sum n_i$$

$$A = \sum i \cdot n_i$$

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

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

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

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

$$S = 1.62 d \left[\frac{NB - A^2}{N^2} + 0.028 \right] \quad (I.7)$$

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

$$\frac{NB - A^2}{N^2} \geq 0.3 \quad (I.8)$$

I.3.6.1.3- Méthode d'itération :

Elle consiste à définir pour chaque essai (sauf le premier), la contrainte à appliquer en fonction du résultat obtenu à l'essai précédant mais le pas dans cette méthode est variable.

Le choix de la contrainte lors du 1^{er} essai est important, elle doit être le plus proche possible de la limite d'endurance.

I.3.6.1.4- Méthode des K éprouvettes non rompus :

Cette méthode consiste à rechercher par palier de contrainte successive et décroissante en progression arithmétique, un niveau auquel K essais donnent K non-ruptures.

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

I.3.6.2- Choix de méthode d'essai :

On distingue trois degrés différents de précision concernant l'estimation d'une résistance à la fatigue :

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

Conclusion:

L'endommagement de fatigue existe dans le domaine des petites déformations, il est essentiellement fonction du nombre de cycles de sollicitations.

L'intérêt de la notion du dommage, du point de vue de la représentation de la tenue en fatigue, peut être de servir à caractériser la capacité résiduelle à la fatigue d'un matériau après endommagement. Cette capacité résiduelle de résistance est une notion complexe puisqu'elle n'est définie que si la durée de vie résiduelle est elle-même définie pour tout programme de charge.

La détermination expérimentale des caractéristiques de fatigue nécessite d'utiliser des méthodes statistiques qui permettent d'estimer, soit la résistance à la fatigue à N cycles, soit de tracer la courbe qui relie l'amplitude de la contrainte cyclique au nombre de cycles à rupture.

Chapitre II

FACTEURS D'INFLUENCE SUR LA TENUE EN FATIGUE

Chapitre II

Facteurs d'influences sur la tenue en fatigue.

Introduction :

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

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'influence des différents facteurs sur la tenue en fatigue.

II.1- Influence de l'environnement :

II.1.1- Influence de la température :

Dans les essais de fatigue, l'influence de la température ambiante est le plus souvent négligée, elle est cependant appréciable pour les aciers[2].

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 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, on peut donc prévoir la limite d'endurance à partir des courbes de variation de la résistance à la traction en fonction de la température[10].

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.

II.1.1.1- fatigue à basse température :

Lorsque la température diminue, la résistance à la rupture augmente et la limite d'élasticité augmente plus rapidement, il en est de même de la limite d'endurance[2].

Dans le cas des pièces entaillées, il faut tenir compte de la diminution, voir de la disparition du phénomène d'adaptation à fond d'entaille, c'est ainsi qu'à basse température, la

valeur du coefficient de concentration de contrainte effectif K_f tendance à se rapprocher de la valeur du coefficient théorique de concentration de contrainte K_t [10].

II.1.1.2- Fatigue à haute température :

En règle générale, lorsque la température d'essai croît, la résistance à la rupture décroît régulièrement et la limite d'élasticité décroît plus fortement.

Au-delà d'une certaine température, on dépasse la limite d'écoulement au fluage et la résistance à la rupture décroît alors très rapidement[2].

II.1.2- Influence de la corrosion :

Heigh 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[2].

L'influence de la corrosion peut donc être envisagée de deux points de vue, selon que :

- Les efforts de fatigue s'exercent sur les pièces préalablement corrodées.
- La fatigue et la corrosion agissant simultanément.

En général, en fatigue-corrosion, la courbe de Wöhler ne présente plus d'asymptote et il n'est donc plus possible de déterminer une limite d'endurance comme c'était le cas à l'air libre[4].

II.2- Influence des facteurs métallurgiques :

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

C'est de ces facteurs que vont dépendre, d'une part, les possibilités de déformations sous efforts cycliques, ainsi que la capacité d'accommodation du métal et sa sensibilité à l'effet d'entaille, celles-ci peuvent être liées, en première approximation, aux caractéristiques mécanique, tandis-que la présence de défauts internes (inclusions) introduit des possibilités de concentration locales de contraintes qui vont diminuer l'endurance de la pièce.

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 des efforts. Les métaux doivent être d'autant plus propres que l'on cherche une résistance et une endurance plus élevées.

II.3- Influence des caractéristiques mécaniques :

Différents chercheurs, dans le domaine de fatigue des métaux, ont proposé des relations empiriques qui lient la limite d'endurance aux autres propriétés telles que : la résistance à la rupture R_m , la limite élastique R_e , la striction Z et l'allongement A .

Nous donnons ci-dessus quelques relations proposées par différents auteurs et citées par Cazaud :

$$\text{Mailander : } \sigma_D = (0.49 \pm 20\%) R_m \quad (\text{II.1})$$

$$\text{ou bien, } \sigma_D = (0.65 \pm 30\%) R_e \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Stribeck : } \sigma_D = (0.285 \pm 20\%) (R_m + R_e) \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Rogers : } \sigma_D = 0.4 R_e + 0.25 R_m \quad (\text{II.4})$$

$$\text{Houdrement : } \sigma_D = 0.25 (R_m + R_e) + 5 \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Junger : } \sigma_D = 0.2 (R_e + R_m + Z) \quad (\text{II.6})$$

$$\text{Lequis, Buchaltz et Sshultz: } \sigma_D = 0.175 (R_e + R_m - A \% + 100) \quad (\text{II.7})$$

D'autres relations citées par BATHIAS:

$$\text{Heywood: } \sigma_D = R_m/2 \quad (\text{II.8})$$

$$\sigma_D = 150 + 0.43 R_e \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Brand : } \sigma_D = 0.32 R_m + 121 \quad (\text{II.10})$$

Bathias a proposé les relations suivantes :

$$\sigma_D = 0.37 R_m + 77 \quad (\text{II.11})$$

$$\sigma_D = 0.38 R_e + 16 \quad (\text{II.12})$$

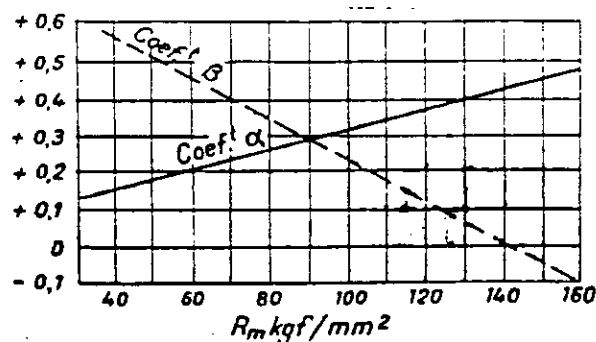
$$\sigma_D = 0.41 R_m + 2A \quad (\text{II.13})$$

$$\sigma_D = 0,39 R_m + Z \quad (\text{II.14})$$

Fry, Kessener et Oettel :

$$\sigma_D = (\alpha R_m + \beta R_e) \quad (\text{II.15})$$

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

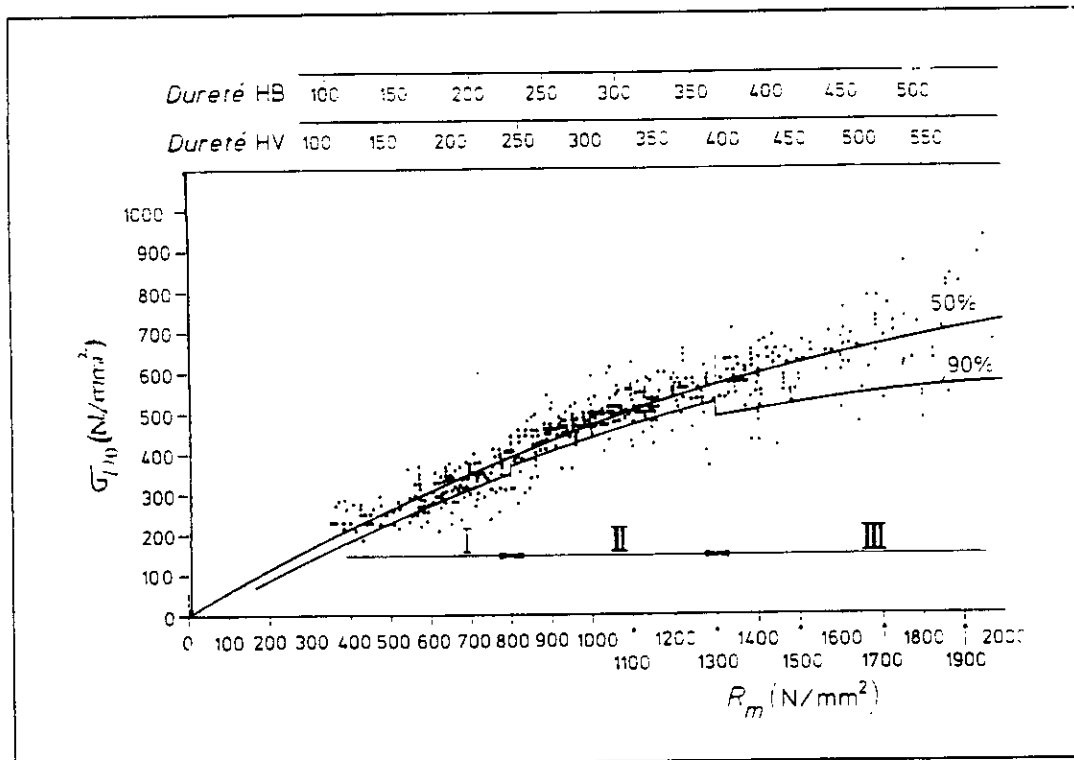


FigII.1- Facteurs α et β pour la formule de Kry.

