

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE
MINISTERE DDE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BATNA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

MEMOIRE PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MAGISTERE

EN

MECANIQUE

Option : CONSTRUCTION MECANIQUE

PAR

YOUSFI HICHEM

**Etude expérimentale sur la Fatigue des Matériaux en
Flexion Rotative**

Soutenu le :

Devant le jury :

Benbouta Rachid
Brioua Mourad
Zidani Kamel
Zedira Hamma

Professeur
Professeur
Professeur
Professeur

Université de Batna
Université de Batna
Université de Batna
Université de Khenchela

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur

Année Universitaire 2013/2014

Remerciements

Je tiens à remercier :

*En premier lieu, le Bon **Dieu**, le Tout Puissant, de m'avoir donné autant de courage, de patience et de volonté pour atteindre ce but.*

*Mon encadreur le professeur **Pr. Brioua Mourad**, je lui exprime ici mon attachement et ma profonde reconnaissance de m'avoir proposé un sujet de recherche très riche puis de m'avoir laissé aller jusqu'au bout de mes idées.*

*Mes remerciements s'adressent ensuite aux membres du jury. Je remercie vivement le **Pr. Zidani Kamal** pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence de ce jury.*

*J'exprime mes remerciements au **Pr. Benbouta Rachid**, **Pr. Zedira Hamma**, qui ont bien voulu accepter d'être les examinateurs de ce travail.*

Je désire exprimer toute ma gratitude à mes enseignants leur aide scientifique et soutien moral tout au long de cette thèse.

Je tiens à remercier mes collègues et mes amis au centre universitaire de Batna et les responsables de la poste graduation de l'université de Batna.

Je remercie chaque auteur dont travail est cité dans la partie bibliographique de cette thèse.

Je tiens à remercier ma famille, pour le soutien continu qu'elle m'a apporté tout au long de ces années d'études.

Je n'oublierai pas non plus tous ceux qui, de près ou de loin, par leur compétence, leur aide technique et leurs conseils ont contribué à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Tables des matières

Introduction générale1

CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIE.

I. Etude bibliographie.....4

I.1 Etat de l'art4

I.2.la fatigue des matériaux (fatigue et endurance).....9

I.2.1 Esquisse sur le phénomène de la fatigue des matériaux9

I.2.2 Présentation.....9

I.2.3 Historique9

I.2.4 Définition d'un phénomène de fatigue11

I.3 Diagrammes représentatifs12

I.3.1- Courbe de Wöhler.....12

I.3.2- Courbes d'équiprobabilité de rupture13

I.3.3- Diagramme de Haigh14

I.3.4- Diagramme de Goodman15

I.3.5- Diagramme de Rôs.....16

I.3.6- Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers17

I.4- Représentation mathématique de la courbe de Wöhler17

I.5- Relation entre l'endurance et les caractéristiques mécaniques (cas des aciers)18

I.6- Phase de propagation d'une fissure en fatigue20

I.6.1- L'initiation (ou amorçage) de la fissure20

I.6.2- La propagation stable21

I.6.3- La propagation rapide.....21

I.7. Fissuration par fatigue.....21

I.7.1. Courbes de propagation des fissures.....	21
1.7.2. Expression de la vitesse de fissuration.....	22
I.8- Faciès caractéristiques des ruptures par fatigue.....	23
I.8.1- Faciès de fatigue à l'examen optique.....	24
I.8.2- Faciès de fatigue à l'examen microscopique.....	24
I.9- Facteurs de l'endurance des pièces	27
I.9.1- Facteurs métallurgiques	27
I.9.2- Facteurs géométriques.....	27
I.9.3- Facteurs de surfaces.....	27
I.9.4- Facteurs de sollicitation	27
I.9.5- Facteur de l'environnement	29

CHAPITRE II. METHODE D'ESSAIS POUR L'ESTIMATION DE LA LIMITE D'ENDURANCE

II.1. Introduction.....	30
II.2. Nature et aspect de la dispersion des résultats d'essais de fatigue.....	31
II.3. Méthodes d'estimation approchée.....	33
II.3.1. Méthode de reclassement des données.....	33
II.3.1.1. Principe.....	33
II.3.1.2. Condition d'exécution de la méthode.....	33
II.3.1.3. Validité de la méthode.....	34
II.3.2. Méthode des K éprouvette non-rompues	34
II.3.2.1. Condition d'exécution de la méthode.....	34
II.3.2.2. Validité de la méthode.....	34
II.4. Méthode d'estimation de la limite d'endurance à N cycles de précision moyenne ou de bonne qualité.....	35
II.4.1. Méthode des "Probits"	35

II.4.1.1. Principe.....	36
II.4.1.2. Condition d'exécution de la méthode.....	36
II.4.1.3. Validité de la méthode.....	36
II.4.2. Méthode de l'escalier.....	37
II.4.2.1. Règle d'exécution de la méthode de l'escalier	37
II.4.2.2. Utilisation des résultats.....	38
II.4.2.3. Précision de m et s	40
II.4.2.4. Remarque sur l'application pratique de la méthode de l'escalier.....	40
II.4.3. Méthode d'itération.....	41
II.4.3.1. Principe.....	41
II.4.3.2. Condition d'exécution de la méthode.....	41
II.4.3.2. Validité de la méthode.....	42
II.5. Estimation de s.....	42
II.6. Conclusion.....	42
CHAPITRE III. CHOIX DE L'ACIER ET DISPOSITIFS D'ESSAIS	
III.1 Propriétés et domaine d'utilisation (application).....	44
III.2 Composition chimique de l'acier.....	44
III.2.1 Moyen de détection.....	44
III.2.2 Composition chimique.....	44
III.3 Caractérisation mécaniques.....	45
III.3.1 Les essais de traction.....	45
III.3.2Eprouvette.....	45
III.3. 3 Résultats des essais.....	45
III.4 Machine d'essai de fatigue.....	47
III.4.1 Description de la machine.....	48

III.4.2. Instructions.....	49
III.5. Eprouvette d'essai.....	49
III.5.1. Forme.....	50
III.5.2. Dimensions.....	50
III.5.3. Usinage des éprouvettes.....	50
III.6. Contrainte maximale de flexion.....	51

CHAPITER IV RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRITATION

IV.1. Lot no : 01.....	54
IV.2. Lot no : 02.....	55
IV.3. Lot no : 03.....	57
IV.4. Recherche de la durée de vie.....	59
IV.5. Analyse de défaillance	62
IV.5.1 L'enquête préliminaire	62
IV.5.2. Analyse morphologique de la pièce défaillante	62
IV.5.3. Examen complémentaire en laboratoire.....	63
IV.6. Etude micrographique et analyse morphologique	64
IV.6.1 Interprétation sur quelques éprouvettes rompues lors des essais de fatigue....	65
IV.6.2 Commentaires	67
IV.6.2.1 Éprouvette N°1, 2, 3.....	67
IV.6.2.2 Éprouvette N°4, 5, 6	67
IV.6.2.3 Éprouvette N°7, 8, 9	67
Conclusion générale.....	68
Référence Bibliographie.....	70

Tables des matières

Notations principales

Symbole	Désignation
σ_m	la contrainte moyenne
E	Module d'élasticité ou module d'Young
F	Force
I	Moment d'inertie
M_f	Moment de flexion
N	Nombre de cycles à rupture
R_e	Limite d'élasticité
R_m	Résistance à la traction
R_σ	Rapport de contrainte
S	Ecart-type empirique
σ_a	Amplitude de la contrainte alternée
σ_{\max}	Contrainte maximale
σ_{\min}	Contrainte minimale
σ_D	Limite de fatigue
$\sigma_{D(N)}$	Limite d'endurance à N cycles
P_i	proportion de ruptures
$A\%$	Allongement après rupture en %.
v	distance de la fibre externe à la fibre neutre
σ_0	La contrainte nominale
K_{tf}	Le coefficient de concentration de contrainte
m	Masse
g	Gravité

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Machine de fatigue en rotation	5
Figure I.2. Exemple d'une analyse de type « escalier »	5
Figure I.3. Volume d'influence sur une éprouvette entaillée (K_t flexion=1,3) chargée en flexion plane à sa limite d'endurance.	6
Figure I.4. Courbes S-N prévues et expérimentales pour une probabilité de fissuration $p=10\%$, 50% et 90% en traction ($R=-1$) sur éprouvettes lisses en Ti6Al4V (Thèse T. DELAHAY).....	6
Figure I.5. Prévion de l'effet d'échelle en traction ($R=-1$) sur éprouvette cylindrique de révolution en Ti6 Al4V.....	7
Figure I.6. Entaille par électroérosion.....	7
Figure. I.7. Comparaison résultats théorique et expérimental.....	8
Figure. I.8 (a) Axes de wagons de chemin de fer.....	10
Figure.I.8 (b) Courbes de Wöhler.....	10
Figure. I.9 Courbe montre L'amplitude de contrainte.....	11
Figure I.10 Allure de la courbe de Wöhler	13
Figure I-11 Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques)	14
Figure I-12 Diagramme de Haigh (résultats théoriques)	14
Figure I-13 Diagramme de Haigh	15
Figure I-14 Diagramme de Goodman.....	16
Figure I-15 Diagramme de Rôs.....	16
Figure I-16 Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers	17
Figure I.17 Relation entre la limite d'endurance et les caractéristiques de traction (cas des aciers)	20
Figure I.18 Représentation schématique de la propagation d'une fissure	21
Figure I.19 Courbe de fissuration donnant la longueur de la fissure selon le nombre de cycles et le niveau de contrainte.....	22
Figure I.20 Faciès de fatigue.....	25
Figure I.21 Schéma de la formation des cupules (a- Rupture normale b- Rupture par glissement).....	25

Chapitre II

Figure II.1 Présentation des résultats d'essais sur un diagramme de Wöhler (S-log N).....	30
Figure II.2a Tracé des 3 courbes de réponse à la contrainte.....	33
Figure II.2b Tracé des courbes d'isoprobabilité ($p = 0.16$; $p = 0.5$; $p = 0.84$) sur un diagramme de Wöhler.....	33
Figure II.3 Méthode des K éprouvettes non-rompues.....	35
Figure II.4 Droite de Henry.....	37
Figure II.5 Méthode de l'escalier.....	39
Figure II.6 Méthode d'itération.....	42

Chapitre III

Figure III.1 Eprouvette d'essai de traction.....	46
Figure III.2.1 La machine d'essai de fatigue SHIMADZOU FREQUOL-Z200.....	48
Figure III.2.2 Schéma montre l'application de charge sur l'éprouvette.....	49
Figure III.3 Géométrie de l'éprouvette pour les essais de flexion rotative.....	50
Figure III.4 Points d'application de la charge F.....	51
Figure III.5 : Détermination de K_{tf} pour arbre avec une gorge.....	52

Chapitre IV

Figure IV.1 Tracé de la courbe de Wöhler du lot n°01.....	55
Figure IV.2. Tracé de la courbe de Wöhler ajustée.....	61
Figure IV.3 facies d'une éprouvette rompue en acier A60 a l'échelle microscopique (200 :1).....	64
Figure IV.4.a facies d'une éprouvette rompue en acier A60 a l'échelle (1 :1) de flexion rotative.....	64
Figure IV.4.b Caractéristiques des ruptures développées en fatigue sous sollicitation de flexion rotative.....	64
Figure IV.5 éprouvette N°1 rompue de 31700 (cycles) à 186 N/mm^2	65
Figure IV.6 éprouvette N°2 rompue de 36800 (cycles) à 174 N/mm^2	65
Figure IV.7 éprouvette N°3 rompue de 76800 (cycles) à 162 N/mm^2	66
Figure IV.8 éprouvette N°4 rompue de 196700 (cycles) à 150 N/mm^2	66
Figure IV.9 éprouvette N°5 rompue de 358100 (cycles) à 138 N/mm^2	66
Figure IV.10 éprouvette N°6 rompue de 1.2×10^6 (cycles) à 126 N/mm^2	67

Liste des tableaux

Tableau (I.1) Faciès de rupture en fatigue.....	26
Tableau (II.1) la distribution des éprouvettes sur les différents niveaux de contraintes.....	35
Tableau (III.1) la composition chimique de l'acier A60.....	44
Tableau (III.2) description de la machine d'essais de fatigue	48
Tableau (IV.1) les résultats expérimentaux sur le lot no : 01.....	54
Tableau (IV.3) l'application de la méthode d'escalier sur le lot no : 03.....	57
Tableau (IV.4) Calcul des quantités : $x_i, y_i, x_i \cdot y_i, x_i^2$	60
Tableau (IV.5) les valeurs de N (cycles) pour La fonction de lissage.....	61

Introduction

générale

Introduction Générale

Le mot fatigue vient d'un mot latin fatigare qui signifie 'tiredness' en anglais. Ce terme est utilisé fréquemment en science de l'ingénierie pour montrer l'endommagement, la fissuration et la rupture des matériaux sous une sollicitation mécanique cyclique. Cette définition a été adoptée et affichée en 1964 par une Organisation Internationale de standardisation à Genève.

Elle correspond aux matériaux métalliques et non-métalliques. La première étude en fatigue a été réalisée sur des matériaux métalliques en 1829 par W.A. J. Albert qui était un ingénieur des mines allemand. Cependant, ce domaine a commencé à se développer avec l'augmentation de l'usage des structures en fer particulièrement dans la fabrication des ponts et des chemins fer.

Le premier vrai travail de recherche sur métal a commencé en 1842 à cause d'un accident de chemin de fer à coté de Versailles en France. Cet accident a causé 1500 à 1800 morts à l'époque [05].

La fatigue des structures métalliques soumises à des sollicitations cycliques est un phénomène qui est traditionnellement étudié à deux niveaux. La fatigue est respectivement qualifiée « **d'oligocyclique** » ou « **de polycyclique** » si le chargement produisant la rupture est appliqué durant un petit ou un grand nombre de cycles. A son tour, la « **fatigue polycyclique** » se divise en deux domaines : « **endurance limitée** » où l'on parle du régime fini de durée de vie et « **endurance illimitée** » où la structure peut supporter un nombre de cycles théoriquement infini sans qu'elle ne casse. La vérification traditionnelle de la tenue en fatigue des structures métalliques travaillant à grand nombre de cycles se faisait dans le domaine de l'endurance illimitée où le constructeur se contentait d'assurer la tenue de sa pièce à un « très » grand nombre de cycles fixé. Dans un contexte de forte compétition économique, les exigences croissantes des industriels pour l'optimisation de leurs structures rendent cette démarche insuffisante. En effet, les industriels ont pour objectif d'optimiser leurs structures au plus juste ; ils ne veulent plus les dimensionner au-delà de ce qui est strictement nécessaire et inscrit au cahier des charges.

Devant cette nécessité compétitive, ils se sont orientés vers l'étude du domaine de l'endurance limitée. Ce domaine qui intéressait peu de chercheurs, constitue actuellement un axe important de leurs recherches devant la forte demande industrielle.

D'autre part, les composants mécaniques sont généralement de nature complexe subissant des chargements complexes. Les industriels recherchent un modèle de prédiction de durée de vie de leurs composants, qui est d'utilisation simple, d'une grande applicabilité sur les matériaux métalliques et qui traite presque tous les cas de charges possibles. Dans le domaine de l'endurance limitée, très peu de critères sont proposés. A l'heure actuelle, aucun d'entre eux n'est utilisable dans les bureaux d'études, et ne répond complètement à la demande d'un outil prédictif de durée de vie. En effet, la plupart des approches existantes s'appuient sur des méthodes de comptage de cycles, dont l'extension au cas de sollicitations multiaxiales s'avère difficile voire impossible du fait de la difficulté d'extraire et de définir des cycles.[22]

Toute pièce mécanique en fonctionnement normal est soumise à un certain nombre de sollicitations d'origines diverses, de valeurs maximales généralement connues mais variables dans le temps - modestes par rapport aux caractéristiques mécaniques du matériau utilisé. La répétition de ces efforts mène la pièce ou la structure à la rupture, ce qui est appelé phénomène de fatigue.

Le problème de la fatigue des structures est présent dans les domaines maritimes, aéronautiques, mécaniques et bien d'autres encore. Les premières études systématiques de ce phénomène, furent effectuées en 1869 par l'ingénieur des chemins de fer bavarois A. Wöhler, dans le cadre de recherches sur la rupture des essieux de wagon. Il supposa que, comme dans un organisme vivant, la répétition de contraintes « fatiguait » le matériau en diminuant ses capacités de résistance. Cette idée ne correspond pas à la réalité physique, mais le terme est resté comme nom générique de ce phénomène. L'étude de la fatigue des matériaux fait l'objet, aujourd'hui encore, de nombreux travaux de recherche, pour les métaux essentiellement. Le problème physique de la fatigue est lié à la micro géométrie de la surface du matériau et à sa structure atomique même, et donc à sa composition chimique [27].

Le but de cette thèse est de déterminer le comportement des éprouvettes de métal (acier **A60**) sous sollicitations de contraintes périodiques à amplitude constante, analogue à celles qui se produisent dans la pratique lors des sollicitations de service.

Nous avons examiné plus particulièrement, les points suivants :

La conformité du matériau aux normes de livraison, en faisant des essais mécaniques statiques et en déterminant sa composition chimique,

Le comportement en fatigue de la nuance étudiée, en effectuant des essais dynamiques en flexion rotative par des méthodes différentes, afin de déterminer la limite d'endurance et son écart-type,

L'analyse statistique des résultats et le tracé des courbes de Wöhler probabilisées ;

L'étude micrographique et interprétation de quelques échantillons rompus.

Le travail effectué dans cette thèse est présenté de la façon suivante :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique. Il rassemble les rappels de définitions, des diagrammes représentatifs de la fatigue, de l'endommagement par fatigue ainsi que les facteurs qui peuvent influencer sur l'endurance de la pièce ou de la structure ;

Le deuxième chapitre explique les méthodes d'essais utilisées pour l'estimation de la limite d'endurance et son écart-type avec quelques résultats expérimentaux bibliographiques ;

Le troisième chapitre parle de l'acier choisi pour cette étude, sa conformité aux normes de livraison, tels que sa composition chimique et ses caractéristiques mécaniques. Pour cela, des essais aux laboratoires ont été réalisés sur éprouvettes. Aussi, dans ce chapitre nous avons fait aussi une description du dispositif expérimental utilisé pour la réalisation de nos essais sur cette nuance d'acier ;

- le quatrième chapitre regroupe les résultats expérimentaux ;

Enfin nous avons fait une étude micrographique et interprétation sur quelques faciès de rupture.

Chapitre I. Etude bibliographique

I. Etude bibliographie

I.1 Etat de l'art

La pression économique impose, pour une meilleure rentabilité des constructions et des équipements, une plus grande maîtrise des marges de sécurité. La fatigue représente toujours un mode de ruine fondamental des structures avec la particularité d'être sournois puisque les défaillances sont la conséquence d'une accumulation de l'endommagement dans le temps, souvent sans signe extérieur observable. La plupart des méthodes de calcul de la résistance en fatigue des structures sont déterministes (prévision binaire : fissuration ou non). Elles ne permettent pas de vraiment quantifier le risque de fissuration. Ceci est principalement dû au fait qu'un critère de fatigue n'intègre pas la dispersion des résultats d'essais de fatigue, une approche probabiliste est donc nécessaire. C'est une des raisons pour laquelle les codes de dimensionnement s'orientent actuellement vers des formulations semi-probabilistes. [27]

Le premier vrai travail de recherche sur métal a commencé en 1842 à cause d'un accident de chemin de fer à côté de Versailles en France.

Cet accident a causé 1500 à 1800 morts à l'époque [05].

Et maintenant quelques recherches liés au notre travail.

En 2002 le docteur en médecine dentaire **Viviana Coto Hunziker** à l'université de Genève "faculté de médecine Section de Médecine dentaire Département de Prothèse dentaire" elle a soutenu sa thèse de doctorat sous titre de **"Résistance a la fatigue en rotation et résistance en flexion de huit matériaux résineux, composites et acetac"** [29].

Le but de son étude est de caractériser mécaniquement ces matériaux en déterminant leur limite moyenne de fatigue ainsi que leur résistance à la flexion.

Elle a travaillé sur huit (8) matériaux suivants :

Les matériaux testés étaient:

1. résines composites pour restaurations à long terme (Artglass, Colombus, Targis),
2. résines pour restaurations temporaires (Jet, Protemp II, Protemp Garant, Provipont DC)
3. une résine acétallique pour crochets en prothèse adjointe (Ertacetal).

Le test en fatigue utilisé était celui d'un cylindre en porte-à-faux (cantilever beam) soumis à 10^6 cycles et 16.7 Hz comme le montre sur la **figure I.1**.

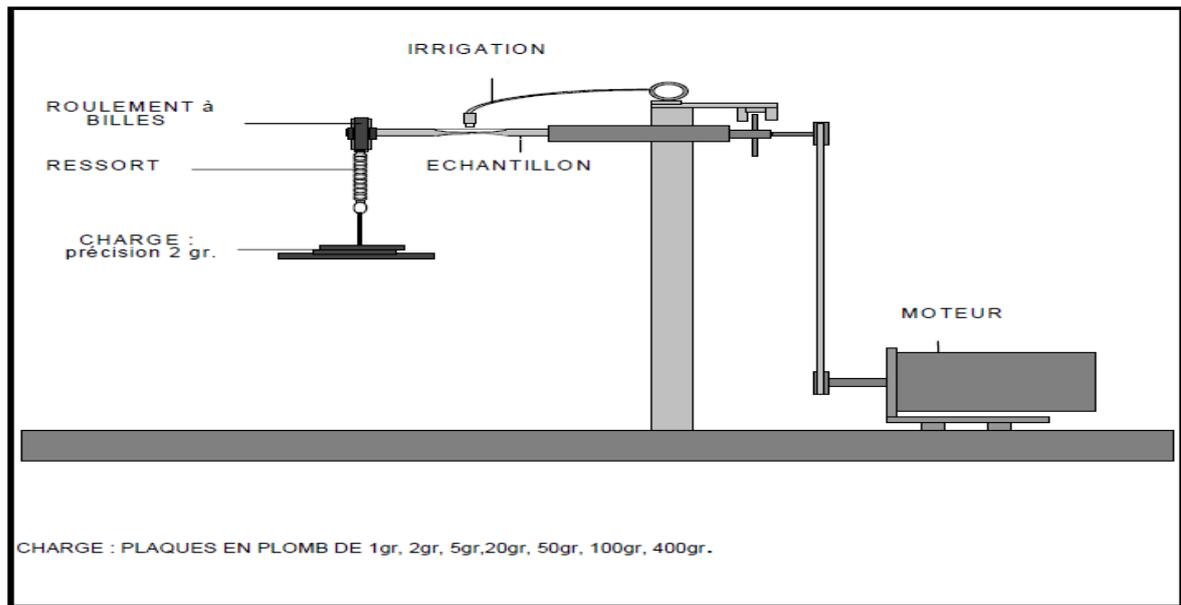


Figure I.1. Machine de fatigue en rotation

La méthode de l'escalier a été utilisée pour déterminer la limite de fatigue (à 50%).

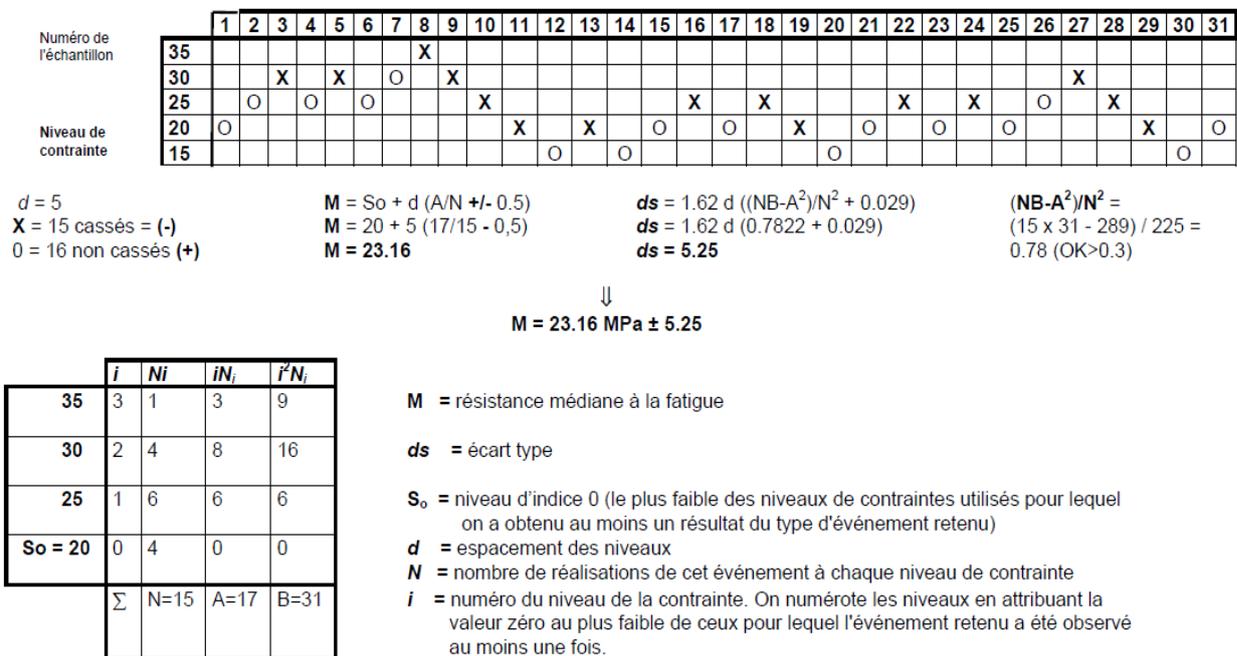


Figure I.2. Exemple d'une analyse de type « escalier »

La résistance en flexion a été mesurée en trois-points à 0.5 mm/min sur des barres (25 x 2.5 x 2.5 mm³). La distribution de Weibull a été utilisée pour l'analyse statistique.

Voici les résultats qui ont obtenu : Limite de fatigue en MPa : Targis® (62.1 ± 7.0), Artglass® (58.5 ± 3.7), Colombus® (54.6 ± 6.2), Ertacetal® (60.5 ± 3.3), Provipont DC® (29.5 ± 3.2), Protemp II® (23.1 ± 5.3), Jet® (22.8 ± 8.3), Protemp Garant® (19.6 ± 4.6). Résistance caractéristique (S_0) de Weibull en flexion [MPa] et valeur m correspondantes : Colombus® (145.2; 13.1), Targis® (110.3; 7.8), Artglass® (95.9; 5.4), Jet® (150.9; 17.3), Provipont DC® (97.3; 23.8), Protemp II® (57.9; 6.4), Protemp Garant® (54.2; 12.8). La limite de fatigue des résines composites se situait entre 40 et 60% de celles en flexion.

En 2004 le docteur Thomas DELAHAY a travaillé sur les éprouvettes en alliage de titane en Ti6Al4V comme le montre sur cette **figure I.3** [27].

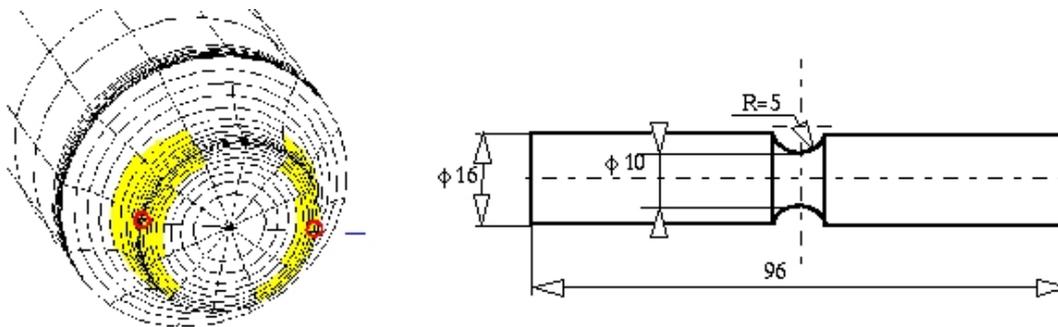


Figure I.3. Volume d'influence sur une éprouvette entaillée (K_t flexion=1,3) chargée en flexion plane à sa limite d'endurance.

Et il a trouvé les résultats suivants : illustré dans c'est courbe (courbe S-N **figure I.4** et courbes prévisions de l'effet **figure I.5**).

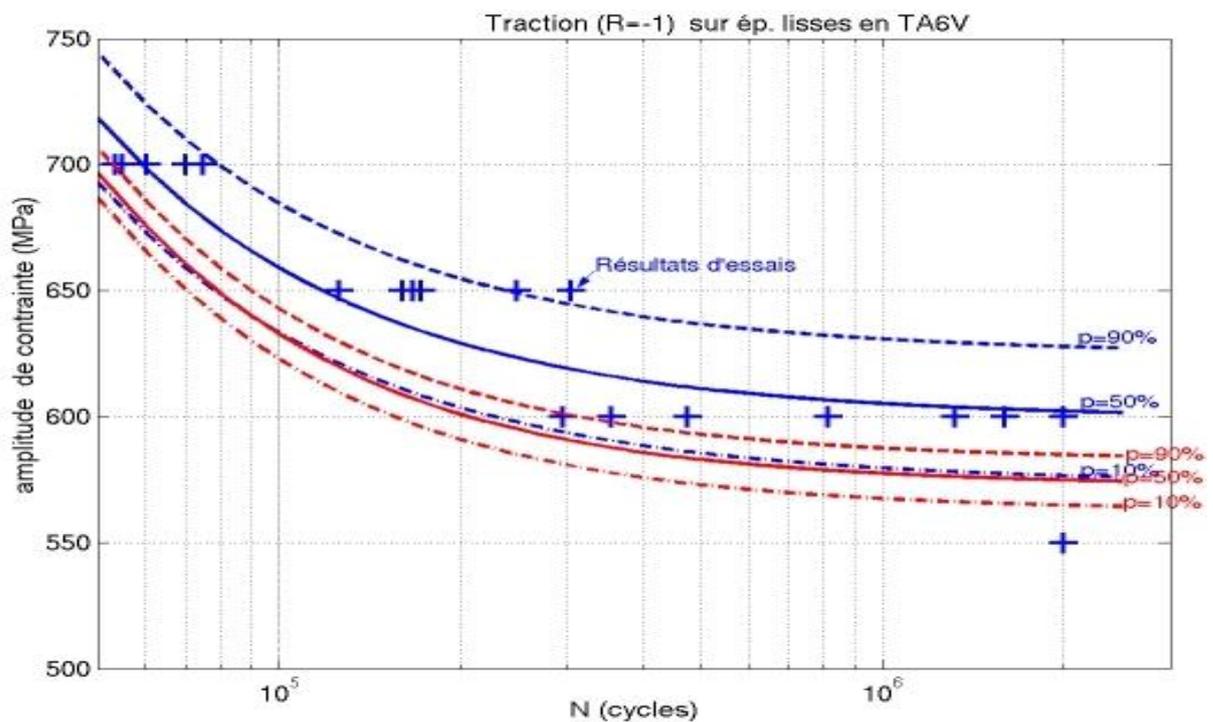


Figure I.4. Courbes S-N prévues et expérimentales pour une probabilité de fissuration $p=10\%$, 50% et 90% en traction ($R=-1$) sur éprouvettes lisses en Ti6Al4V (Thèse T. DELAHAY).