Une autre relation proposée par Brand est donnée par :

$$\sigma_D (50\%) = R_m(0.58 - 1.1 \cdot 10^{-4} R_m) \quad (\text{II.16})$$

Cette relation résulte d'un très grand nombre d'expérience, elle donne une très bonne corrélation entre la résistance à la rupture et la limite de fatigue (figII.2).



FigII.2- Limite d'endurance σ_D en fonction de la limite à la rupture R_m .

La figure (II.2) montre que la nature des essais de fatigue est très dispersive. elle est due à plusieurs facteurs (voir chapitre 1).

II.4- Influence des conditions de sollicitation :

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

Lorsque la fréquence augmente dans des proportions importantes, on observe en règle générale une amélioration de la limite d'endurance, ce renforcement du métal aux fréquences élevées est dû à la diminution de la durée d'application de la contrainte maximale[4].

Cependant, en n'élevant pas 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.

II.4.2- Influence du type de sollicitation :

Pour une même éprouvette, essayée sous une même amplitude de contrainte périodique, à la même fréquence et à la même température, la répartition et, par suite, les gradients de contrainte à travers la section la plus chargée seront différents selon la nature des efforts appliqués.

Pour des efforts axiaux, traction ou compression, les contraintes sont uniformes dans la section, tandis qu'en flexion ou en torsion elles sont maximales en surface et nulles au centre, sur la fibre neutre, ces différences de gradient qui entraînent des variations importantes dans le volume de métal déformé conduisent à des différences de limite d'endurance σ_D qui décroît de la flexion (plane ou rotative) à la traction, compression puis à la torsion[1].

Prenant un coefficient 1 pour la flexion rotative, un certain nombre de facteurs de passage, notés K_p , ont été proposés[4] :

Flexion plane :	$K_p = 1,05$
Traction –Compression :	$K_p = 0,9$
Torsion :	$K_p = 0,6$

II.4.3- Influence des contraintes appliquées :

La limite d'endurance d'un métal n'est pas une constante, elle peut être augmentée ou diminuée sensiblement selon la manière dont les contraintes sont appliquées aux pièces en service[2].

II.4.3.1- Influence d'une sous-charge :

Si l'on soumet le matériau à des contraintes périodiques inférieures à sa limite d'endurance, on peut avoir localement des miro-déformations plastiques, qui relâcheront les concentrations de contraintes et écrouiront le matériau, le rendant apte à supporter des contraintes plus élevées : c'est l'effet de sous charge qui pour les matériaux très adaptables, permet de relever la limite d'endurance de façon sensible (10 à 20%)[1].

L'élévation de la limite d'endurance d'autant plus grande que la contrainte de sous-charge est proche de la limite de fatigue, on aurait donc intérêt à augmenter cette contrainte pour qu'elle soit à chaque instant voisine de la nouvelle limite de fatigue, on constate effectivement qu'un tel processus (coaxing) élève beaucoup la limite de fatigue[2].

II.4.3.2- Influences d'une surcharge :

L'application des contraintes qui dépassent notablement la limite d'endurance et pendant une durée d'application suffisante, on trouve ultérieurement une nouvelle limite d'endurance, plus basse que la précédente.

Cet effet est d'autant plus à craindre que le matériau est plus sensible à l'effet d'entaille.

II.4.4- Influence des contraintes résiduelles:

On peut considérer trois types de contraintes résiduelles, à savoir :

- Les contraintes du premier ordre, qui provoquent des déformations dans la pièce à l'échelle macroscopique.
- Les contraintes du second ordre, qui entraînent des déformations à l'échelle du grain.
- Les contraintes du troisième ordre, qui agissent au niveau de l'édifice cristallin.

Ces trois types de contraintes résiduelles interviennent évidemment les une sur les autres, mais ce sont surtout les contraintes du premier ordre ou macro-contrainte qui intéressent le concepteur car les deux autres n'ont qu'une influence très localisée.

Les contraintes résiduelles se superposent aux contraintes appliquées pour donner la contrainte réelle s'exerçant en un point de la pièce et en particulier de sa surface, elle donne donc une influence sur l'endurance.

L'effet de ces contraintes est favorable à la tenue en fatigue si elles ont un signe différent de la contrainte appliquée et défavorable dans le cas contraire.

II.5- Influence des conditions géométriques :

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

II.5.1- Effet d'échelle :

L'effet d'échelle doit être pris en considération pour permettre de comparer non seulement l'endurance des pièces de machines et celle des éprouvettes, qui est généralement de petites dimensions, mais aussi l'endurance des éprouvettes de sections différentes et de même forme.

A contrainte nominale égale, plus les dimensions d'une pièce croissent, plus sa résistance à la fatigue diminue.

On peut citer trois causes principales à l'effet d'échelle:

a- Causes mécaniques :

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 d'échelle en fatigue.

b- Causes statistiques :

Plus les dimensions d'une pièce augmentent, plus son volume et sa surface augmentent avec elles et ils ont statistiquement plus de chance de contenir des défauts qui se comportent comme des amorces privilégiées d'une fissure de fatigue.

c- Causes technologiques :

On sait qu'il est plus difficile de fabriquer dans de bonnes conditions les pièces de grandes dimensions.

L'application des traitements thermiques sur des grosses pièces conduit à une variation des propriétés mécaniques et de la structure du matériau lorsqu'on se déplace de la surface vers le cœur.

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

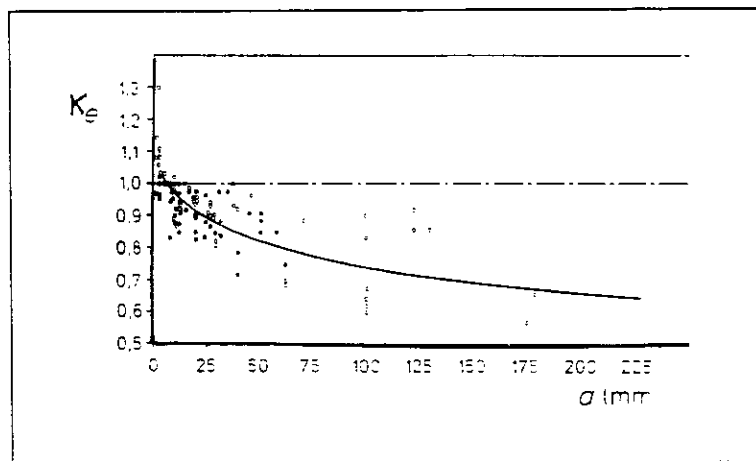
On définit le coefficient d'effet d'échelle, K_e par le rapport de la limite d'endurance σ_D d'une éprouvette de dimension donnée, à la limite d'endurance σ_{Dref} d'une éprouvette de faible diamètre choisi comme référence et usinée dans les mêmes conditions[10] :

$$K_e = \sigma_D / \sigma_{Dref} \quad (II.17)$$

II.5.1.2- Diagrammes permettant d'estimer K_e :

On trouve dans la bibliographie de nombreuses théories à propos de l'effet d'échelle en fatigue, ces théories sont établies à partir de l'étude du gradient de contrainte, à partir de l'effet de volume ou encore en mélangeant ces deux influences. Toutes ces théories, si elles rendent compte de l'un ou de l'autre aspect de l'effet d'échelle en fatigue, ne peuvent être généralisées à tous les types de problèmes que rencontre l'ingénieur du bureau d'étude lorsqu'il doit concevoir une pièce. Celui-ci en est donc réduit à utiliser des abaques tracés à partir des résultats expérimentaux et donnant l'évolution du facteur K_e pour différentes dimensions d'une pièce.

Le CETIM propose, pour des pièces non entaillées sollicitées en flexion (plane ou rotative), pour lesquelles l'effet d'échelle est très sensible, la courbe moyenne de la (figII.3), donnant K_e en fonction du diamètre de l'éprouvette.



FigII.3- Evolution de « K_e » en fonction de « 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 parfaitement polies. Cela s'explique par le fait que les fissures s'amorcent dans la majorité des cas à la surface des pièces mécaniques avant de conduire à leur rupture.

II.5.2.1- Facteur d'état de surface :

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

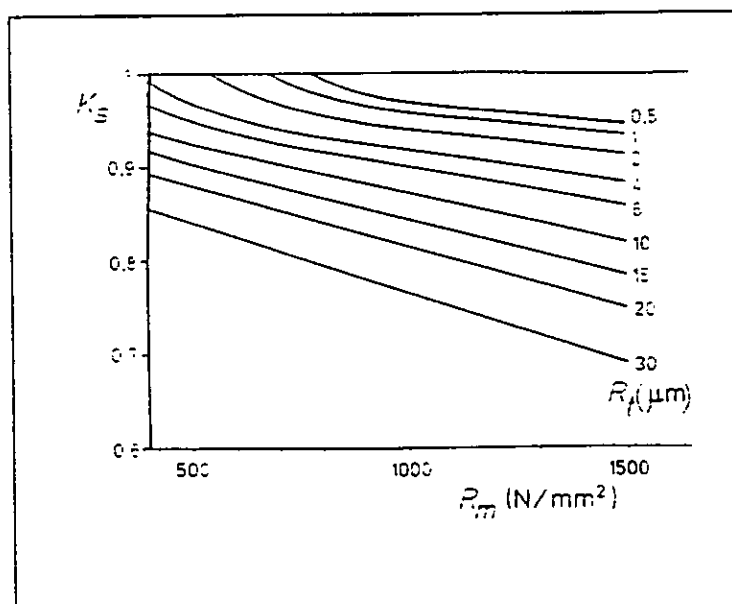
$$K_s = \frac{\sigma_D}{\sigma_{DS}} \quad (\text{II.18})$$

II.5.2.2- Abaques permettant d'estimer K_s :

On trouve dans la bibliographie un grand nombre de diagramme permettant de déterminer le facteur K_s à partir de la résistance à la traction R_m et la rugosité superficielle R_f de la pièce considérée.