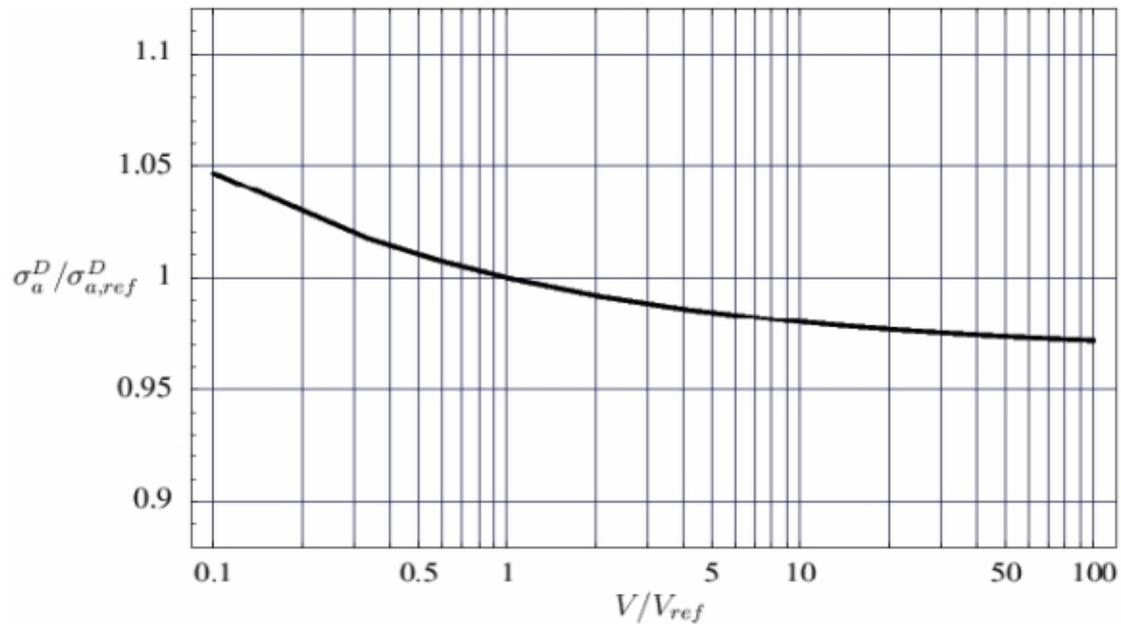


Figure I.5. Prédiction de l'effet d'échelle en traction ($R=-1$) sur éprouvette cylindrique de révolution en Ti6 Al4V

En 2009 V. PERIERa, L. DIENGA, L. GAILLETa, S. FOUVRYb sont des professeurs en Ecole Centrale de Lyon (ECL), ils ont travaillé sur un fil de câble de haubanage (câble du Génie Civil sont soumis à des sollicitations qui conduisent à deux principales causes de dégradation : la fatigue et la corrosion.) sont s'intéresse à la propagation d'une fissure dans un fil d'acier entaillé soumis à la fatigue.

L'étude expérimentale a été réalisée sur des fils d'acier cylindriques de diamètre 5,4 mm. Comme montre sur la figure I.6.

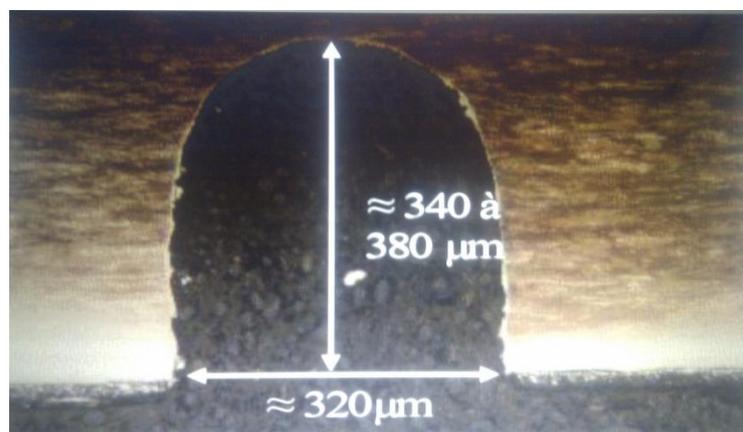


Figure I.6. Entaille par électroérosion.

28 essais de fatigue sur fil entaillé ont été réalisés. Sur le graphique de la **Figure. I.7**, on constate une certaine dispersion des résultats, cette dispersion est inhérente au phénomène de fatigue ainsi qu'à l'hétérogénéité du matériau [28].

Au vu des résultats expérimentaux, on peut dire que dans les conditions d'essais retenues, les fils d'acier tréfilé obéissent à la loi de Paris.

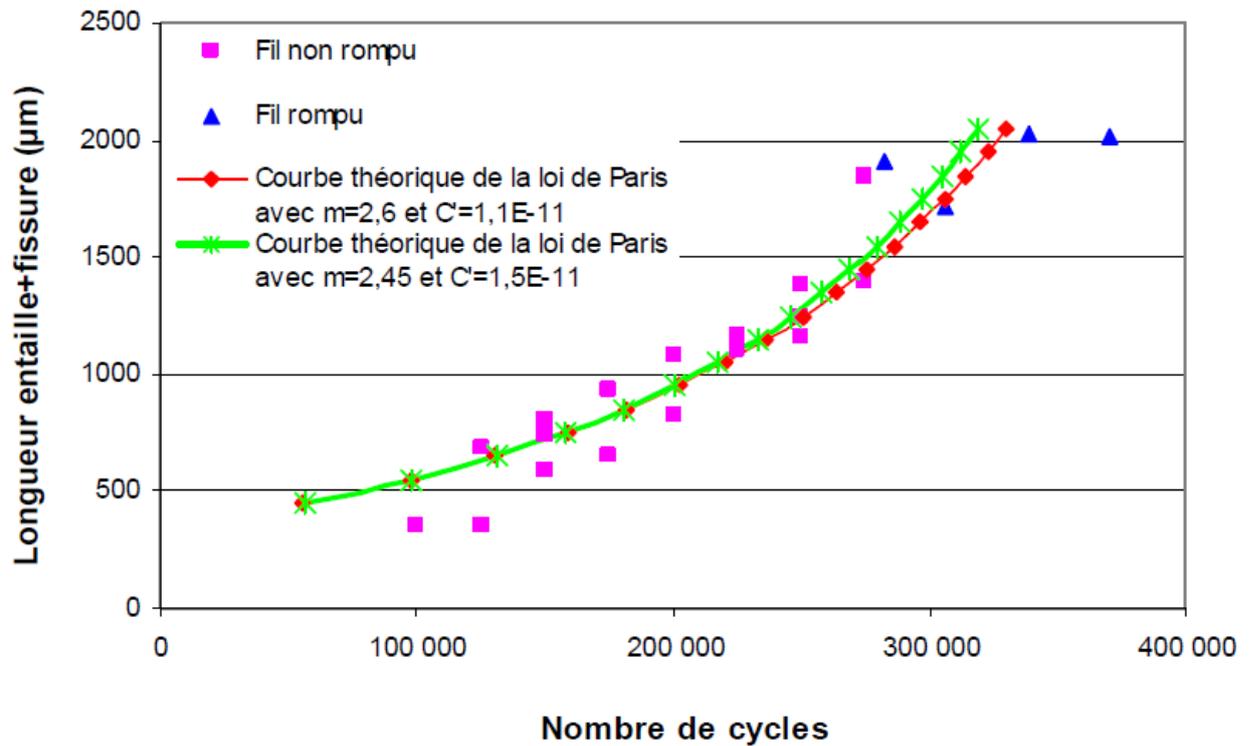


Figure. I.7. Comparaison résultats théorique et expérimental [28].

I.2 La fatigue des matériaux (fatigue et endurance)

I.2.1 Esquisse sur le phénomène de la fatigue des matériaux

Sous chargement d'amplitude constante, il est généralement admis que les matériaux métalliques possèdent une limite de fatigue, c'est-à-dire qu'il existe un niveau de contrainte en dessous duquel aucun endommagement macroscopique de fatigue n'apparaîtra au bout d'un nombre de cycles très grand ((infini)) en théorie). Différentes définitions physiques de la limite de fatigue existent. Dans certains cas, elle correspond à la contrainte minimale permettant l'amorçage d'une fissure à l'échelle du grain, celle-ci étant supposée se propager sous le même niveau de chargement jusqu'à rupture complète de la structure. Dans d'autres cas la limite de fatigue est définie comme une limite de non propagation d'une fissure amorcée depuis un défaut sous chargement cyclique. Cette définition fait suite à des observations microscopiques ayant permis de mettre en évidence la présence de fissures de fatigue amorcées dans certains grains situés à la surface d'une éprouvette et bloquées contre des barrières microstructurales pour des niveaux de contraintes inférieures à la limite d'endurance. Ce dernier cas est plus délicat à traiter dans la mesure où l'estimation de durée de vie à l'amorçage d'une fissure macroscopique fait intervenir de nombreux paramètres inhérents à la microstructure [05].

I.2.2 Présentation

Les contraintes économiques actuelles poussent de plus en plus les industriels à optimiser leurs fabrications pour en réduire les coûts. Dans ce contexte, les bureaux d'études concevant des mécanismes produits en masse ou des systèmes pour lesquels un haut niveau de fiabilité est recherché ne peuvent ignorer le dimensionnement des pièces vis à vis de leur tenue en fatigue, en particulier à grande durée de vie [22].

I.2.3 Historique

La fatigue a été mise en évidence et étudiée pour la première fois par l'ingénieur allemand Wöhler qui analysait les nombreuses ruptures d'axes de wagons de chemin de fer figurent 1.8 (a). Il montra grâce à des essais que le nombre de cycles jusqu'à la rupture d'un arbre dépendait de la contrainte maximale dans l'axe (contrainte de flexion variant entre plus et moins l'amplitude maximale à chaque tour de roue) et des détails géométriques de l'axe.

Wöhler fut ainsi le premier à établir des courbes de fatigue qui aujourd'hui portent son nom. La figure 1.8 (b) donne un exemple de ces courbes telles que présentées par Wöhler. Elle montre le nombre de cycles avant rupture pour des aciers en fonction de la contrainte alternée appliquée aux échantillons. Ces résultats montrent la forte diminution de la durée de vie (du nombre de cycles) causée par la présence d'une concentration de contrainte dans l'éprouvette. On reviendra sur la courbe de Wöhler et sur l'effet des concentrations de contrainte.

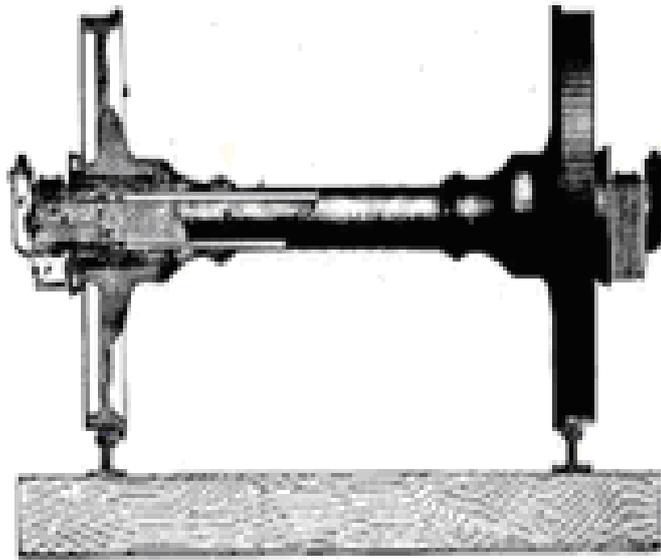


Figure. I.8. (a) Axes de wagons de chemin de fer

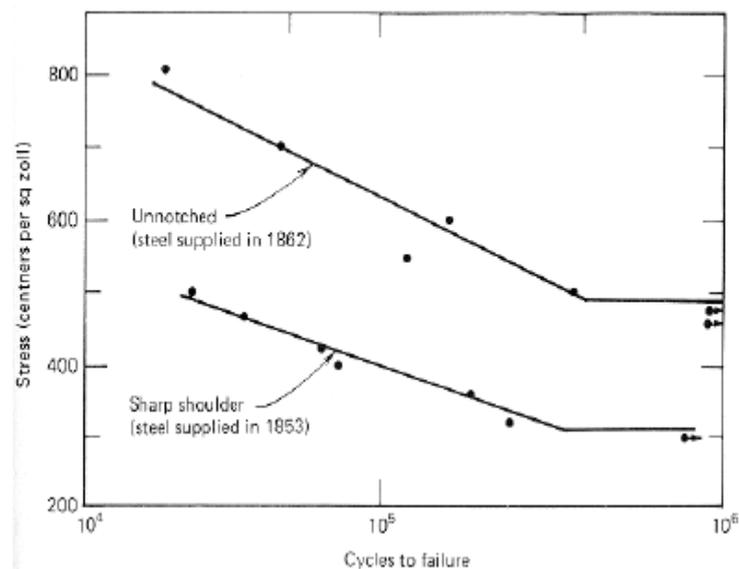


Figure. I.8 (b) Courbes de Wöhler [16].

I.2.4 Définition d'un phénomène de fatigue:

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés du matériau suite à l'application de cycles d'efforts, dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces [10].

Ou fatigue des matériaux : détérioration progressive des matériaux sans déformation apparente, aboutissant à une rupture. La fatigue d'un matériau résulte de l'application répétée de contraintes. La rupture par fatigue apparaît de façon soudaine et imprévisible, contrairement à l'usure, à la déformation ou à la corrosion, qu'il est possible de détecter bien avant la rupture. L'étude de la fatigue des matériaux est particulièrement importante ; elle permet de déterminer la résistance mécanique d'éléments de machines et de structures soumises à des contraintes périodiques ou à des vibrations [16].

Les contraintes seront définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle et σ par la valeur moyenne de la contrainte σ_m , et par le rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximale :

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1.1)$$

On est parfois conduit à distinguer la composante alternative σ_a de la composante statique σ_m . Ainsi, selon des valeurs relatives de ces deux composantes on distingue les essais sous sollicitation :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1.2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1.3)$$

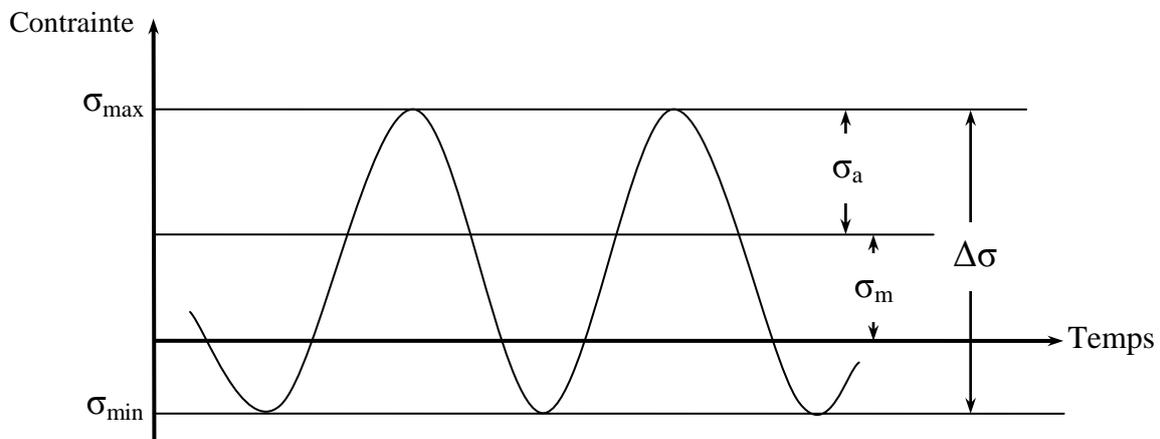


Figure. I.9. Courbe montre L'amplitude de contrainte

- Alternée symétrique : $\sigma_m = 0$, $R = -1$
- Alternée dissymétrique : $0 < \sigma_m < \sigma_a$, $-1 < R < 0$
- Répétée : $\sigma_m = \sigma_a$, $R = 0$
- Ondulée : $\sigma_m > \sigma_a$, $0 < R < 1$

La durée de vie est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture N . L'exécution de n cycles ($n < N$) entraîne un certain endommagement de la pièce qu'il est important de définir car à titre préventif, il détermine sa vie résiduelle et donc peut indiquer s'il faut ou non remplacer la pièce pour éviter un accident [08].

On appelle endurance la capacité de résistance à la fatigue des pièces et des structures. D'une façon générale, il y aura fatigue toutes les fois que l'on est en présence d'efforts variables dans le temps. Ce qui est bien particulier à la fatigue et qui en fait le danger, c'est que la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles, souvent bien inférieures à la résistance à la rupture et même à la limite d'élasticité du métal [08].