Malheureusement, les diagrammes sont très diverses et conduisent pour une même pièce à des valeurs de K_s très dispersées.

Pour éviter cet écueil, un abaque (figII.4) a été tracé par le CETIM à partir de très nombreux résultats bibliographiques les plus utilisables et les plus récents.



FigII.4- Evolution de K_s , en fonction de R_m et de R_f .

II.5.3- Effet d'entaille :

La concentration de contrainte est un phénomène d'augmentation locale des contraintes dans une zone comportant une variation de la géométrie de la pièce, telles que les variations de diamètres, les congés de raccordement, les rainures de clavettes, les trous de perçage et les entailles.

Le terme entaille est utilisé pour une discontinuité imposée ou accidentelle dans la forme ou une non-homogénéité du matériau.

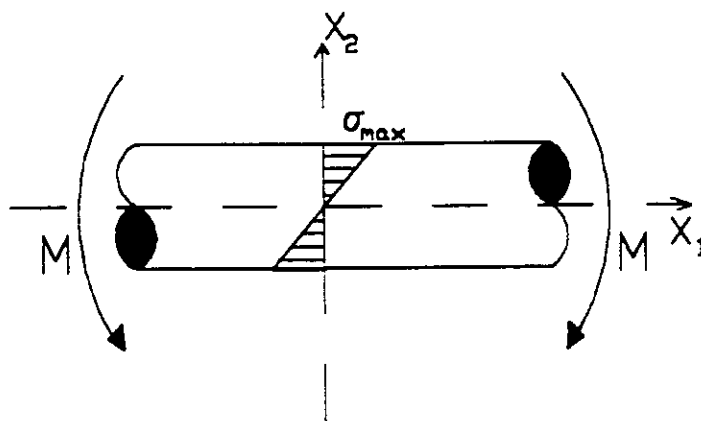
Les entailles peuvent être de trois types :

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

II.5.3.1- Concentration de contrainte :

Dans une pièce non entaillée, la répartition des contraintes se détermine par l'application des formules classiques de résistance des matériaux. On a affaire dans ce cas à des contraintes nominales, la répartition des contraintes est modifiée pour une pièce entaillée par le phénomène de concentration de contrainte, on parle dans ce cas de contraintes réelles.

Soit une pièce mécanique cylindrique de diamètre constant subissant une flexion.



FigII.5.a- Flexion d'un cylindre de diamètre constant.

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 :

$$\sigma_{\max} = \frac{M_3}{I_{33}} \cdot X_2 \quad (\text{II.19})$$

Où :

M_3 : moment de flexion.

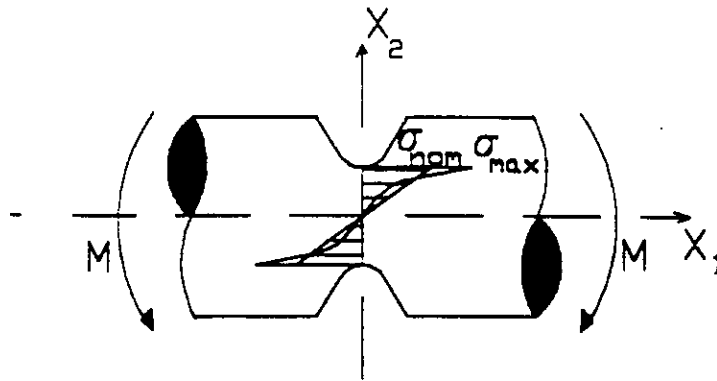
I_{33} : moment d'inertie de la section par rapport à l'axe neutre de flexion (X_3 de l'occurrence).

$$I_{33} = \frac{\pi d^4}{64} \quad (\text{II.20})$$

La valeur maximale de la contrainte est donnée sur la fibre la plus éloignée de l'axe neutre pour $x_2 = \frac{d}{2}$.

$$\sigma_{\max} = \frac{32.M}{\pi d^3} \quad (\text{II.21})$$

Soit une autre pièce mécanique cylindrique entaillée telle que le diamètre en fond d'entaille soit le même que celui de la pièce ci-dessus et subissant la même flexion.



FigII.5.b- Flexion d'un cylindre entaillé.

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

II.5.3.2- Facteur de concentration de contrainte théorique K_t :

K_t est défini comme étant le rapport de la contrainte maximale réelle à fond d'entaille à la contrainte dans la section nette.

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (\text{II.22})$$

σ_{\max} : calculée par éléments finis ou par photoélasticité.

σ_{nom} : calculée à l'aide des formules de résistance des matériaux.

Ces facteurs sont déterminés sur la base des hypothèses de la théorie de l'élasticité pour le cas des charges statiques.

L'une des formules donnant les valeurs de ces facteurs et qui a été établie à partir des travaux de Neuber et celle de Peterson, citée par Cazaud :

$$K_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{A \cdot \frac{2r}{D-d} + B \frac{2r}{d} \cdot (1 + 2r \cdot d)^2}} \quad (\text{II.23})$$

Où :

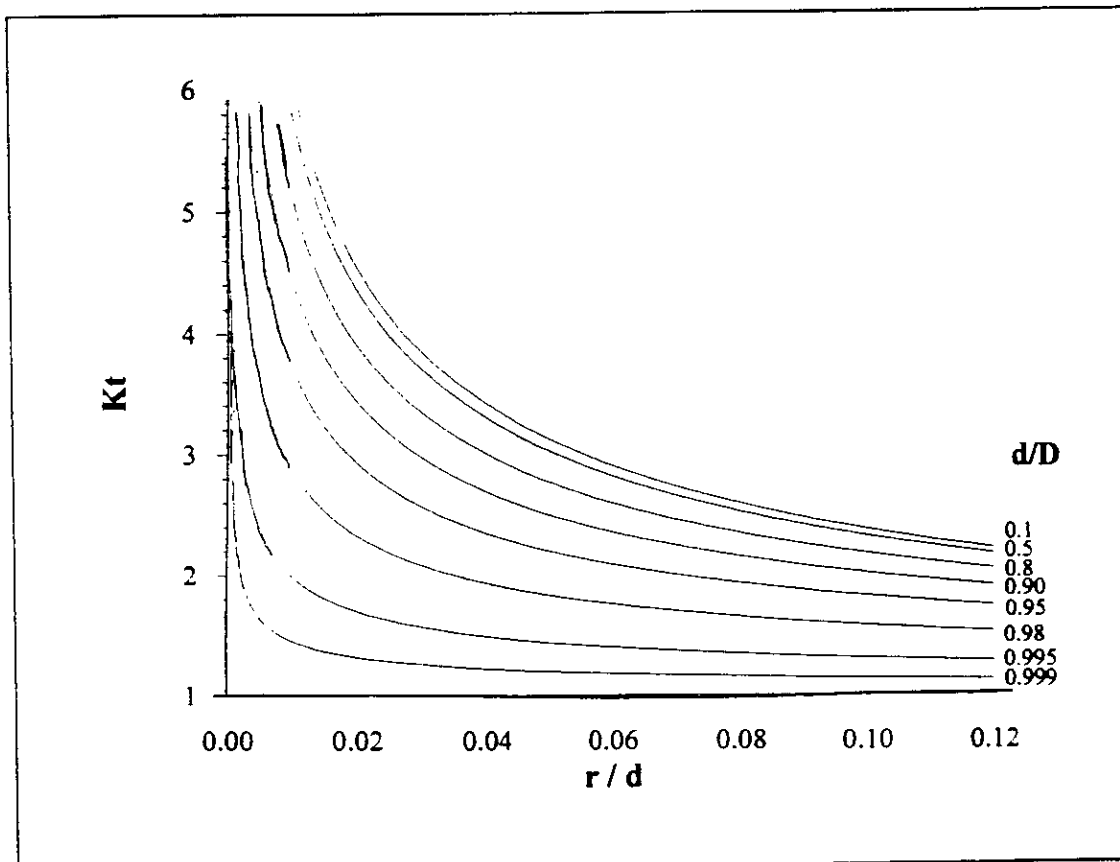
D : diamètre ou largeur extérieure de la pièce.

d : diamètre ou largeur à fond d'entaille.

r : rayon à fond d'entaille.

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

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.



FigII.6 - Abaque donnant K_t en fonction de r/d et d/D .

II.5.3.2- Facteur de concentration des contraintes en fatigue K_f (facteur de concentration effectif) :

K_f est défini comme étant le rapport de la limite d'endurance d'une pièce lisse σ_D à la limite d'endurance d'une pièce entaillée σ_{DN} , à même section de travail :

$$K_f = \frac{\sigma_D}{\sigma_{DN}} \quad (\text{II.24})$$

K_f est un coefficient expérimental déterminé à partir d'essais d'endurance.

Le coefficient K_f est dans la plupart des cas inférieur au coefficient théorique K_t en raison de l'adaptation statique du métal, et tend vers K_t pour les aciers à très haute limite d'élasticité.

L'expérience a montré que la limite d'endurance diminue en présence d'une entaille mais cette diminution est d'autant plus faible que le matériau a une grande capacité d'adaptation.

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

Pour traduire la sensibilité d'un matériau à l'entaille en fatigue par rapport au cas statique ou théorique, Thum[9] a défini un facteur dit : de sensibilité à l'effet d'entaille, par la relation suivante :

$$q_1 = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (\text{II.25})$$

Une autre relation a été ensuite définie par Yen et Dolan [9] :

$$q_2 = \frac{K_f}{K_t} \quad (\text{II.26})$$

qui est maintenant préférée parce qu'elle donne une meilleure corrélation dans l'établissement des courbes, $q=f(r)$.

Ces définitions nécessitent des études expérimentales avec un certain nombre d'éprouvettes lisses et entaillées.

Une autre définition a été proposée par Pluvinage [9] basée sur la contrainte locale :

$$q_3 = \frac{\sigma_1}{\sigma_{\max(r,\psi)}} \quad (\text{II.27})$$

Où :

σ_1 : contrainte locale, elle correspond à la limite élastique.

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

Plusieurs relations empiriques du facteur de sensibilité en fonction des propriétés mécaniques et géométriques des pièces ont été établies, la plus connue est celle de Neuber[13], elle est de la forme :

$$q_1 = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho}{r}}} \quad (\text{II.28})$$

où :

ρ est une constante du matériau appelée, constante de Neuber.

Neuber a relié cette constante à la grosseur du grain des aciers, mais plus tard, Kuhn et Hardrath [9] l'ont relié à la limite de rupture des aciers, cette relation est donnée sous forme d'une courbe dans la (figII.7).

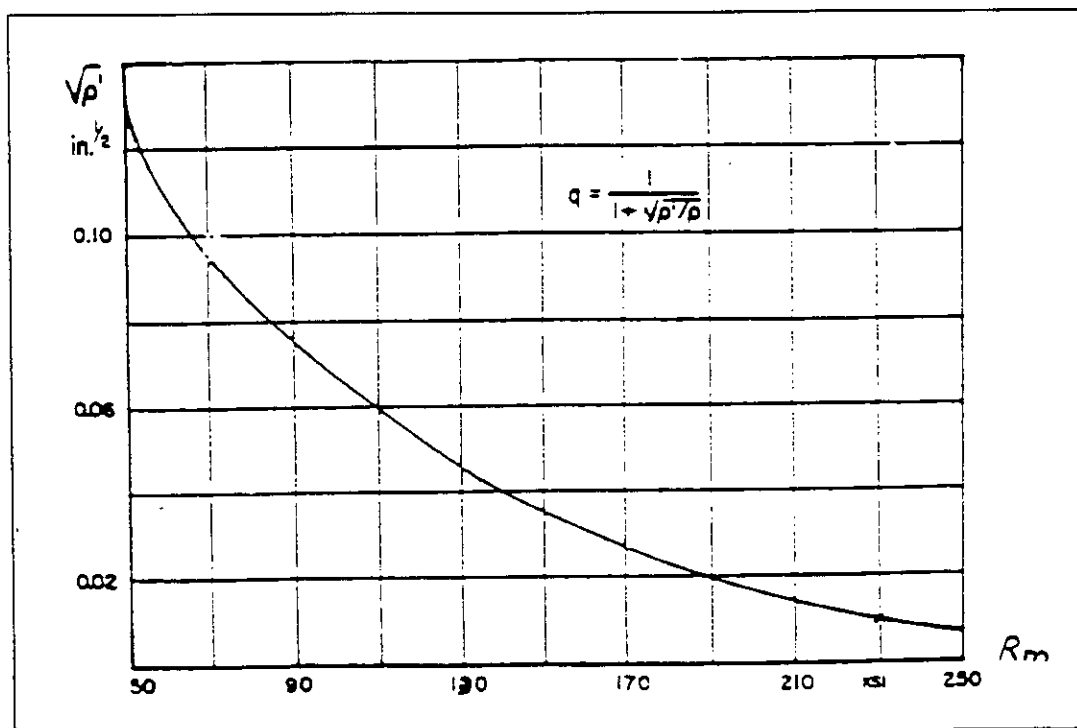
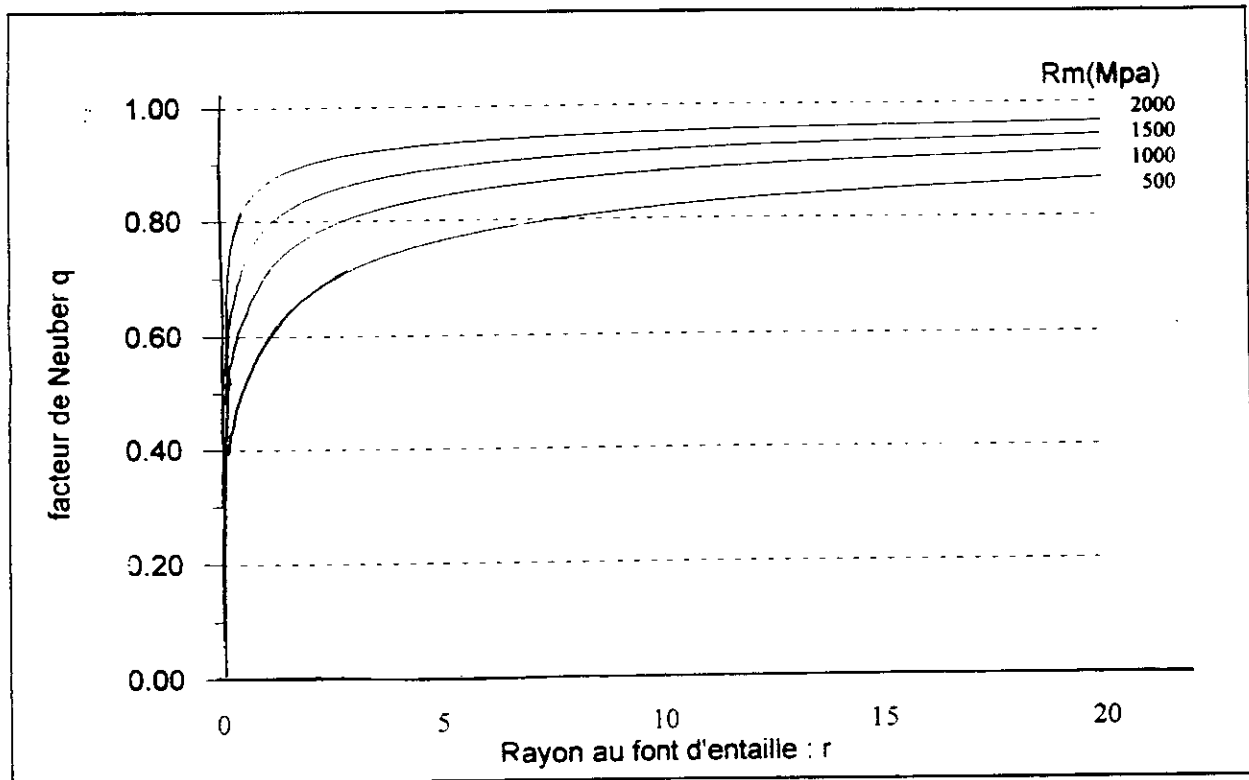


Fig II.7- Constante de Neuber en fonction de la résistance à la rupture.

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.8).



FigII.8- 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 :

$$q_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{r}\right)^{1/2}} \quad (\text{II.29})$$

Où :

a : constante.

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

$$q_{2H} = \frac{1}{1 + \frac{a}{(br)^{1/2}}} \quad (\text{II.30})$$

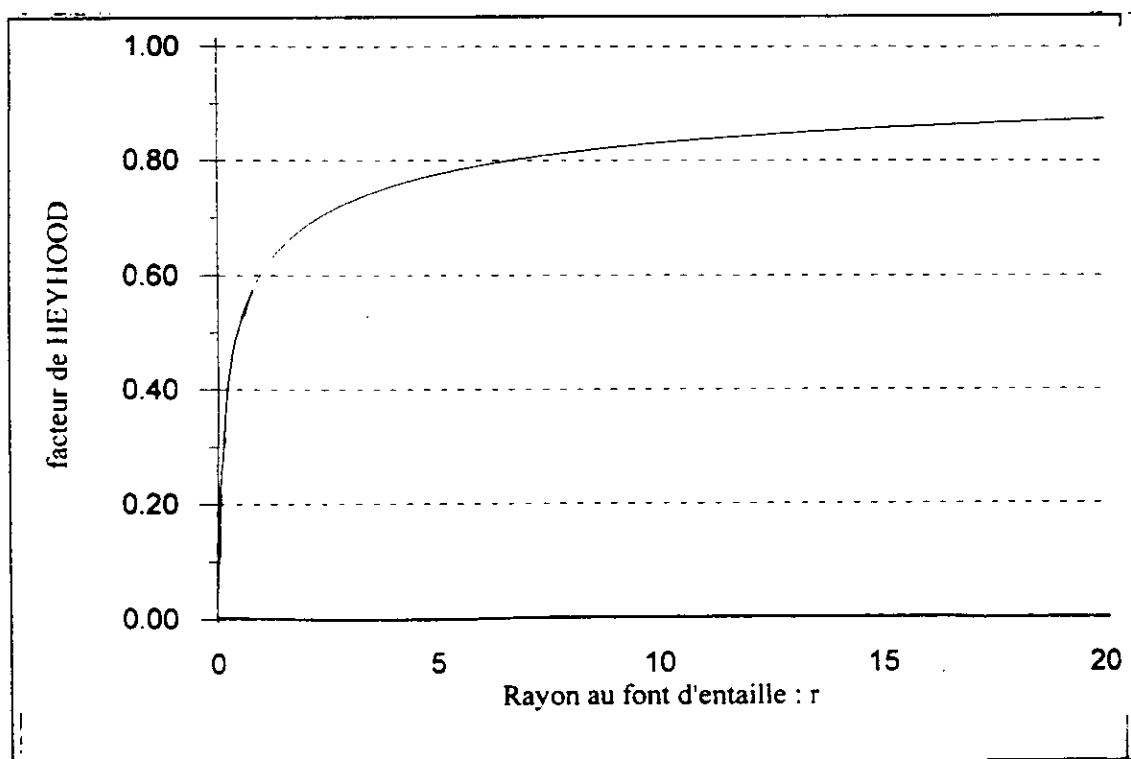
Où :

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 (FigII.9).