I.3 Diagrammes représentatifs :

Il existe un certain nombre de représentation possible des résultats obtenus au cours d'essais de fatigue :

- Courbes de *Wöhler*.
- Courbes d'équiprobabilité de rupture (courbes P.S.N).
- Diagramme de *Haigh*.
- Diagramme de *Goodman*.
- Diagramme de *Rôs*.
- Diagramme de *Moore, Kommers et Jaspers*.

I.3.1- Courbe de Wöhler

(Courbe « S.N » dans les pays anglo-saxon (Stress - Number of cycles)) :

Cette courbe représente la variation d'une des contraintes dynamiques précitées en fonction du nombre de cycles à rupture (reporté sur échelle logarithmique). [17]

Cette courbe partage le plan de coordonnées en trois domaines :

1- Domaine de la fatigue oligocyclique, ruptures surviennent après un petit nombre de cycle $N \leq 10^5$ cycles.

2- Domaine d'endurance limitée ($N > 10^5$ cycles) les ruptures surviennent systématiquement après un nombre de cycles croissants avec la décroissance des contraintes.

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

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

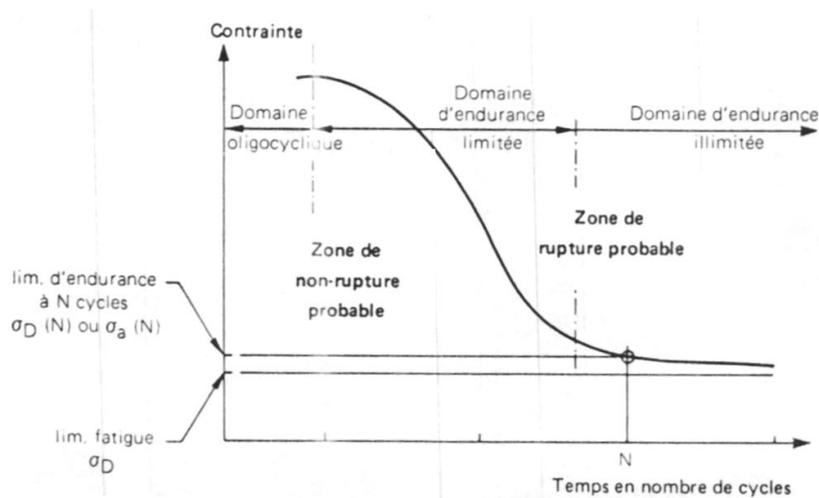


Figure I-10. Allure de la courbe de Wöhler [17].

I.3.2- Courbes d'équiprobabilité de rupture

(Courbes (P.S.N) dans les pays anglo-saxon)

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 chances de se rompre que de ne pas se rompre ».

Les courbes d'équiprobabilité de rupture, dont la courbe de *Wöhler* constitue un cas particulier ($p=50\%$ de rupture) sont alors tracées en sous trayant à la valeur moyenne une certaine valeur fonction de la probabilité de rupture recherchée [17].

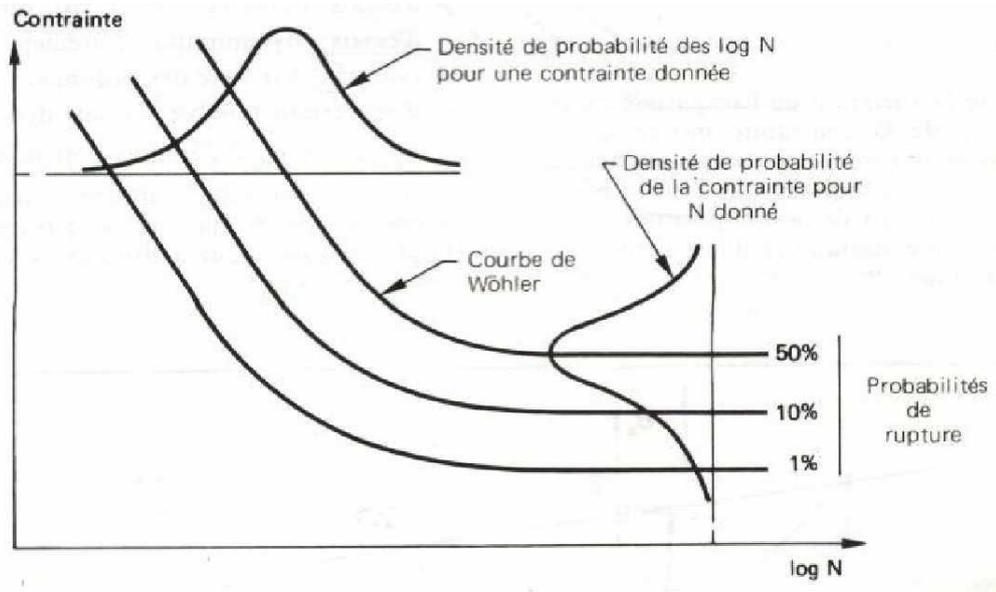


Figure I-11. Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques) [17].

I.3.3- Diagramme de Haigh :

Ce diagramme représente la variation de l'amplitude de la contrainte σ_a en fonction de la contrainte moyenne σ_m , pour un nombre de cycles à rupture [20].

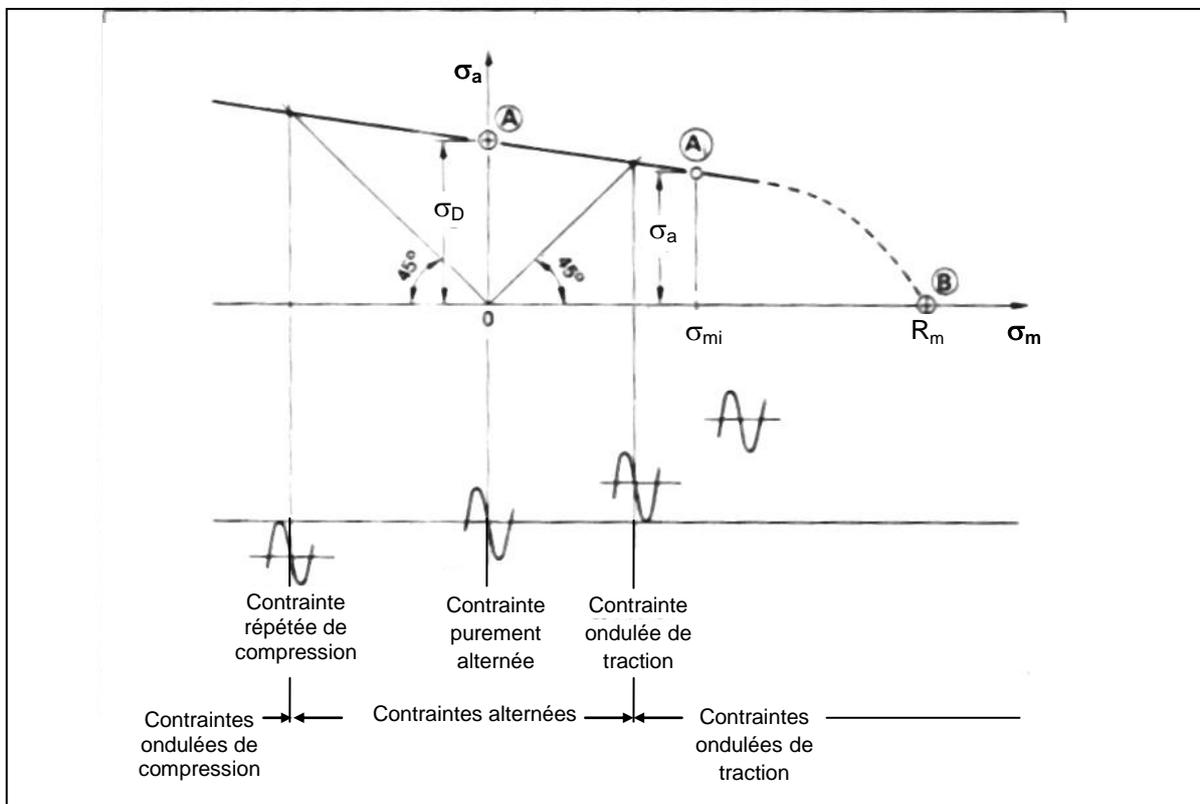


Figure I-12. Diagramme de Haigh (résultats théoriques) [20].

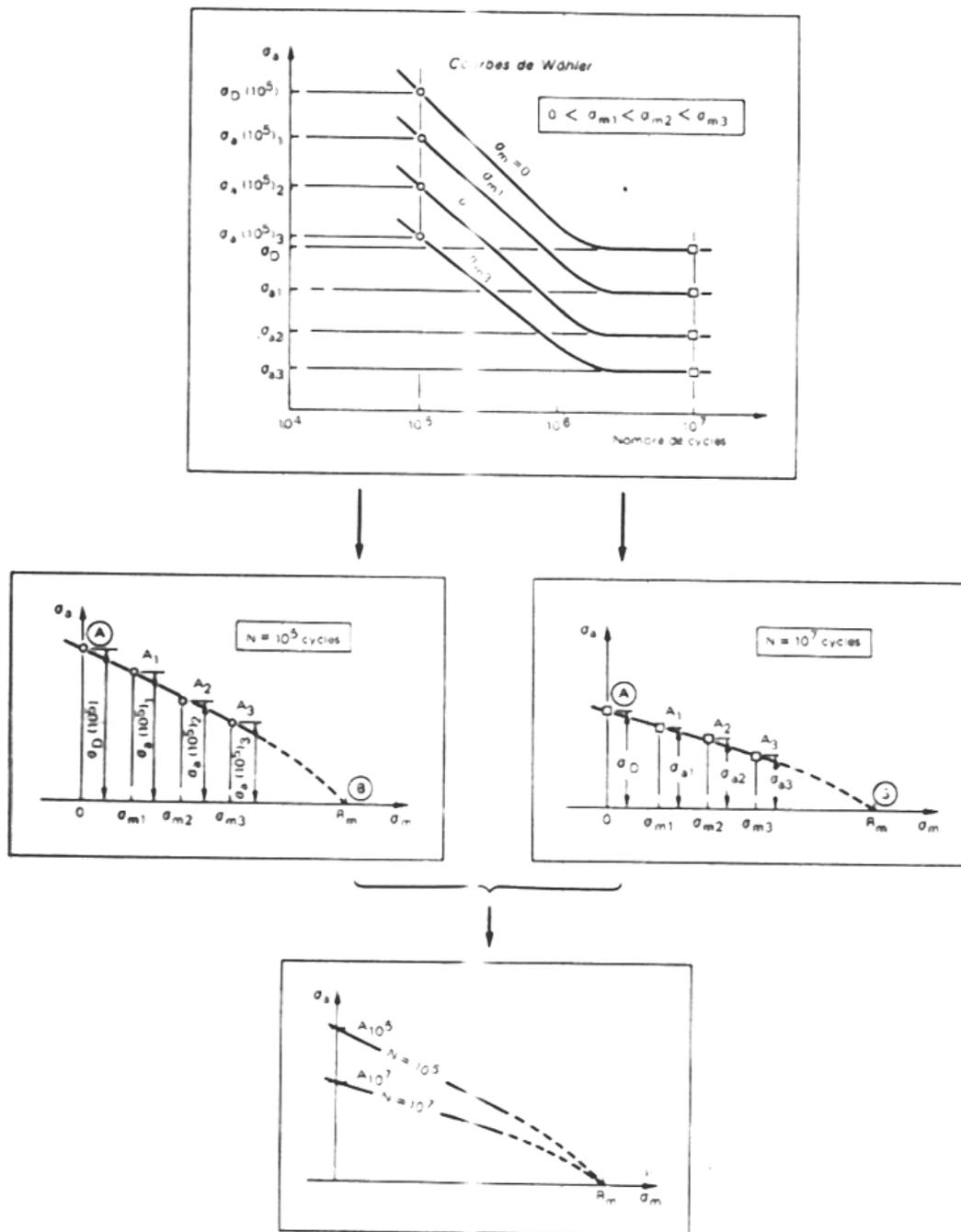


Figure I-13. Diagramme de Haigh [20].

I.3.4- Diagramme de Goodman :

Ce diagramme représente la variation des contraintes maximales σ_{max} et minimales σ_{min} en fonction de la contrainte moyenne figure (I.7) [20].

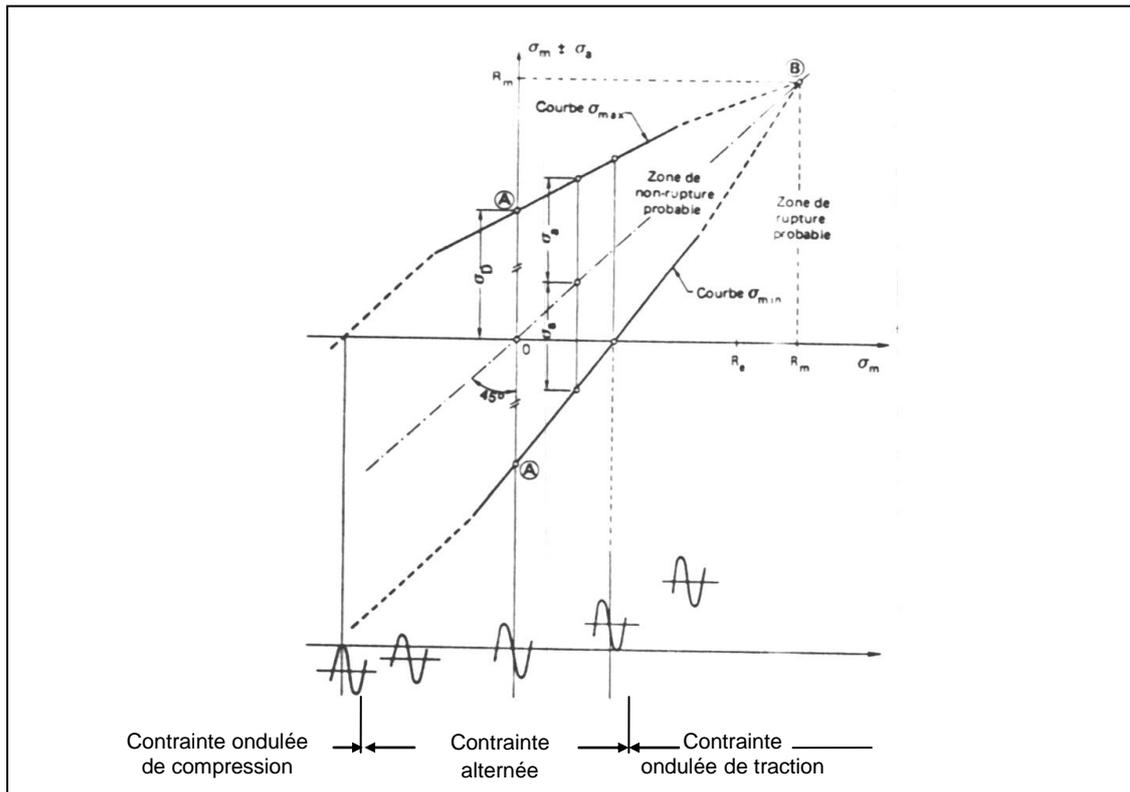


Figure I-14. Diagramme de Goodman

I.3.5- Diagramme de Rôts :

Essentiellement utilisé dans les pays anglo-saxon ce diagramme représente la variation de la contrainte maximale σ_{max} en fonction de la contrainte minimale σ_{min} figure (I.15) [20].