FigII.9- 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.

La géométrie où plutôt les variations de la géométrie des pièces mécaniques, telles que les variations de diamètres, les entailles... ont une influence importante sur la tenue en fatigue.

La concentration de contrainte dans les zones comportant des modifications géométriques provoque un dépassement localisé de la limite élastique.

Chapitre III

ETUDE THEORIQUE DU PHENOMENE DE SURCHARGE

Chapitre III

Etude théorique du phénomène de surcharge.

Introduction :

En pratique, les éléments structuraux sont presque inévitablement sollicités à différents niveaux de chargement. Il importe donc de savoir comment évoluera 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.

Comme il existe une multitude de combinaison de niveaux de contraintes, les résultats des essais effectués en laboratoire suivant un programme particulier de chargement ne permettent pas de procéder à des applications généralisées.

Des théories du dommage cumulatif en fatigue sont donc nécessaire pour évaluer la durée de vie du matériau.

III.1- Dommage cumulatif :

III.1.1- Evolution du dommage :

Une définition logique du dommage au cours du processus de fatigue doit se baser un ou plusieurs paramètres physiquement quantifiables. Le dommage peut alors être relié étroitement aux paramètres déjà mentionnés (Voir chapitre I).

Le processus d'endommagement peut être représenté schématiquement à 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 » : évolution linéaire.
- b- Processus « B » : évolution non linéaire.

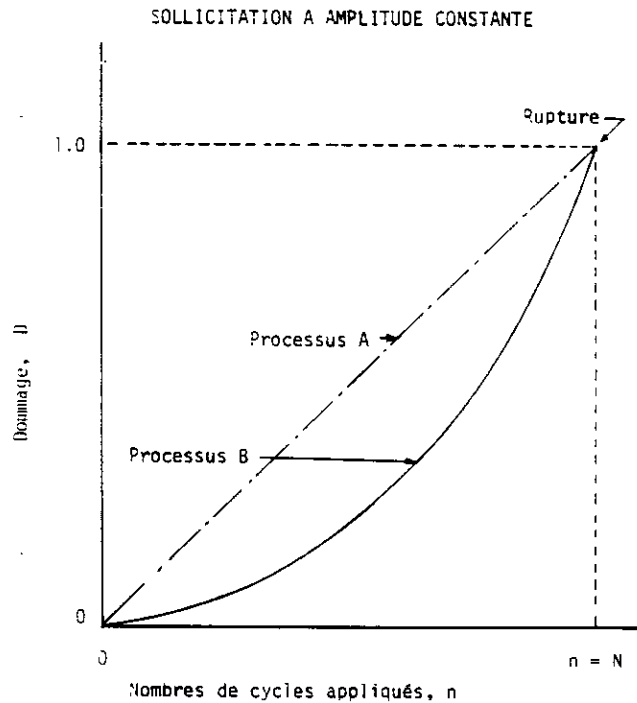


Fig III.1- Evolution du dommage.

III.1.1.1- Evolution linéaire :

Les essais en laboratoires ont d'abord consisté à exercer sur les pièces et structures mécaniques des sollicitations le plus souvent sinusoïdales et à amplitude constante.

A ce type de simulation est liée la notion d'endommagement linéaire exprimé par Palmgren en 1924, et reprise par Miner qui a proposé d'exprimer l'endommagement partiel D_i par n_i cycles d'amplitude constante σ_i sous la forme : [4]

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (\text{III.1})$$

Où :

N_i est le nombre de cycles d'amplitude σ_i qui provoquent 50% de rupture.

Cette expression s'appuie en tout premier lieu sur la connaissance de la courbe de Wöhler.

III.1.1.2- Evolution non linéaire :

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

III.1.1.2.1- Loi de miner modifiée :

Une première idée a consisté à modifier l'expression analytique de la théorie linéaire. L'expression du dommage D_i résultant de n_i cycles de niveau σ_i , dite loi de Miner modifiée, devient alors : [4]

$$D_i = \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^x \quad (\text{III.2})$$

avec : $x > 1$

III.1.1.2.2- Théorie de Marco et Starkey :

Marco et Starkey proposent une théorie dépendante des contraintes dans laquelle l'endommagement sous un niveau σ_i est donné par la forme : [4]

$$D_i = \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^{x_i} \quad (\text{III.3})$$

Où l'exposant x_i est variable suivant le niveau σ_i .

III.1.1.2.3- Théorie de Shanley :

Shanley adopte l'approche par contrainte équivalente et utilise comme fonction d'endommagement la fonction : [4]

$$D_i = c \left[(\sigma_i^b)^k \right] n_i \quad (\text{III.4})$$

Cette équation donne le dommage D_i résultant de n_i cycles de la contrainte d'amplitude σ_i . Shanley utilise la courbe de Wöhler conventionnelle (σ_i - N_i) d'équation :

$$N_i = \frac{1}{c \cdot \sigma_i^b} \quad (\text{III.5})$$

ce qui fixe les paramètres c et b , ($K=c \cdot b > 1$).

III.1.1.2.4- Théorie de Corten-Dolan :

Corten et Dolan proposent une théorie qui tient compte de l'interaction entre les différents niveaux, ils prennent comme courbe d'endommagement la courbe d'équation : [4]

$$D = r_i \cdot x^a \quad (\text{III.6})$$

r_i est en général choisi comme étant fonction du niveau de contrainte σ_i tandis que a est une constante.

III.1.2- Cumul du dommage :

Les effets de cumulation linéaire ou non linéaire sont d'une grande importance en fatigue.

III.1.2.1- Cumul linéaire :

La cumulation linéaire s'applique pour une évolution du dommage linéaire ou non linéaire à condition que la courbe du dommage soit unique.

Il existe donc deux moyens de définir une loi d'accroissement du dommage contenant la règle de cumul linéaire.

III.1.2.1.1- Loi de Miner :

La loi de Miner exprime que la rupture de la pièce intervient lorsque l'histoire des sollicitations qu'elle a subies a entraîné des endommagements partiels tels que leur somme atteint la valeur 1 :

$$\sum_{i=1}^p \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (\text{III.7})$$

Cette représentation du dommage suppose que si une fraction ($n_1/N_1 = Z$) de la durée de vie est accomplie à un certain niveau d'amplitude de la contrainte σ_1 , l'endurance restante à un autre niveau σ_2 est :

$$\frac{n_2}{N_2} = 1 - Z \quad (\text{III.8})$$

III.1.2.1.2- Loi de Miner modifié :

Cette loi suppose que la cumulation est linéaire, elle n'est valable que si la courbe du dommage est unique donc ne dépend pas de la contrainte appliquée et de l'histoire du chargement.

III.1.2.2- Cumul non linéaire :

L'effet de cumul non linéaire existe si les courbes d'évolution du dommage en fonction de la fraction de vie β dépendent du chargement imposé.

III.2- Lacunes de la règle linéaire :

Dans les expériences destinées à vérifier la validité de la théorie de Miner, il est rare que les rapports des cycles s'ajoutent pour donner exactement l'unité, en fait, les sommes des fractions de vie s'étendant de 0.5 à 2.5. [5]

En général, l'ordre d'application se manifeste de la façon suivante : [1]

$$(i) \quad \text{pour les niveaux croissants : } \sum \beta_i > 1 \quad (\text{III.9})$$

$$(ii) \quad \text{Pour les niveaux décroissants : } \sum \beta_i < 1 \quad (\text{III.10})$$

L'effet de l'ordre d'application sur la sommation des fractions de vie β_i est plus marqué pour un nombre élevé de cycles que pour un faible nombre de cycles. [1]

Malgré les lacunes de la règle linéaire, elle a reçu beaucoup d'attention à cause de sa simplicité.

Etude critique de la loi de Miner :

Les critiques les plus importants à retenir concernant la loi de l'endommagement linéaire sont les suivantes :

1- La notion d'endommagement partiel par cycle fait que l'on calcule cycle par cycle, et en totale indépendance l'un de l'autre, les endommagements partiels que l'on additionne. Or, il existe une interdépendance entre les cycles, qui se présente soit sous forme d'une adaptation du métal, soit sous forme d'accélération de la dégradation en son sein.

2- L'utilisation de la courbe de Wöhler conduit à ignorer tous les cycles d'amplitude inférieure à la limite d'endurance dont l'endommagement partiel, selon la définition de Miner, est nul ($N_i = \infty$), cela conduit dans le cas des sollicitations aléatoires à surestimer la durée de vie du matériau.

III.3- Domaine de validité de la loi de Miner :

ETUDE THEORIQUE :

On trouve dans la littérature que la loi de Miner donne de meilleurs résultats pour les régions à faible nombre de cycles, (hauts niveaux de contraintes). [4]

Dans cette étude, on cherche à vérifier le résultat donné ci-dessus mathématiquement et voir s'il existe d'autres facteurs qui influent sur la validité de la de Miner.

Pour se faire, nous considérons deux niveaux de contrainte croissants (surcharge), σ_1 et σ_2 à qui correspond des nombres de cycles à rupture, N_1 et N_2 respectivement.

On suppose que l'évolution du dommage est linéaire pour la simplification de l'étude.

Soit n_1 le nombre de cycles au premier niveau de chargement. On veut déterminer le nombre de cycles n_2 réelle qui donne un dommage total D_2 .

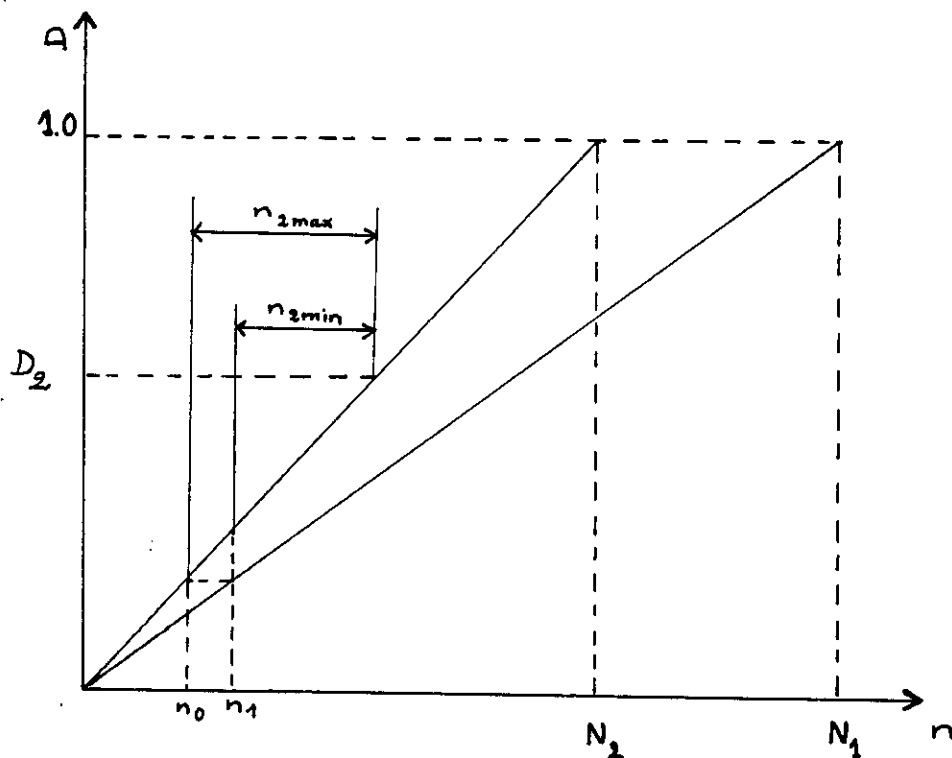
Encadrement de la valeur n_2 réelle :

Sachant que la loi de Miner donne une valeur du nombre de cycles n_2 plus élevée que la valeur réelle, on la note n_{2max} , elle est donnée par la relation suivante :

$$n_{2max} = N_2 \left(D_2 - \frac{n_1}{N_1} \right) \quad (\text{III.11})$$

$$\Rightarrow n_{2max} = N_2 \cdot D_2 - n_0 \quad (\text{III.12})$$

n_0 est le nombre de cycles correspond au chargement d'amplitude de contrainte σ_2 au même état du dommage (σ_1, n_1) (Fig III.2).



FigIII.2- Encadrement de la valeur $n_{2réel}$.

Soit:

$$n_{2\min} = N_2 \cdot D_2 - n_1 \quad (\text{III.13})$$

$n_{2\min}$ est la valeur du nombre de cycles minimale.

La valeur du nombre de cycle réel (n_2) est située entre la valeur maximale et minimale.

Dans ce qui suit, on cherche à donner les conditions pour lesquelles n_2 réel tend vers sa valeur maximale (donnée par la loi de Miner), c-à-d :

$$|n_2 - n_{2\max}| < \varepsilon \quad (\text{III.14})$$

ε est un nombre réel.

Le domaine [$n_{2\min}$, $n_{2\max}$] est convexe, donc on peut écrire que :

$$n_{2\text{réel}} = n_2 = \alpha \cdot n_{2\min} + (1 - \alpha) \cdot n_{2\max} \quad (\text{III.15})$$

tel que :

$$0 < \alpha < 1$$

On a alors :

$$|n_2 - n_{2\max}| = |\alpha(n_{2\min} - n_{2\max})| \quad (\text{III.16})$$

$$\Rightarrow |n_2 - n_{2\max}| = \alpha |n_1 - n_0| \quad (\text{III.17})$$

de (III.14) et (III.17), on trouve que :

$$n_1 \left(1 - \frac{N_2}{N_1} \right) < \frac{\varepsilon}{\alpha} \quad (\text{III.18})$$

$$\text{Soit la fonction, } F(n_1, N_1, N_2) = n_1(1 - N_2/N_1) = \varepsilon/\alpha \quad (\text{III.19})$$

Cette fonction nous renseigne sur les différents facteurs qui influent sur la validité de la théorie de Miner, et qui sont n_1 , N_1 et N_2 .

- n_1 et N_1 varient dans le même sens que ε .
- Lorsque N_2 est proche de N_1 , ε décroît.

Enfin, on peut dire que la validité de la loi de Miner est conditionnée par la variation de trois paramètres : n_1 , N_1 et N_2 .

- *Lorsqu'on exerce un niveau de contrainte élevé (N_1 petit), on obtient une bonne approximation avec la loi de Miner, (condition trouvée expérimentalement, [4]).*

- *En exerçant un deuxième niveau de contrainte proche du précédent, la loi de Miner reste valable.*
- *Si le nombre de cycle n_1 appliqué au premier niveau de chargement est petit, la loi de Miner donne de meilleurs résultats.*

Conclusion :

Du fait que la quantité de dommage ne peut être établie sur une base physique correcte, l'évaluation de dommage cumulé doit reposer sur une base théorique avec, cependant, des paramètres mesurables.

La règle linéaire est de loin la méthode la plus connue et la plus utilisée, nous sommes arrivés à déterminer mathématiquement son domaine d'application.

Pour la simplification de l'étude, nous avons considéré que l'évolution est linéaire, la même procédure peut être établie dans le cas où l'évolution est non linéaire (loi de Miner modifiée).

Dans le cas d'une sous charge, on arrive aux mêmes conditions citées ci-dessus.

Chapitre IV

ETUDE DE L'ENDOMMAGEMENT SOUS SURCHARGE

Chapitre IV

Etude expérimentale de l'endommagement sous surcharge

Introduction :

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 microfissures jusqu'à la rupture finale.

Le plus souvent, une pièce ou une structure est soumise en service à des sollicitations qui ne gardent pas une même valeur d'amplitude mais qui peuvent avoir différents niveaux de contraintes, au cours de sa durée de vie.

Par ailleurs, les exigences techniques et les impératifs économiques conduisent de plus en plus; les constructeurs à adapter le mieux possible la forme et les dimensions des pièces et des structures aux sollicitations auxquelles elles seront effectivement soumises en service.

IV.1- Dispositifs expérimentaux :

Pour l'étude expérimentale, nous avons utilisé les machines suivantes :

IV.1.1- Machine de flexion rotative :

Nous avons utilisé une machine de flexion rotative, de type « Shenck » de capacité 650 M.Pa. La machine est composée de deux parties principales :

- Une partie tournante : composée de deux fourreaux, à l'intérieur de chaque fourreau est monté une pince qui permet le serrage de l'éprouvette lors du montage. Sur chaque fourreau sont montés deux roulements rotules à deux rangées de billes. L'un des fourreaux est relié à un moteur électrique, tournant à 2760 tr/min par l'intermédiaire d'un accouplement élastique. Un compte tour permet d'afficher le nombre de cycle est relié au moteur.

- Une partie de chargement : composée principalement d'un levier sur lequel peut glisser une masse dont le déplacement est mesuré grâce à une aiguille coulissante le long d'une règle

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

Le levier peut être entré en contact avec une coupe circuit, lors de la rupture de l'éprouvette.

IV.1.1.1- Mode de sollicitation de l'éprouvette :

La sollicitation sur la machine de flexion rotative « Schenck », est modélisée par une flexion à quatre points d'une poutre, voir fig(IV.1). De cette manière, l'éprouvette est soumise à un moment fléchissant constant sur la partie centrale de l'éprouvette.

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 (46 Hz) pendant toute la durée de l'essai, la contrainte de la fibre externe est donnée par la formule de Navier :

$$\sigma = \frac{M}{\frac{I}{v}} \quad (\text{IV.1})$$

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, $v=d/2$

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

tel que :

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

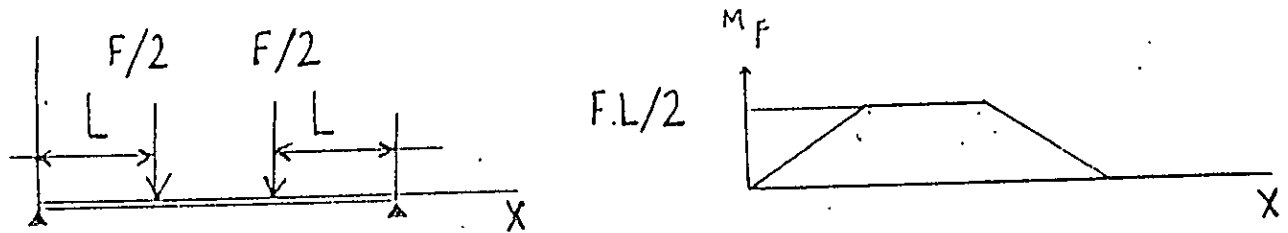


Fig IV.1- Sollicitation de l'éprouvette.