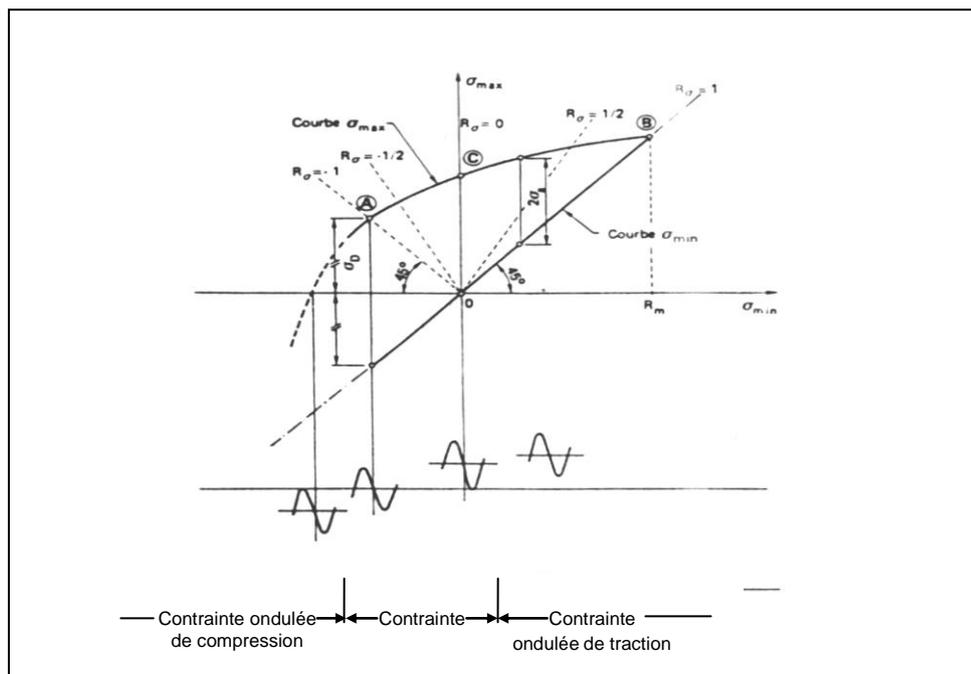


Figure I-15. Diagramme de Rôts

I.3.6- Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers :

Relativement peu connu, essentiellement utilisé dans les pays germaniques, ce diagramme présente la variation de la contrainte maximale σ_{\max} en fonction du rapport des contraintes $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ figure (1.16) [20].

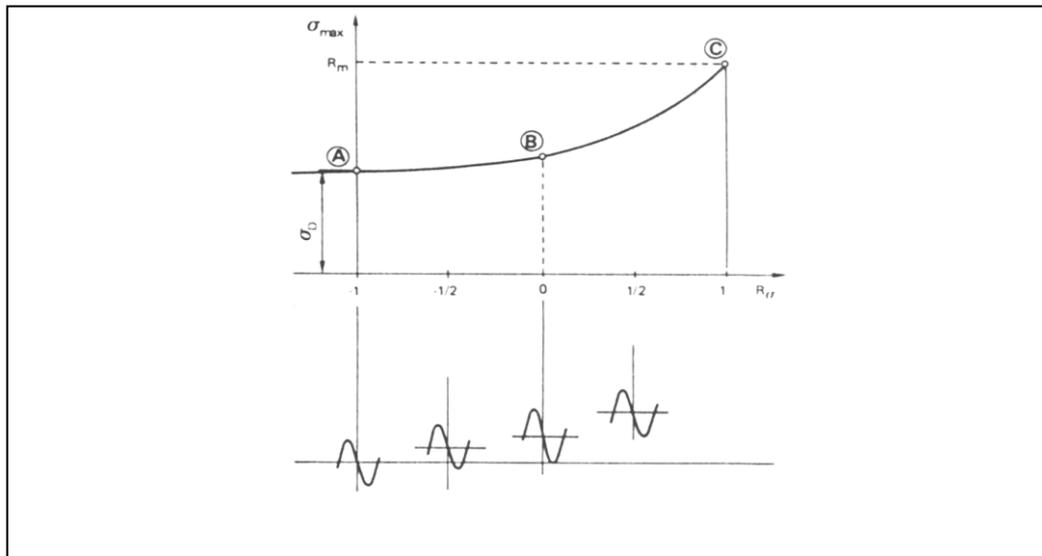


Figure I-16 Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers [20].

I.4- Représentation mathématique de la courbe de Wöhler :

D. Dengel, en abordant les représentations mathématiques des courbes S-N considère que la courbe de *Wöhler* est la plus ancienne :

$$\log(N) = a - b.S \quad (1.4)$$

Où N est le nombre de cycles à rupture, S l'amplitude de la contrainte appliquée, a et b des constantes.

- En 1910, *Basquin* a proposé : [19]

$$\log(N) = a - b.\log(S) \quad (1.5)$$

que l'on peut aussi écrire : $S = (A/N)^c$

en pose $A = e^a$ et $c = 1/b$.

- Dès 1914, *Stromeyer*, pour prendre en compte l'asymptote horizontale, introduit l'équation suivante :

$$\log(N) = a - b \cdot \log(S - E_1) \quad (1.6)$$

Cette équation est plus réaliste que celle de *Wöhler* et *Basquin*.

En posant $A = e^a$ et $C = 1/b$ l'équation de *Stromeyer* peut encore s'écrire :

$$S = E_1 + \left(\frac{A}{N}\right)^C \quad (1.7)$$

- En 1924, *Palmgreen* propose :

$$S = E_1 + \left(\frac{A}{N+B}\right)^C \quad (1.8)$$

- En 1955, *Corson* introduit, malgré des bases expérimentales réduites, l'équation :

$$N = \frac{A}{(S - E_1)^d (S - E_1)^{S - E_1}} \quad (1.9)$$

où A , E_1 et d sont des constantes.

En posant $c = \log(d)$, on obtient :

$$N = \frac{A \cdot e^{-c(S - E_1)}}{(S - E_1)} \quad (1.10)$$

- *Weibull* propose:

$$\log(N + B) = a - b \cdot \log\left(\frac{S - E_1}{R_m - E_1}\right) \quad (1.11)$$

Où a , b , B et E_1 sont des constantes [06].

I.5- Relation entre l'endurance et les caractéristiques mécaniques (cas des aciers) :

De nombreuses formules ont été proposées [11] :

- *Mailander* :

$$\sigma_D = (0,49 \pm 20\%) \cdot R_m \quad (1.12)$$

$$\sigma_D = (0,65 \pm 30\%) \cdot \sigma_e \quad (1.13)$$

$$\text{- Strinbeck :} \quad \sigma_D = (0,285 \pm 20\%).(R_m + \sigma_e) \quad (1.14)$$

$$\text{- Rogers :} \quad \sigma_D = 0,4.\sigma_e + 0,25.R_m \quad (1.15)$$

$$\text{- Houdremont et Mailander :} \quad \sigma_D = 0,25(\sigma_e + R_m) + 50 \quad (1.16)$$

$$\text{- Junger :} \quad \sigma_D = 0,2(\sigma_e + R_m + Z) \quad (1.17)$$

$$\text{- Lequis, Buchholtz et Schulz :} \quad \sigma_D = 0,175(R_m + \sigma_e - A\% + 100) \quad (1.18)$$

$$\text{- Fry, Kessner et Ottel :} \quad \sigma_D = \alpha.R_m + \beta.\sigma_e \quad (1.19)$$

Les coefficients α et β ne sont pas constants, α est proportionnel à R_m tandis que, β est inversement proportionnel à R_m .

$$\text{- Heywood :} \quad \sigma_D = \frac{R_m}{2} \quad (1.20)$$

$$\sigma_D = 150 + 0,43.\sigma_e \quad (1.21)$$

$$\text{- Brand :} \quad \sigma_D = 0,32.R_m + 121 \quad (1.22)$$

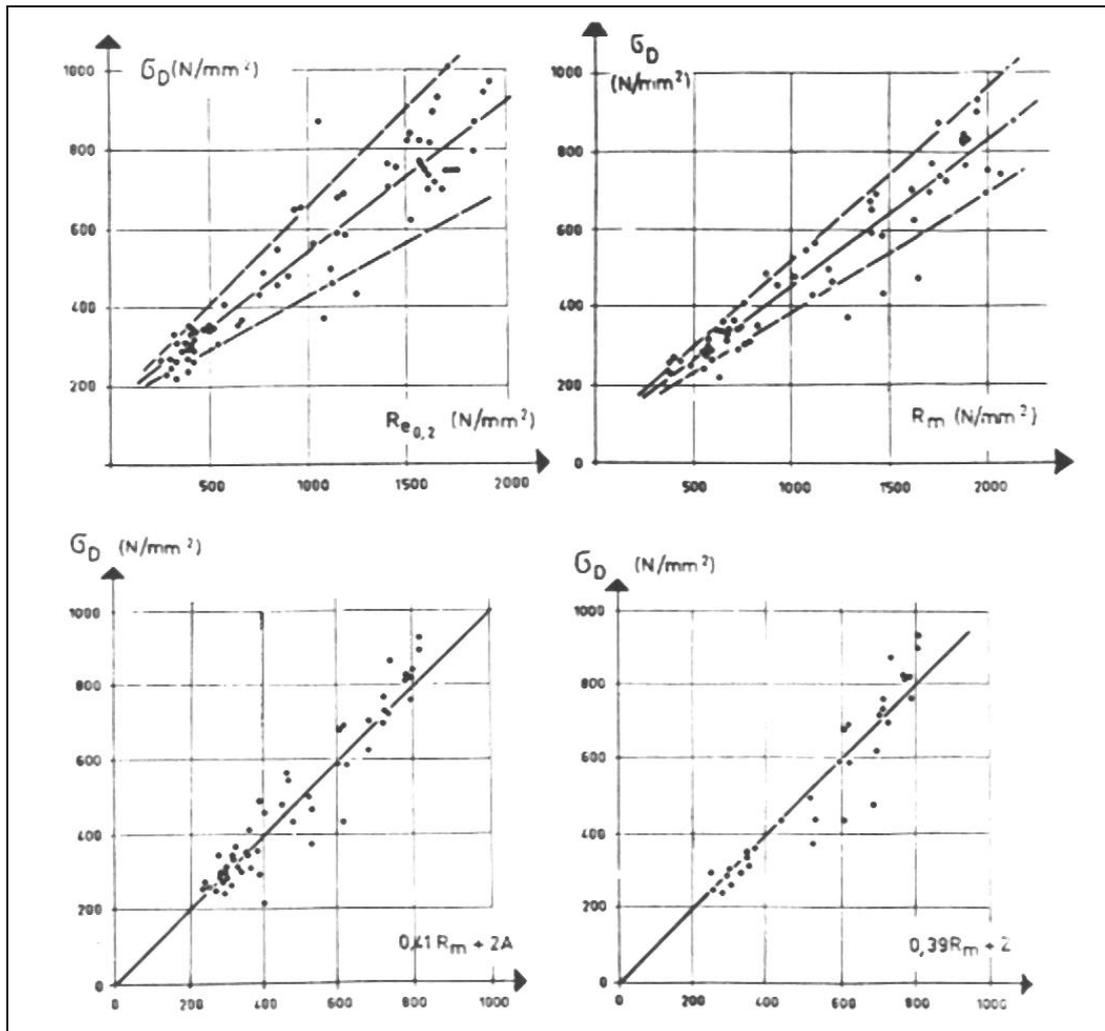


Figure I.17. Relation entre la limite d'endurance et les caractéristiques de traction (cas des aciers) [10].

I.6- Phase de propagation d'une fissure en fatigue :

L'évolution d'une fissure de fatigue peut être divisée en trois phases [01] :

I.6.1- L'initiation (ou amorçage) de la fissure : (phase A dans la figure 1.11)

Est l'influencée principalement par la différence de contraintes $\Delta\sigma$, par le facteur de concentration des contraintes (facteur « normalisant » la géométrie du détail), par la microstructure du matériau, par la contrainte moyenne et par l'environnement, on admet que la phase d'initiation est terminée lorsque la fissure atteint une certaine dimension, souvent prise entre 0,1 mm et 0,25 mm. Pendant longtemps la dimension observable de la fissure minimale a été de 0,1mm.

I.6.2- La propagation stable : (phase B dans la figure 1.18)

Elle est influencée principalement par la différence de contraintes $\Delta\sigma$, par la géométrie du détail (pointe de la fissure), et par la géométrie de la fissure. Alors que la microstructure du matériau la contrainte moyenne et l'environnement ont une influence moindre.

I.6.3- La propagation rapide : (phase C dans la figure 1.18)

Qui conduit à la rupture de l'élément. Le nombre de cycles est ici très faible et la propagation très rapide. Mentionnons encore que la rupture fragile peut intervenir à n'importe quel moment, alors qu'une rupture ductile a lieu après la phase de propagation rapide. Ce qui ne peut pas être décrite par la mécanique de la rupture linéaire élastique traditionnelle.

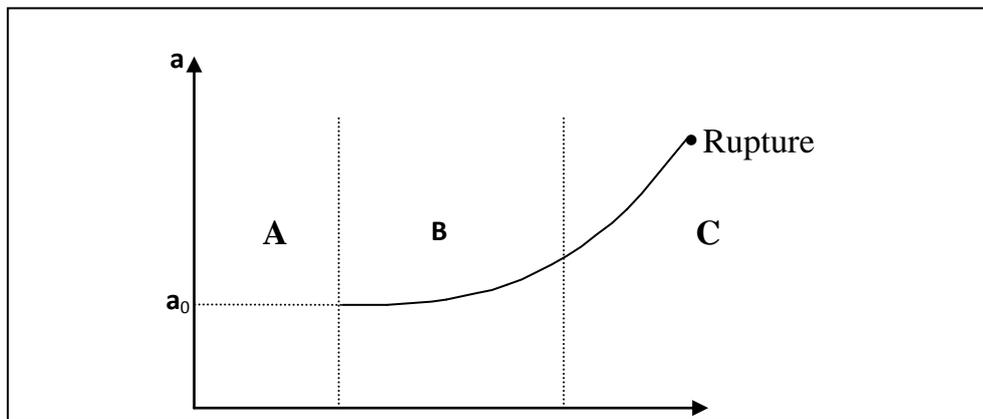


Figure I.18. Représentation schématique de la propagation d'une fissure [01].

I.7. Fissuration par fatigue

I.7.1. Courbes de propagation des fissures

L'interprétation de la courbe de dommage, repose sur l'existence d'une taille critique de la fissure, qui dépend de la contrainte maximale des cycles [12], et au dessus de laquelle leur propagation serait irréversible (endommagement) et conduirait à la rupture. On a donc cherché à suivre la progression des fissures au cours de la fatigue.

On peut reporter les longueurs mesurées en fonction du nombre de cycle sous les différents niveaux de fissure (figure I.19). Ces courbes indiquent que l'importance relative des différentes étapes, amorçage et propagation, dépend de la contrainte maximale

On peut également reporter la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle et tracer la courbe de fissuration de l'éprouvette ou des pièces considérées, soumise à la contrainte périodique maximales.

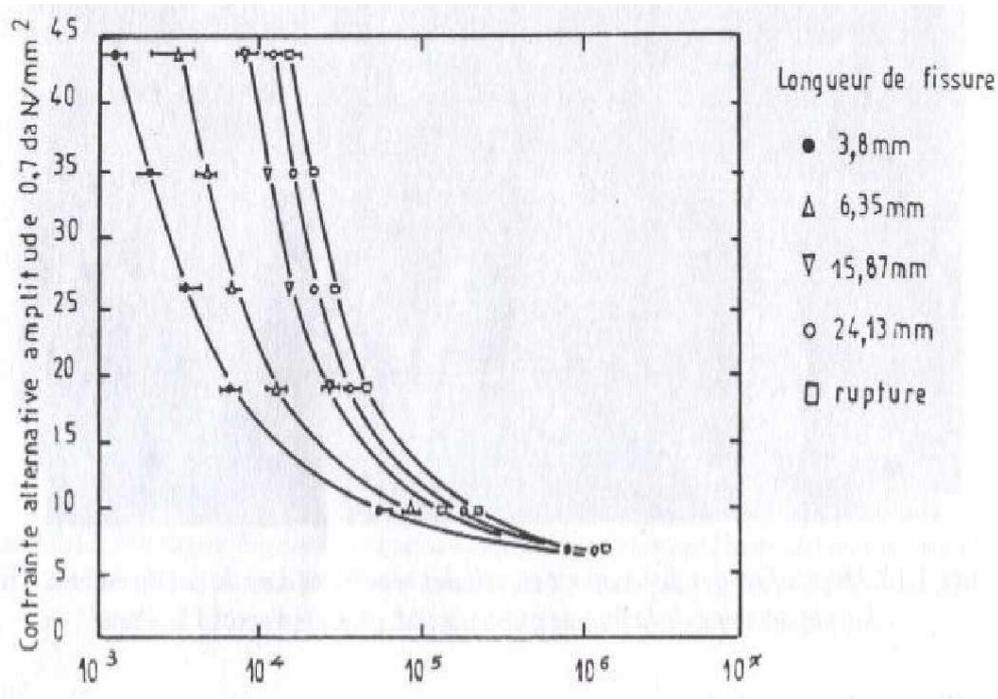


Figure I.19 Courbe de fissuration donnant la longueur de la fissure selon le nombre de cycles et le niveau de contrainte [12]

Les différents stades observés correspondent à :

- un stade de croissance rapide des fissures, qui atteignent des longueurs de l'ordre de quelques microns en surface après quelques millions de cycles.
- un stade de progression plus lente de la fissure en surface, dont la durée dépend de l'amplitude de la contrainte.
- un stade de progression rapide, qui précède de peu la rupture finale brutale.