IV.1.2- Machine de traction.

La machine de traction statique est de type « Stinco », de capacité maximale égale à 100 K.N. 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 comprend deux mors 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 cadran gradué.

IV.1.2.1- Chargement de l'éprouvette :

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

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{S} \tag{IV.3}$$

Où :

P : charge appliquée.

S : section nette de l'éprouvette.

σ_{nom} : contrainte nominale.

IV.2- Les éprouvettes d'essais :

Nous avons utilisé des éprouvettes cylindriques comprenant des entailles situées au milieu de leurs parties utiles. Elles sont constituées de deux parties :

- Partie utile : elle a un diamètre 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.

- Partie de fixation : elle est composée de deux têtes de serrage ayant un diamètre égal à 12 ± 0.1 mm compatible avec les fourreaux de la machine.

Les deux parties de l'éprouvette sont reliées entre elles tangentiellement de façon à diminuer les concentrations de contraintes. Les éprouvettes ont été préparées à partir d'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 une longueur de la partie utile égale à 30 ± 0.1 mm.

IV.2.1- Usinage des éprouvettes :

Les éprouvettes en acier doux ont été réalisées sur tour et usinées à partir d'une barre de 16 mm de diamètre. L'opération d'usinage comprend trois étapes :

- Ebauche : pour se rapprocher du diamètre voulu, nous avons réalisé l'opération d'ébauche en trois passes de 1 mm.

- Semi-finition : cette opération a été faite en une seule passe de profondeur égale à 0.7 mm 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 0.3 mm.

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

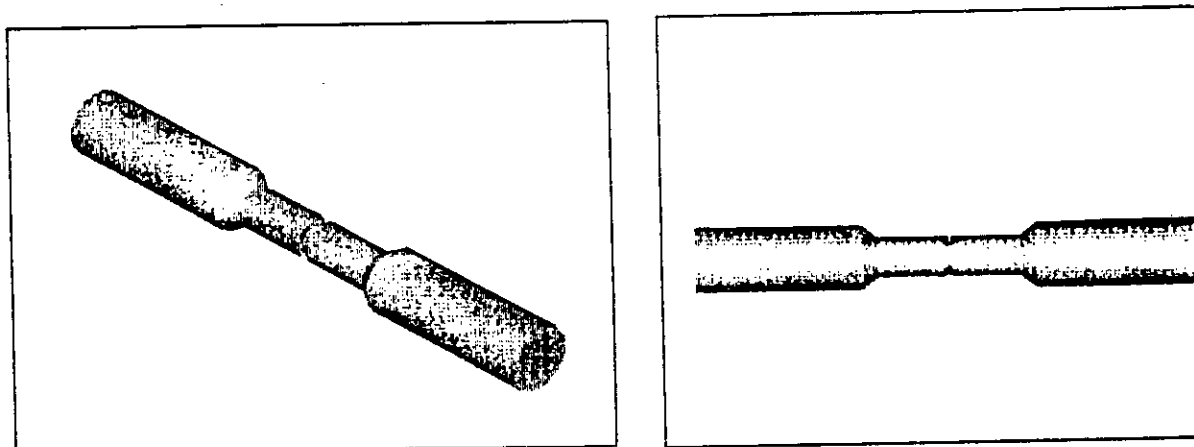


Fig IV.2- Formes des éprouvettes.

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

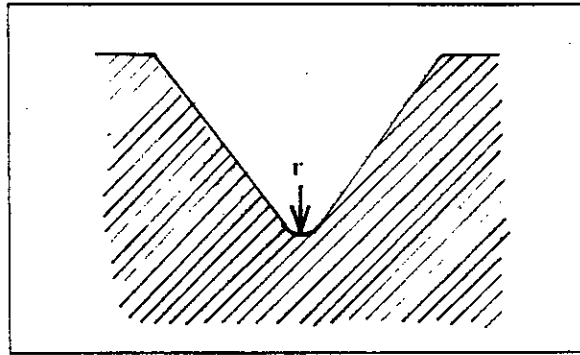


Fig IV.3- Forme des entailles.

IV.3- Méthode d'essai :

Détermination de la charge à rupture des éprouvettes :

Le premier but de cette étude est de déterminer la charge à rupture des éprouvettes par des essais de traction statique. Nous avons utilisé deux types d'éprouvettes, lisses et entaillées afin de déduire l'effet d'entaille sur la résistance en traction statique.

Les éprouvettes lisses utilisées ont un diamètre $d = 8$ mm.

Résultats d'essais :

N° d'essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte nominale (M.Pa)
Essai 1	26.9	535
Essai 2	27.2	541
Essai 3	27	537

**Tableau IV.1- Résistance à la rupture des éprouvettes lisses.
($d = 8$ mm)**

Nous constatons d'après la table précédente que les valeurs obtenues ne sont pas dispersées. La valeur moyenne suivante représente la résistance à la rupture de l'acier considéré.

$$R_m = 538 \text{ M.Pa}$$

Pour les éprouvettes entaillées de diamètre $d = 8 \text{ mm}$ au niveau de l'entaille, Nous avons obtenu les résultats suivants :

Résultats d'essais :

N° d'essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte nominale (M.Pa)
Essai 1	39	776
Essai 2	38.9	774
Essai 3	38.8	772

**Tableau IV.2- Résistance à la rupture des éprouvettes entaillées.
($d = 8 \text{ mm}$)**

La résistance à la rupture est obtenue en faisant la moyenne des valeurs obtenues expérimentalement :

$$R_m = 774 \text{ M.Pa}$$

Nous constatons que la résistance à la rupture des éprouvettes entaillées est plus élevée que celle des éprouvettes lisses à même section de travail.

Le pourcentage d'augmentation de résistance à la rupture en présence d'une entaille est de 44 %.

Cette augmentation est due à la concentration de contrainte au niveau de l'entaille.

Sollicitations de fatigue :

Le deuxième groupe d'éprouvettes (éprouvettes entaillées « $d = 8 \text{ mm}$ »), ont subi des sollicitations cycliques sur la machine de flexion rotative. On a fait varier le nombre de cycles (deux valeurs).

Pour chaque valeur du nombre de cycle n , quelques éprouvettes sont soumises à un chargement constant σ_c , tel que la contrainte appliquée est choisie égale à la moitié de la limite élastique du matériau. Les autres éprouvettes sont soumises à un chargement variable, on a choisi deux niveaux de contraintes croissants σ_1, σ_2 . La première contrainte σ_1 égale à la moitié de la limite élastique du matériau, la deuxième contrainte σ_2 égale à $1.4 \sigma_1$.

Dans la littérature, on a trouvé que les limites élastiques des aciers doux sont souvent comprises entre 260 et 340 M.Pa. Vu que la limite élastique du métal étudié est inconnue, on a adopté une limite égale à 280 M.Pa.

Après fatigue, on soumet les éprouvettes à des essais de traction statique menés jusqu'à rupture, on détermine ensuite la résistance à la rupture des éprouvettes endommagées en faisant la moyenne des résultats obtenus expérimentalement.

Pour $n = 10^{+5}$ cycles :

Chargement sans surcharge : $\sigma_c = 140 \text{ M.Pa}$

Résultats d'essais :

N° d'essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte nominale (M.Pa)
Essai 1	35.4	704
Essai 2	34.9	694
Essai 3	35.3	702
Essai 4	35.8	712
Essai 5	35.7	710
Essai 6	35.6	708
Essai 7	35.1	698

**Tableau IV.3- Résistance à la rupture des éprouvettes endommagées.
(chargement constant, $n = 10^{+5}$ cycles).**

La résistance à la rupture est :

$$R_m = 704 \text{ M.Pa}$$

Chargement avec surcharge : $\sigma_1 = 140 \text{ M.Pa}$ et $n_1 = 5. 10^{+4}$

$\sigma_2 = 196 \text{ M.Pa}$ et $n_2 = 5. 10^{+4}$

Résultats d'essais :

N° d'essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte nominale (M.Pa)
Essai 1	33.1	659
Essai 2	32.6	649
Essai 3	32.9	655
Essai 4	32.6	649
Essai 5	33.4	664
Essai 6	33.7	671
Essai 7	33.5	666

**Tableau IV.4- Résistance à la rupture des éprouvettes endommagées.
(chargement variable « $\sigma_2 = 1.4 \sigma_1$ », $n = 10^{+5}$ cycles).**

La résistance à la rupture est :

$$R_m = 659 \text{ M.Pa}$$

La résistance à la rupture des éprouvettes sollicitées à un chargement variable est inférieure à celle sollicitées à un chargement constant.

Les pourcentages de pertes de résistance des éprouvettes sont donnés sur le tableau suivant :

% des pertes de résistance	Chargement sans surcharge	Chargement avec surcharge
Eprouvettes non endommagées	9 %	15 %
Chargement constant	-----	6.4 %

Tableau IV.5- Pourcentages des pertes de résistance($n = 10^{+5}$ cycles).

Pour $n = 2 \cdot 10^{+5}$ cycles.

Chargement sans surcharge : $\sigma_c = 140$ M.Pa

Résultats d'essais :

N° d'essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte nominale (M.Pa)
Essai 1	31.1	619
Essai 2	30.8	613
Essai 3	31.1	619
Essai 4	29.9	595
Essai 5	30.6	609
Essai 6	30.4	605
Essai 7	32	637

Tableau IV.6- Résistance à la rupture des éprouvettes endommagées (chargement constant, $n=2 \cdot 10^{+5}$ cycles).

La résistance à la rupture est :

$$R_m = 614 \text{ M.Pa}$$

Chargement avec surcharge : $\sigma_1 = 140 \text{ M.Pa}$ et $n_1 = 10^{+5}$
 $\sigma_2 = 196 \text{ M.Pa}$ et $n_2 = 10^{+5}$

Résultats d'essais :

N° d'essai	Charge de rupture (KN)	Contrainte nominale (M.Pa)
Essai 1	26.9	535
Essai 2	27.4	545
Essai 3	28.2	561
Essai 4	28.1	559
Essai 5	26.7	531
Essai 6	27.7	551

**Tableau IV.7- Résistance à la rupture des éprouvettes endommagées.
 (chargement variable « $\sigma_2 = 1.4 \sigma_1$ », $n = 2. 10^{+5}$ cycles).**

La résistance à la rupture est :

$$R_m = 547 \text{ M.Pa}$$

La résistance à la rupture des éprouvettes sollicitées à un chargement variable est inférieure à celle sollicitées à un chargement sans surcharge.

Les pourcentages des pertes de résistance des éprouvettes sont donnés sur le tableau suivant :

% des pertes de résistance	Chargement sans surcharge	Chargement avec surcharge
Eprouvettes non endommagées	20.7 %	29.3 %
Chargement constant	-----	10.9 %

Tableau IV.8- Pourcentages des pertes de résistance($n = 2 \cdot 10^5$ cycles).

Comparons maintenant les différentes pertes pour les deux valeurs du nombre de cycles, on constate que la perte est importante dans le cas où le nombre de cycles est grand.

Dans ce qui suit, on cherche à vérifier le résultat trouvé au chapitre III, (eq III.18). Prenant comme variable, le nombre de cycles n_1 appliqué au premier niveaux de chargement.

Définissant, dans notre étude, le dommage D comme étant la perte de résistance en traction statique (voir I.2.5).

Soit :

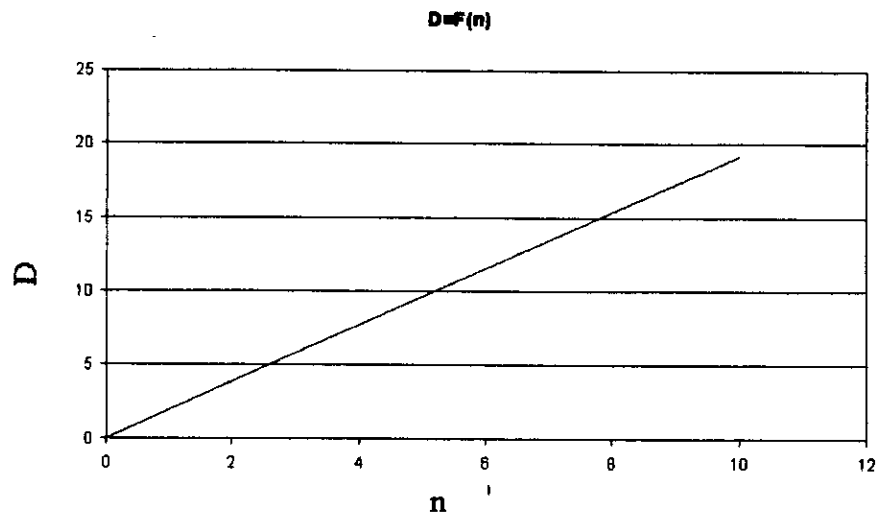
D = 0 pour le matériau vierge.

D = 1 à la rupture.

Supposons que l'évolution du dommage est linéaire en fonction du nombre de cycle.
 $D = F(n) = A.n$, A est la pente de droite.

Nombre de cycle n_1	Dommage
$5 \cdot 10^4$	0.09
10^5	0.21

Tableau IV.9- Variation de dommage D en fonction du nombre de cycle n.



Graphe IV.1- $D = F(n) = A \cdot n$

L'équation de la droite est :

$$D = 9.6 \cdot 10^{-7} \cdot n$$

Pour $D = 1$, $N_1 \approx 10^{+6}$ cycles.

Utilisant l'équation donnée au chapitre III (III.11), après calcul, on trouve :

Pour $n_1 = n_2 = 5 \cdot 10^{+4}$

$$n_{2\max} = N_2 (0.099)$$

Pour $n_1 = n_2 = 10^{+5}$

$$n_{2\max} = N_2 (0.19)$$

Utilisant l'équation donnée au chapitre III (III.14) :

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= n_{2\max} - n_{2\text{réel}} && \text{avec } n_{2\text{réel}} = 5 \cdot 10^{+4} \\ \varepsilon_2 &= n_{2\max} - n_{2\text{réel}} && \text{avec } n_{2\text{réel}} = 10^{+5} \end{aligned}$$

On trouve que :

$$\varepsilon_2 \approx 2 \cdot \varepsilon_1$$

Lorsque le nombre de cycle, n_1 diminue, l'écart maximum ε diminue, et la règle linéaire donne de meilleurs résultats.

Ce résultat a été discuté au chapitre III. Il a été déterminé théoriquement, validé expérimentalement dans ce chapitre.

Interprétation et conclusion :

Lorsque des éprouvettes entaillées sont soumises à des essais de traction statique, on observe une amélioration de la résistance. Ce fait s'explique par l'écroutissage dans le cas d'un matériau écroutissable.

En calculant le coefficient de concentration de contrainte K_t par la formule (II.23), avec:

$D = 10 \text{ mm}$, $r = 0.5 \text{ mm}$, $d = 8 \text{ mm}$. On trouve :

$$K_t = 2.98$$

Le métal sollicité en fatigue perd de la résistance, cette perte est due à l'endommagement par fatigue.

La perte de résistance est plus élevée en augmentant le nombre de cycle et en appliquant un chargement avec surcharge.

On a trouvé aussi que la règle linéaire donne de meilleurs résultats en diminuant le nombre de cycle au premier chargement.

Sous un chargement cyclique constant ou variable, il y a du dommage qui s'accumule.

Les résultats obtenus montrent que l'effet de surcharge est considérable lorsque le nombre de cycle au premier niveau de chargement augmente.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la quantification expérimentale de l'endommagement sous surcharge par des essais de traction statique afin de déterminer la perte de résistance à la rupture.

Après rappel des généralités sur l'endommagement et les facteurs qui influent sur l'endurance des pièces métalliques, nous avons procédé à l'étude théorique et expérimentale du phénomène de surcharge.

Une étude théorique consiste à déterminer mathématiquement le domaine de validité de la règle linéaire.

Dans l'étude expérimentale ; les essais ont été effectués sur des éprouvettes entaillées. On a utilisé un acier doux de résistance à la rupture $R_m = 538 \text{ M.Pa}$. La méthode consiste à comparer la résistance à la rupture des éprouvettes ayant subies un chargement avec surcharge en flexion rotative à celles des éprouvettes non surchargées.

Le but de cette étude est de valider le résultat obtenu théoriquement au chapitre III, prenant comme variable le nombre de cycles au premier niveau de chargement.

Les résultats obtenus montrent que le métal perd de la résistance sous un chargement avec ou sans surcharge, cette perte est due à l'endommagement par fatigue. Cette perte est plus importante en appliquant un chargement avec surcharge.

On a trouvé que l'écart maximum est faible en diminuant le nombre de cycle au premier chargement donc la règle linéaire est valable pour les faibles nombres de cycles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **C. Bathias, J.P. Bailon**, « La fatigue des matériaux et des structures », Presse de l'université de Montréal, 1980.
- [2] **Cazaud**, « La fatigue des métaux », Edition Dunod, 1969.
- [3] **J. Lemaitre, J.-L. Chaboche**, « Mécanique des matériaux solides », Edition Dunod, 1988.
- [4] **A. Brand**, « Données technologiques sur la fatigue », Rapport de CETIM, 1989.
- [5] **C.-W. Richards**, « La science des matériaux de l'ingénieur », Edition Dunod, 1965.
- [6] **S.-P. Timoshenco**, « Résistance des matériaux, tome2 », Edition Dunod, 1968.
- [7] **A. Serray**, « Quantification de l'endommagement par fatigue en flexion rotative par la traction », Pfe, ENP 1999.
- [8] **T. Boudaoud, A. Chabane**, « Etude expérimentale du phénomène de fatigue sous entaille en flexion rotative », Pfe, ENP 1997.
- [9] **Dj. Mecheri**, « Etude du facteur de sensibilité à l'entaille par un modèle utilisant le gradient de contrainte : Etude expérimentale et numérique », Thèse de Magister, ENP 1996.
- [10] **A. Brand**, « Fatigue des alliages ferreux », Technique de l'ingénieur, B5050.
- [11] **J. Lu, H.-P. Lieurade**, « Concentration de contraintes », Technique de l'ingénieur, BM5040.

[12] Normes françaises des produits sidérurgiques- NF A 03-401-1986.

[13] Neuber, N.-E. Frost, K. Marchet, «Metal fatigue », Edition Oxford univerity, 1952.