1.7.2. Expression de la vitesse de fissuration

A partir de la mesure des longueurs de fissures observées sur des éprouvettes en cours de fatigue, différentes formules ont été proposées pour la vitesse de propagation. Si a est la longueur de la fissure, N le nombre de cycle et s la contrainte maximale des cycles, on peut citer, chronologiquement :

1) Formule de Frost et Dugdale

$$\frac{da}{dN} = A\sigma_a^3 \quad (1,23)$$

Où : A est une contrainte qui dépend du matériau et de la contrainte moyenne.

Cette formule est valable pour les fissures petites par rapport aux dimensions de l'éprouvette.

2) Formule de McEvelly et Illg :

$$\frac{da}{dN} = f(K_t, \sigma_n) \quad (1,24)$$

Où : K_t est le facteur de concentration de contrainte élastique théorique de Neuber et σ_n la contrainte normale dans la section fissurée.

3) Dans le domaine de la fatigue plastique oligocyclique, Boettner, Laird et McEvily ont proposée la formule :

$$\frac{da}{dN} = a(\mathcal{E}t, \sqrt{a})^n \quad (1,25)$$

Où : A est une contrainte, et la déformation plastique totale par cycle et n a été trouvé voisin de 2 quelque soit le matériau.

4) La mécanique de la rupture permet d'étudier quantitativement les stades de propagation lente et de propagation brutale des fissures de fatigue mentionnées à l'occasion des courbes de fissuration. On a pu, en particulier, traiter de cette façon de nombreux cas pratiques où l'on a observé des fissurations préexistantes dans une structure.

Expérimentalement, de nombreux auteurs ont trouvé que la vitesse de fissuration pouvait s'écrire selon la relation de Paris :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1,26)$$

Où : ΔK est l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte K et C et m des constantes qui dépendent du matériau [07].

I.8- Faciès caractéristiques des ruptures par fatigue :

L'examen attentif de toute rupture de pièces est une opération d'une grande importance dans le développement d'un produit. Pour l'observateur averti, de lui montrer les causes de rupture, donc envisager les remèdes à appliquer pour que cet état de fait soit supprimé [12].

I.8.1- Faciès de fatigue à l'examen optique :

Sur la section de la rupture, on observe à l'œil et à la loupe un nombre de caractéristiques (figure (1.13)) :

- Présence de deux zones distinctes d'importance variable selon l'amplitude des contraintes et la nature du matériau :

1- La rupture brutale avec faciès à grains ou à nerfs.

2- La fissure de surface avec une surface lisse.

- L'examen permet de déterminer aussi la nature des sollicitations (Tableau (1.1)).

I.8.2- Faciès de fatigue à l'examen microscopique :

Le microscope électronique à balayage (**MEB**) présente l'avantage de permettre un examen direct avec une gamme large et continue de grossissements et sous des orientations qui peuvent varier dans de larges limites, l'observation est complètement différente de celle observée optiquement :

- **Rupture Brutale (finale) :**

a- Fragile : montre les clivages trans-granulaires lisses avec réamorçages par rivières lors des passages des joints de grains ou des clivages à languettes suivant des plans cristallographiques proches à forte densité, le sens de propagation de la rupture est indiqué par le sens des rivières.

b- Ductile : Montre des cupules (creux amorcés sur des précipitations) les deux faces de la rupture présentant ces cupules qui se produisent après une déformation plastique importante, lorsque les cupules ne sont pas équiaxes (ce qui généralement le cas sauf en traction pure), le sens de propagation est donné par le grand axe des cupules (figure (1.14)).

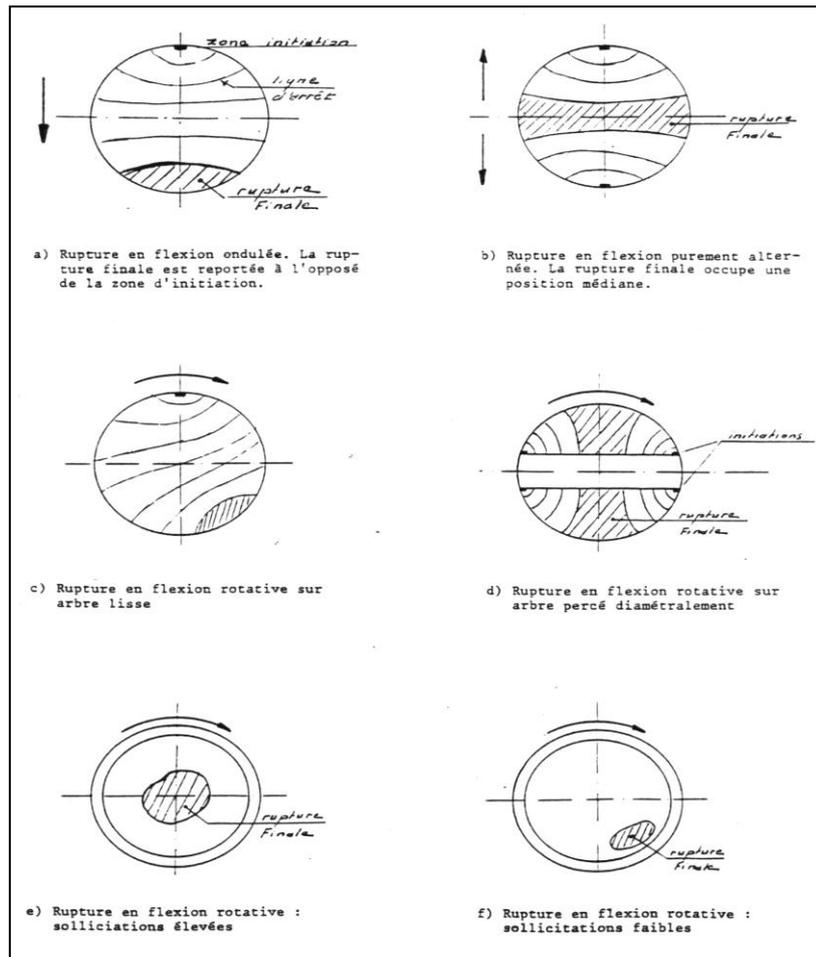


Figure I.20 Faciès de fatigue [23].

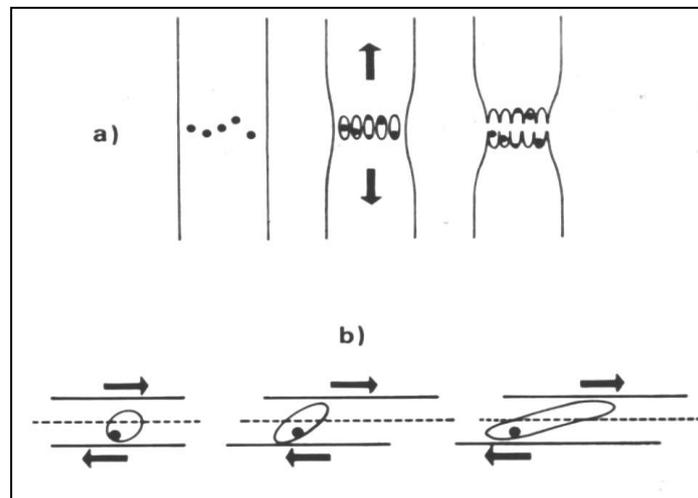


Figure I.21 Schéma de la formation des cupules [20] (a- Rupture normale b- Rupture par glissement).

Type de sollicitation	Contrainte nom. élevée			Contrainte nom. Faible		
	Concentration de contrainte					
	Nulle	Faible	élevée	Nulle	Faible	elevée
Traction-traction Ou Traction-compression						
Flexion plane Ondulée						
Flexion plane Alternée						
Flexion rotative						
Torsion						

Tableau (I.1) Faciès de rupture en fatigue [23].

I.9- Facteurs de l'endurance des pièces :

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 des concentrations des contraintes, qui entraîne des déformations plastiques.
- D'autre part, l'adaptation, c'est à dire la modification du régime des contraintes internes par relaxation consécutive à la déformation plastique localisée.
- Les facteurs qui agissent sur la fatigue sont très nombreux et on peut les classer en quatre catégories : [19]

I.9.1- Facteurs métallurgiques :

On peut classer 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 (structure métallographique et caractéristiques mécaniques) subis par les pièces [12].

I.9.2- Facteurs géométriques :

L'influence de ces facteurs intervient par la dimension des pièces (effet d'échelle) et surtout par leurs formes (effet d'entaille et coefficient de concentration des contraintes) [12].

I.9.3- Facteurs de surfaces :

Les fissures de fatigue prennent le plus souvent naissance dans les couches superficielles. Il convient donc, pour améliorer l'endurance des pièces, de relever dans la mesure du possible celle des couches superficielles, on peut y arriver en jouant soit sur la nature du métal, soit sur la résistance des couches superficielles par des traitements de durcissement et le développement de précontraintes [12].

I.9.4- Facteurs de sollicitation :

-Nature des efforts : Pour une même éprouvette, essayée sous une même amplitude de la contrainte périodique, à la même fréquence et à la même température, les gradients de contraintes 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 elle sont maximales en surface et nulles au centre, sur la fibre neutre [13].

-Effet de surcharge et de sous-charge : Une surcharge temporaire peut conduire à dépasser localement la charge de rupture du matériau et produire un endommagement irréversible sous forme d'une fissure.

Inversement, si l'on soumet le matériau à des contraintes périodiques inférieures à sa limite d'endurance, on peut avoir localement des micro-déformation plastiques, qui relâcheront les concentrations des 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%**).

- **Contraintes résiduelles :** les contraintes résiduelles peuvent aggraver dangereusement les valeurs des contraintes, inversement des précontraintes de compression permettent d'augmenter le taux de travail admissible.

Les contraintes résiduelles ne peuvent être déterminées de façon directe, elles sont toujours à déduire grâce à la mesure des quantités physiques ou mécaniques distinctes qu'elles produisent. Et qui sont les suivantes [12] :

- Les déformations macroscopiques qui se relâchent quand une partie du matériau est enlevé de la partie soumise aux contraintes résiduelles.
- La distribution des déformations résiduelles homogène dans le réseau cristallographique. C'est la base des méthodes des diffractions de rayon X.
- La vitesse de propagation des ondes ultrasonores qui sont influencées par les contraintes résiduelles.
- Les caractéristiques magnétiques du matériau.

- **Influence de la fréquence :** Dans le cas des contraintes périodiques, on voit apparaître alors un cycle d'hystérésis de la déformation en fonction de la contrainte dont l'inclinaison varie avec la fréquence des cycles. Si cette fréquence augmente, la déformation plastique maximale atteinte pour une même amplitude de la contrainte diminue et, par suite, l'endurance se trouve augmentée, tout au moins tant que cette augmentation de fréquence n'entraîne par un échauffement de l'éprouvette. Inversement, si la fréquence diminue, il en sera de même de l'endurance, principalement à cause de l'effet d'environnement.

I.9.5- Facteur de l'environnement :

- *Influence de la température* : La limite d'élastique et la résistance à la traction diminuant lorsque la température s'élève, il en sera de même de la limite d'endurance [12].

- *Fatigue sous corrosion* : On rencontre très fréquemment la fatigue-corrosion sur des pièces travaillant dans des conditions assez peu agressives en apparence, à titre d'exemple, les eaux saumâtres ou salées, les divers milieux acides [12].

*Chapitre II. Méthodes
d'essais pour
l'estimation de la
limite d'endurance*

II. Méthodes d'essais pour l'estimation de la limite d'endurance

II.1. Introduction

La dispersion des résultats des essais de fatigue est acceptée aujourd'hui, à la fois comme un fait d'expérience et comme un fait physique. Attribuée autrefois, selon un mode de pensée déterministe, aux seules imperfections des conditions d'essai et supposée, par voie de conséquence, réductible, on la considère maintenant comme un des aspects physiques du phénomène. De plus, d'un point de vue pratique, il est souvent impossible ou trop coûteux de supprimer totalement certaines causes d'erreurs expérimentales même si, en théorie, elles peuvent l'être. L'action simultanée de ces deux sortes de causes se traduit alors par une dispersion des résultats d'essais dont l'ordre de grandeur est rarement négligeable par rapport aux quantités à mesurer mais, au contraire, le plus souvent important et quelquefois, considérable.

La figure II.1 donne un exemple de la dispersion observée au cours d'essais sur éprouvettes en acier.

C'est pourquoi, 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 et l'écart-type correspondant, soit de tracer la courbe qui relie l'amplitude de la contrainte cyclique aux nombres de cycles à rupture.

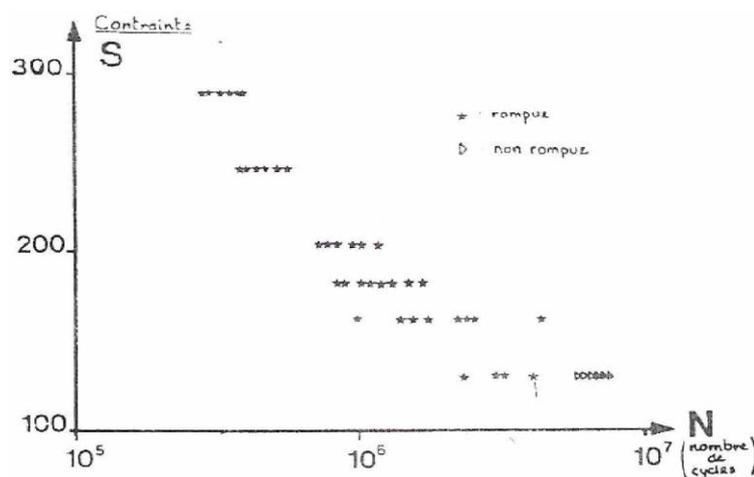


Figure II.1 Présentation des résultats d'essais sur un diagramme de Wöhler (S-log N)

[10].

La résistance à la fatigue est conditionnée par de nombreux facteurs, en particulier, les conditions d'application des sollicitations cycliques peuvent modifier sensiblement la résistance à la fatigue d'une pièce ou d'une structure.

Par ailleurs, de nombreuses études montrent que l'endurance d'un matériaux est relié à sa résistance et à sa ductilité.

C'est pourquoi, dans le cas des aciers, plusieurs auteurs ont proposé une estimation grossière de la limite d'endurance en corrélant celle-ci aux caractéristiques mesurées au cours d'un essai de traction.

Ce texte à pour but, d'une part, de présenter les principales méthodes statistiques qui peuvent être utilisées pour caractériser le comportement en fatigue sous chargement simple d'un matériau à partir de résultats d'essai, d'autre part, de préciser l'influence des conditions des sollicitations cycliques [10].

II.2. Nature et aspect de la dispersion des résultats d'essais de fatigue

L'aspect de la dispersion observée résulte directement de sa nature et de ses causes physiques que l'on peut logiquement répartir en trois classes :

- 1) internes au matériau.
- 2) dues ou liées à la préparation des éprouvettes ou des pièces.
- 3) extérieures à l'éprouvette.

La nature et le mode d'action des causes des catégories 2) et 3) apparaissent avec le plus d'évidence. Les opérations de mise en forme par tournage, fraisage, rectification, par exemple, qui tombent dans la seconde catégorie ont une influence bien connue sur l'endurance des pièces, de même que les traitements thermiques qu'il n'est jamais possible de reproduire de façon rigoureusement identique sur toutes les éprouvettes d'une même série.

Les causes de dispersion extérieures aux pièces comprennent notamment les incertitudes de montage dans les machines d'essais et de réglage de la charge appliquée, de la fréquence des cycles, ...etc., même l'influence de l'environnement peut ne pas être négligeable.

Les causes de dispersion dont le mécanisme d'action est le mal connu sont celles de la première catégorie: inclusions, hétérogénéité de structure, ...etc.

Elles ne sont d'ailleurs pas indépendantes de celle de la catégorie 2) car les opérations de préparation peuvent modifier le matériau et son hétérogénéité (les traitements thermiques notamment). Enfin, le mécanisme même de l'endommagement fait inter réagir les diverses causes de dispersion entre elles.

L'expérience a montré que le résultat de ces actions combinées se traduit généralement par une forme caractéristique des réponses à la contrainte.

Un nombre de cycles de sollicitation N , ayant été fixé (figure II.2.a) et l'évènement observé étant la rupture ou la non-rupture de l'éprouvette avant ce nombre de cycles, on appelle courbe de réponse à la contrainte la courbe représentative de la probabilité de cet évènement en fonction de l'amplitude de cycles.

On a pu montrer par diverses méthodes que ses courbes sont des sigmoïdes normales représentables par la fonction:

$$P(S) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^S \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (1)$$

Dans laquelle, μ représente l'amplitude de contrainte pour laquelle la probabilité de rupture est égale à 0,5 et σ le paramètre caractéristique de dispersion ou contrainte.

Diverses méthodes utilisées pour traiter les résultats d'essais de fatigue ont pour but d'estimer les paramètres μ et σ d'une courbe de réponse à la contrainte, pour un nombre de cycle donné.

L'estimation σ_D de la limite d'endurance conventionnelle et s de l'écart-type de la zone d'endurance en est un cas particulier (figure II.2.a) [10].

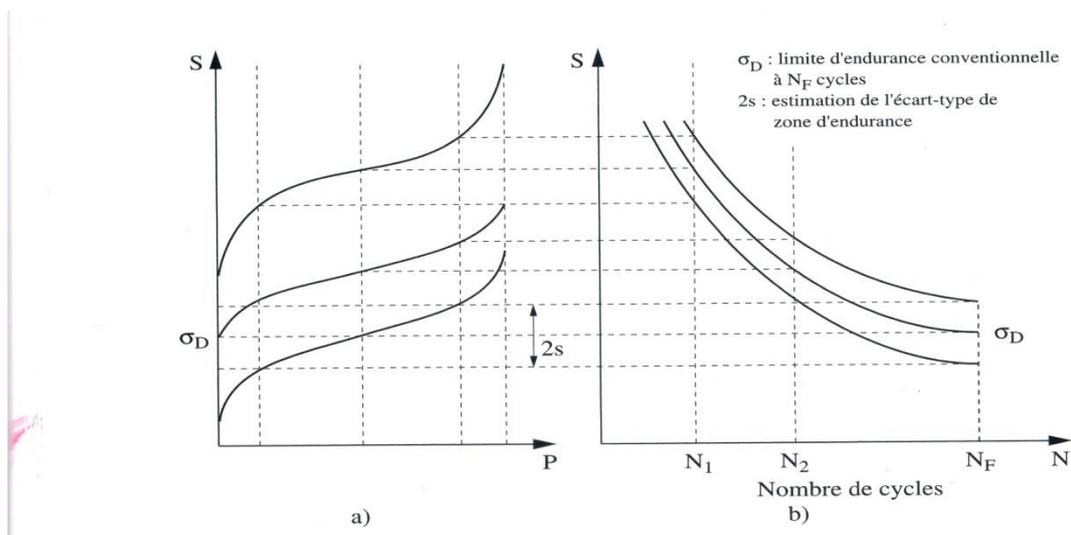


Figure II.2a Tracé des 3 courbes de réponse à la

Figure II.2b Tracé des courbes d'isoprobabilité ($p = 0.16$; $p = 0.5$; $p = 0.84$)

contrainte sur un diagramme de Wöhler [10].

II.3. Méthodes d'estimation approchée

II.3.1. Méthode de reclassement des données

II.3.1.1. Principe

Les essais sont effectués à des contraintes régulièrement espacées, allant des ruptures quasi-certaines aux non ruptures quasi-certaines [23].

On utilise à chaque niveau d'essai le même nombre d'éprouvettes, une ou deux en général.

On ne retient des résultats expérimentaux, que le caractère "rompue" ou "non rompue".

Les données sont ensuite reclassées, en attribuant aux niveaux supérieurs les éprouvettes rompues et aux niveaux inférieurs les éprouvettes non rompues.

On prend alors comme limite d'endurance estimée, la contrainte qui sépare les éprouvettes reclassées en deux groupes : les "rompues" et les "non rompues"

II.3.1.2. Condition d'exécution de la méthode

Les niveaux de charge choisis doivent encadrer la limite d'endurance présumée et le pas d'échelonnement des charges doit être de l'ordre de grandeur de l'écart-type supposée.

II.3.1.3. Validité de la méthode

La méthode de reclassement des données n'est qu'une méthode de dégrossissage. Elle nécessite un nombre déjà important d'éprouvette : si on utilise deux éprouvettes par niveau, avec 7 ou 8 niveaux, cela conduit à une quinzaine d'éprouvettes. Pour cette raison, cette méthode n'est pas ou peu utilisée, car pour un tel nombre d'éprouvettes d'autres méthodes donnent des résultats beaucoup plus précis [23].

II.3.2. Méthode des K éprouvette non-rompues [10]

Cette méthode consiste à rechercher par paliers de contraintes successives décroissantes en progression arithmétique, un niveau auquel K éprouvettes, donnent K non rompues.

II.3.2.1. Condition d'exécution de la méthode

On choisit un niveau de départ σ_i situé sensiblement au-dessus de la limite d'endurance présumée, et on effectue les essais un par un, en choisissant le niveau de contrainte de la manière suivante :

- si le dernier de ces n_i essais a donné lieu à une rupture, c'est au niveau σ_{i+1} que sera effectué l'essai suivant (σ_{i+1} est le niveau de contrainte immédiatement inférieur au niveau σ_i).

- si les n_i essais effectués au niveau σ_i ne présente que les non ruptures, l'essai suivant est réalisé au même niveau σ_i à condition que $n_i < K$, K étant choisi par avance. Si $n_i = K$, les essais sont arrêtés et la limite d'endurance recherchée est ce dernier niveau d'essai pour lequel on a obtenu K non ruptures.

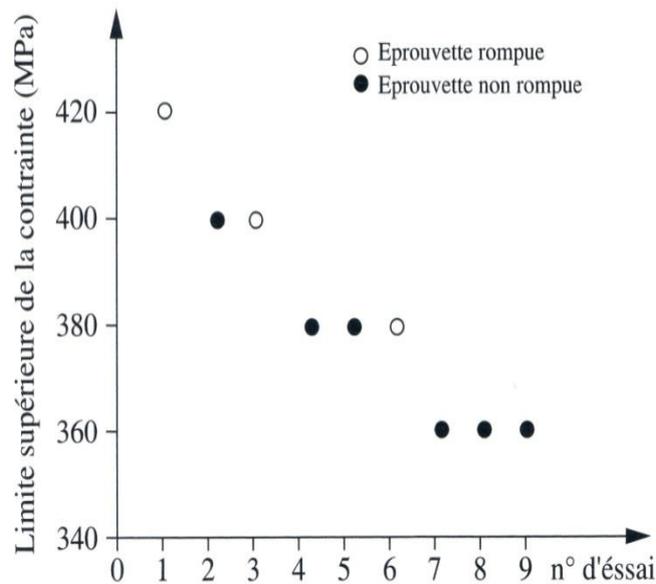
Généralement, on prend $K=3$, d'où le nom de la méthode dite des "3 éprouvettes".

On trouvera ci-dessous un exemple de la méthode pour $K=3$ éprouvette.

II.3.2.2. Validité de la méthode

Cette méthode reste, elle aussi, une méthode de dégrossissage. Le nombre de niveaux et le nombre d'éprouvettes sont tels que la méthode perd de son intérêt. Comme dans la plupart des méthodes présentées ici, le pas choisi pour l'échelonnement des chartes doit être approximativement de l'ordre de l'écart-type. Alors pour $K=3$ les calculs statistiques montrent qu'il faut en moyenne huit éprouvettes pour réaliser complètement la procédure.

Ordre du Niveau d'essai	Niveau de contrainte alternée $\pm \sigma_{ai}$	Résultats obtenues (dans leur ordre d'apparition)
1	34	1 éprouvette rompue
2	36	1 éprouvette rompue
3	32	1 éprouvette non rompue 1 éprouvette rompue
4	30	1 éprouvette non rompue 1 éprouvette rompue
5	28	3 éprouvettes non rompues

Tableau II.1 la distribution des éprouvettes sur les différents niveaux de contraintes**Figure II.3** Méthode des K éprouvettes non-rompues [10]

II.4. Méthode d'estimation de la limite d'endurance à N cycles de précision moyenne ou de bonne qualité

II.4.1. Méthode des "Probits"[09]

II.4.1.1. Principe

Pour un nombre de cycles maximal N , choisi à l'avance, on effectue des essais par niveaux et on détermine la proportion P d'éprouvettes rompues avant le nombre de cycle N , choisi à chaque niveau de contrainte.

La variation de P est portée en fonction de la contrainte d'essai sur un graphique à échelle galtonienne, de manière à tenir une droite de Henry pour le nombre de cycles N considéré. Cette droite permet de déterminer le niveau de contrainte pour lequel on obtient 50 % d'éprouvettes non rompues, c'est-à-dire la limite d'endurance recherchée. La droite de Henry permet également de déterminer l'écart-type de la zone d'endurance. Entre les niveaux de contrainte correspondant à 16% et 84% de rupture, la théorie précise, en effet, qu'il y a un écart de 2 fois l'écart-type.

II.4.1.2. Condition d'exécution de la méthode

On choisit des niveaux de contraintes régulièrement espacés d'un pas correspondant à l'écart-type présumé. Les niveaux doivent encadrer la limite d'endurance supposée.

La méthode nécessite l'essai d'au moins 80 éprouvettes (de préférence plus), réparties par tirage au sort sur 4 ou 5 niveaux.

II.4.1.3. Validité de la méthode [09]

C'est la méthode qui conduit à la meilleure précision de la limite d'endurance, mais aussi de l'écart type.

Malheureusement, le nombre élevé d'éprouvettes nécessaires, la rend trop coûteuse et elle n'est pratiquement jamais utilisée pour cette raison.

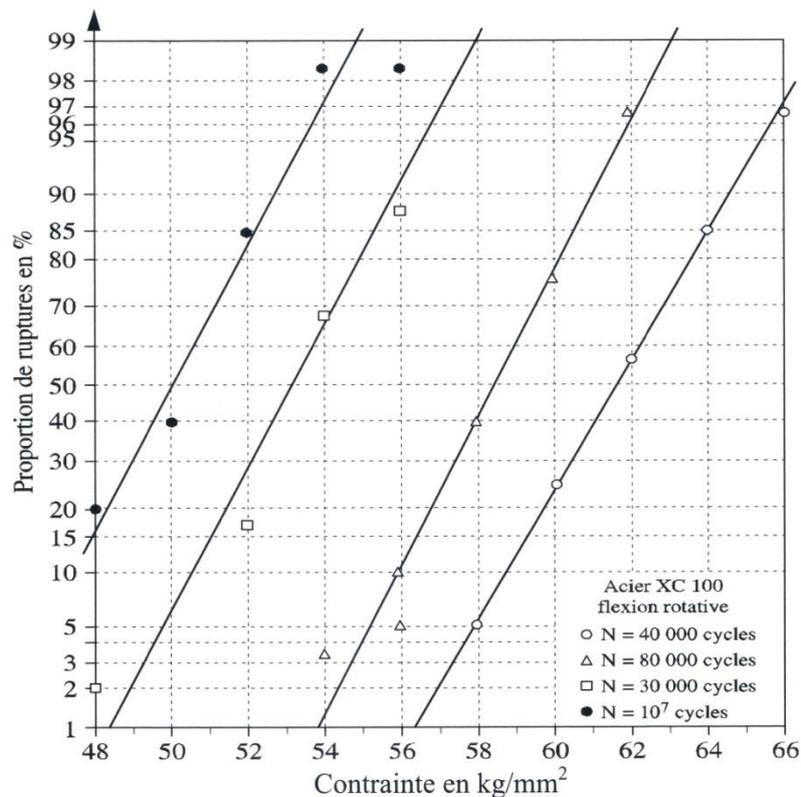


Figure II.4 Droite de Henry [10]

II.4.2. Méthode de l'escalier

Les inconvénients de la méthode des "Probits" ont conduit à rechercher d'autres méthodes d'application plus aisées et, si possible, plus économiques [10].

Dixon et Mood ont proposé la méthode dite de "l'escalier". Elle simplifie beaucoup la recherche des niveaux de contraintes d'essai, qui s'effectue automatiquement, et laisse à l'utilisateur une grande latitude quant au choix du nombre d'essai qui peut être beaucoup plus faible qu'avec la méthode des probits. Si la méthode est exécutable avec un faible nombre

d'essais, il ne faut toutefois pas perdre de vue que la précision (justesse et fidélité) du résultat obtenu en dépendra fortement.

II.4.2.1. Règle d'exécution de la méthode de l'escalier

Comme pour la méthode des Probits, on fixe une durée maximale d'essai N et l'on définit un échelonnement d'amplitude de contrainte en progression arithmétique dont le pas soit de l'ordre de grandeur de l'écart-type σ de la courbe de réponse.

Le premier essai sera effectué au niveau de cet échelonnement jugé à priori, le plus voisin de la médiane μ cherchée. A partir du second essai, le niveau d'amplitude de la contrainte est ainsi choisi :

- si l'essai précédent s'est traduit par une non-rupture, choisir, pour le nouvel essai à effectuer, le palier de contrainte de l'échelonnement adopté immédiatement supérieur à celui utilisé lors du dernier essai ;

- si l'essai précédent s'est traduit par une rupture, choisir, à l'inverse, le palier immédiatement inférieur.

En d'autres termes, d désignant le pas de l'échelonnement des contraintes et S_i la valeur adoptée pour le i -ième essai, on prendra :

$S_{i+1} = S_i + d$ si la i -ième éprouvette essayée ne s'est pas rompue.

$S_{i+1} = S_i - d$ si cette i -ième éprouvette s'est rompue.

Les essais se poursuivent selon cette règle, les uns à la suite des autres, jusqu'à épuisement des n éprouvettes que l'on décidé d'y consacrer.

La figure II.5 donne un exemple d'une série de tels essais [10].

II.4.2.2. Utilisation des résultats

Les résultats d'essais obtenus par cette méthode permettent d'estimer la résistance médiane à la fatigue au nombre de cycles fixé et, en principe, l'écart type. Les calculs à effectuer sont simples. On détermine d'abord le type d'évènement qui s'est produit le moins fréquemment au cours de la série d'essai : rupture ou non-rupture.

Les résultats de se type suffisent, en effet, au calcul et sont retenus de préférence aux autres, le fait que les résultats d'un type donné (les ruptures par exemple) soient plus nombreux que les autres étant souvent dû au choix d'un niveau de départ éloigné de la valeur

à estimer. La séquence débute alors par une suite ininterrompue de résultats de même type dont l'inclusion entraînerait une erreur systématique.

On compte le nombre N_i des réalisations de cet évènement à chaque niveau d'essai puis on numérote ces niveaux en attribuant la valeur $i = 0$ au plus faible de ceux auxquels il a été observé au moins une fois. i désignant le numéro du niveau d'essai, il faut alors calculer les quantités :

$$N = \sum_i N_i, \quad A = \sum_i i \cdot N_i \quad \text{et} \quad B = \sum_i i^2 \cdot N_i$$

Le tableau de la figure II.5 montre comment effectuer le calcul de ces quantités dans un cas où les résultats retenus se rapportent aux ruptures.

L'estimation m de μ est obtenue par la formule suivante :

$$m = S_0 + d \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

Dans laquelle :

S_0 : niveau d'indice 0 tel que défini plus haut (le plus faible des niveaux utilisés auquel on a obtenu au moins résultat du type retenu) ;

d : espacement des niveaux.

Avec :

+1/2 si le calcul est basé sur les contraintes d'essai des éprouvettes non rompues.

-1/2 s'il est basé sur les contraintes d'essai des éprouvettes rompues.

La méthode de l'escalier permet aussi d'obtenir une estimation s de l'écart-type σ de la courbe de réponse à la contrainte :

$$S = 1,62d \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0,029 \right) \quad (3)$$

Selon Dixon et Mood la formule (3) ne peut être utilisée qu'à condition que :

$$\frac{NB - A^2}{N^2} > 0,3 \quad (4)$$

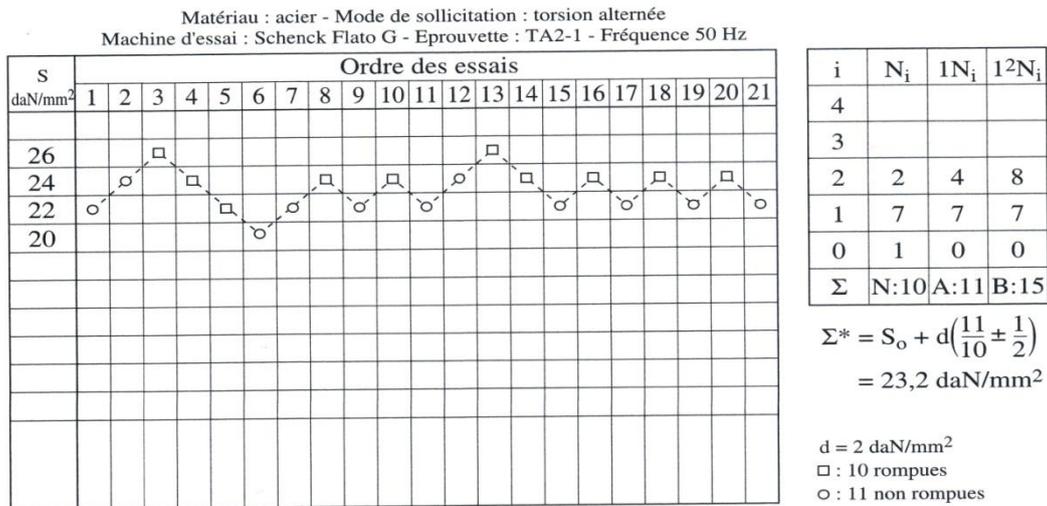


Figure II.5 Méthode de l'escalier

En fait, l'estimation, par la méthode de l'escalier, de l'écart-type de la courbe de réponse à la contrainte ne doit être considérée qu'avec beaucoup de prudence si le nombre d'essai n'est pas au moins égal à 50. L'estimation de cet écart-type n'est, en fait, pas meilleure, à nombre d'essai égal, que celle qu'on obtiendrait par la méthode des Probits.

II.4.2.3. Précision de m et s

L'estimation m de μ est distribuée normalement avec un biais négligeable et un écart-type :

$$\sigma_m = \frac{G}{\sqrt{N}} \tag{5}$$

Où : G est un facteur dépendant du rapport d/σ :

$$G = 1 + \frac{d}{8\sigma} \tag{6}$$

L'estimation s de σ représente un biais important, fonction de d/σ . La dispersion de s est également fonction de d/σ . Pour d = σ , où elle est voisine de son minimum, la précision de l'estimation de l'écart-type σ est sensiblement équivalente à celle d'une estimation basée sur des données quantitatives dont les degrés de liberté serait N/3,5.

II.4.2.4. Remarque sur l'application pratique de la méthode de l'escalier

Dans le paragraphe "règle d'exécution de la méthode de l'escalier", on a simplement indiqué que l'espacement d devait être de l'ordre de grandeur de σ . En pratique, l'estimation m de μ reste satisfaisante tant que :

$$\frac{1}{2} < \frac{d}{\sigma} < 2$$

L'estimation m de σ , déjà peu satisfaisante dans les conditions optimales ($1 < d/\sigma < 1,5$), se détériore rapidement si l'on s'en éloigne [10].

II.4.3. Méthode d'itération

II.4.3.1. Principe

La méthode d'itération consiste à s'approcher par approximation successive de la limite de fatigue recherchée [16].

On tend par convergence vers la limite d'endurance σ_D à l'aide d'une formule de récurrence de la forme :

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \frac{2,5 * s}{i + 1} (0,5 - p_i)$$

Dans laquelle :

σ_i, σ_{i+1} : contraintes à appliquer successivement lors de l'essai ;

S : écart-type supposé au départ de l'essai ;

P_i : proportion de ruptures observées à ce niveau de charge.

II.4.3.2. Condition d'exécution de la méthode

Le choix du niveau de départ est, ici, très important. Si le premier niveau est très éloigné de la limite d'endurance recherchée. La méthode peut ne pas converger assez vite pour atteindre la valeur recherchée, le pas de l'échelonnement des charges successives étant ici décroissant par le principe même de la méthode. Le niveau de départ doit donc être aussi proche que possible de la limite d'endurance présumée.

Pour éviter les aléas, il est souhaitable d'essayer plusieurs éprouvettes (2 ou 3) à chaque niveau, de manière à calculer pour chaque niveau d'essai une proportion de ruptures P_i plus "sûre" que dans le cas d'une seule éprouvette.

Une autre amélioration de cette méthode consiste à accélérer sa convergence en ne changeant la valeur du pas, qui sépare les deux derniers niveaux d'essai, que lorsqu'on observe un changement de résultat (passage de non ruptures successives à une rupture ou réciproquement). Dans ce cas, on n'essaie qu'une éprouvette par niveau et on n'utilise la formule de récurrence pour calculer le nouveau pas qu'à chaque changement de réponse. La figure II.6 donne un exemple.

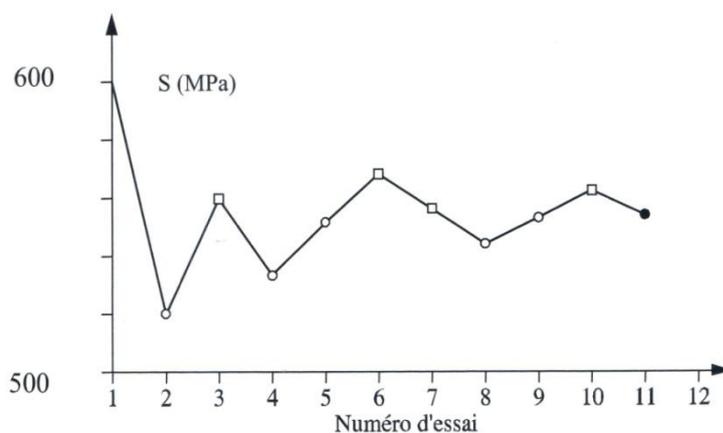


Figure II.6 Méthode d'itération [10]

II.4.3.2. validité de la méthode

Cette méthode nécessite 10 à 15 éprouvettes suivant le déroulement des essais. Il importe également d'avoir une bonne idée de la valeur de la limite d'endurance estimée, pour situer correctement le niveau de départ. Il importe également que l'estimation a priori de l'écart-type s utilisé dans la formule de récurrence ne soit pas trop éloignée de la réalité. Ces précautions nécessaires rendent donc la méthode difficile d'utilisation, bien qu'elle conduise à un degré de précision acceptable dès que l'on utilise 12 à 15 éprouvettes et que la convergence s'effectue normalement.

Dans tout les cas, il faudra utiliser cette méthode avec plusieurs essais par niveau ou employer la méthode accélérée [25].

II.5. Estimation de s

Les valeurs de l'écart-type, s , de la zone d'endurance obtenues au cours de l'étude précédente, sont assez dispersées [09]. Cette variation est due notamment à la méthode de dépouillement utilisée.

Les résultats montrent cependant une augmentation moyenne de s lorsque R_m croît : on peut admettre comme valeur indicative $s = 0,02 R_m$ [5].

II.6. Conclusion

La dispersion des résultats d'essai de fatigue, liée, soit à la nature du matériau, soit aux conditions expérimentales, nécessite l'utilisation de méthodes d'analyses statistiques appropriées, lors du dépouillement des résultats d'essais.

Pour estimer la résistance à la fatigue à N cycles et son écart-type, plusieurs méthodes sont proposées [10]:

- la méthode de reclassement des données ;
- la méthode des K éprouvettes non rompues.
- la méthode dite des probits ;
- la méthode de l'escalier ;
- la méthode d'itération.

Ces méthodes requièrent un nombre d'éprouvettes minimal et des conditions de mise en œuvre différentes qui permettent d'obtenir une précision des estimations variables.

Dans le cas des aciers, une estimation grossière de la limite d'endurance à partir d'un simple essai de traction est souvent nécessaire. Différentes relations empiriques sont proposées.

Le meilleur accord entre valeurs expérimentales et valeurs calculées est obtenu en reliant la limite d'endurance à la résistance à la traction et à l'allongement à rupture.

Chapitre III. Choix du matériau et dispositifs d'essais

III. Choix du matériau et dispositif d'essais

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

Pour déterminer le comportement d'un type d'acier sous le phénomène de fatigue, nous avons choisi l'acier **A60** de 15 mm de diamètre qui présente les meilleures dimensions pour l'usinage des éprouvettes.

Type d'acier : barre ronde de Ø15 mm.

III.1 Propriétés et domaine d'utilisation (application)

L'**A60** est un acier à usage courant en mécanique générale. Non traité, il offre une bonne résistance mécanique (R_m).

Acier de construction non allié d'usage général, non effervescent. L'analyse chimique n'est pas définie par la norme et ne garantit pas d'éventuels traitements thermiques.

Pièces soumises à de fortes pressions de surface, vis sans fin, pignons, clavettes, axes, bagues..... [17].

III.2 Composition chimique de l'acier

III.2.1 Moyen de détection

La détection de la composition chimique de l'acier choisi est faite dans le laboratoire de physique d'ERIS (établissement des réalisations industrielle de Seriana) à moyen d'un spectromètre de masse à moyenne de deux étincelles sur 02 lopins de 15 mm de diamètre.

III.2.2 Composition chimique

Les composants de l'acier choisi en % sont :

Indices	C	C _r	M _n	S _i	P
Résultats %	0,53	0,138	0,718	0,234	0,0155

Tableau (III.1) la composition chimique de l'acier A60.

Ces résultats sont conformes aux normes de livraison [26].

III.3 Caractérisation mécaniques

Pour contenter l'étude du phénomène de fatigue sur l'acier détenu, quelques données de traction étaient nécessaires.

III.3.1 Les essais de traction

Ils ont été réalisés au laboratoire de RDM d'ERIS (établissement des réalisations industrielle de Seriana) sur une machine d'essai de matériaux, modèle : Form+test (SEIDNER) type : UTM 120 qui fonctionne dans les conditions suivantes :

* Conditions relatives au secteur :

Tension : 220V courant alternatif, monophasé avec prise de terre de protection ou 380 V courants triphasés avec fil neutre et prise de terre de protection.

Variation de tension : $\leq \pm 10 \%$.

Chute momentanée de tension < 20 ms.

Fréquence : $60 \text{ Hz} \pm 1\%$.

Terre de protection : résistance de mise à la terre $\leq 5 \Omega$

* Condition relatives à la température

Etendue admise pour la :

Température ambiante : $+18^\circ$ à 28°c suivant DIN 50 014.

Humidité de l'air : $< 60 \%$.

* Conditions relatives à l'environnement :

Le lieu d'installation est peu poussiéreux et à l'abri de toute humidité (eau, huile), il faut éviter les chocs et les vibrations ; le cas échéant, il faut installer des plaques d'amortissement, des amortisseurs de vibrations ou semblables.

III.3.2 Eprouvette

Les éprouvettes sont normalisées et ont les dimensions représentées dans la figure

III.3. 3 Résultats des essais

A% : Allongement après rupture en %.

C'est le pourcentage d'allongement après rupture par rapport à la section initiale.

$$A\% = \frac{L-L_0}{L_0} * 100$$

$$A_{(1)} \% = 16\%$$

$$A_{(2)} \% = 14\%$$

$$A_{(3)} \% = 18\%$$

R_e : Limite élastique en N/mm^2 .

La **limite d'élasticité** est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

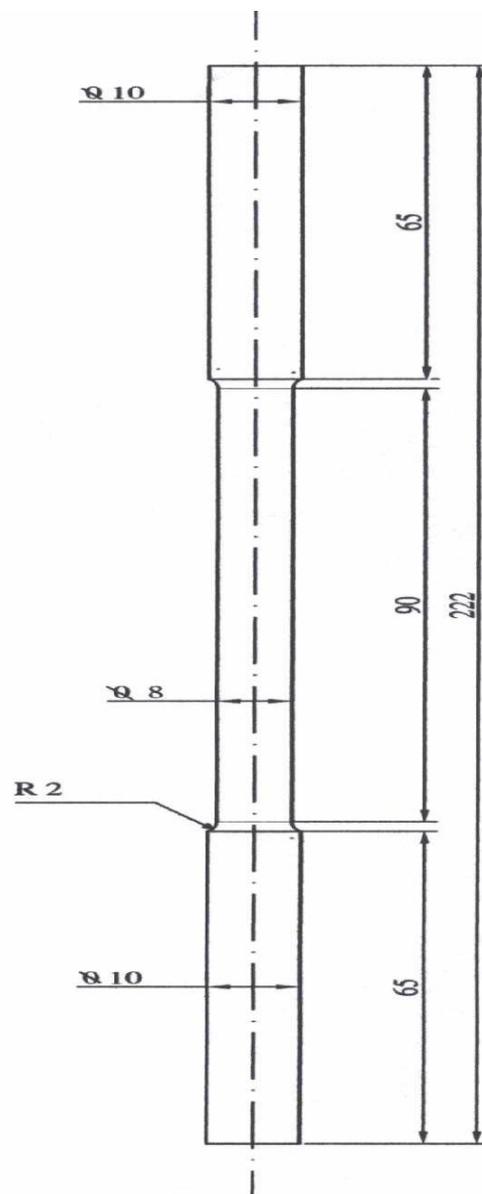


Figure III.1 Eprouvette d'essai de traction

L'effort de traction est tel que tout dépassement de cet effort de traction a pour effet de provoquer des déformations résiduelles irréversibles dans la matière qui l'a subi.

$$Re(1) = 335 \text{ N/mm}^2.$$

$$Re(2) = 320 \text{ N/mm}^2.$$

$$Re(3) = 330 \text{ N/mm}^2.$$

Rm : Résistance à la rupture (Résistance mécanique) en N/mm^2 .

Effort de traction à partir duquel la matière se brise en deux parties.

$$Rm(1) = 710 \text{ N/mm}^2.$$

$$Rm(2) = 660 \text{ N/mm}^2.$$

$$Rm(3) = 685 \text{ N/mm}^2.$$

E : Module d'Young (Module d'élasticité).

D'après la loi de Hook : $\sigma = E \cdot \varepsilon \Rightarrow E = \sigma / \varepsilon$

Où : σ ; la contrainte appliquée et ε ; la déformation apparaît.

$$E(1) = 213800 \text{ N/mm}^2.$$

$$E(2) = 213100 \text{ N/mm}^2.$$

$$E(3) = 213500 \text{ N/mm}^2.$$

Module d'élasticité longitudinale $E = 213000 \text{ N/mm}^2$

III.4 Machine d'essai de fatigue

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

Le laboratoire de la résistance des matériaux (RDM) du département de génie mécanique de l'université de Lhaj lakhdar de Batna contient une machine d'essai de fatigue en flexion rotative modèle : SHIMADZOU FREQUOL-Z200

- courant alternatif : 220 V
- fréquence : 50/60 Hz

- charge maximale : 500 N
- échelle de graduation : 5 N
- environnement : air ambiant
- température : ambiante

III.4.1 Description de la machine

La figure III.2.1 et la figure III.2.2 montre la machine d'essai de fatigue en flexion rotative SHIMADZOU FREQUOL-Z200



Figure III.2.1 La machine d'essai de fatigue SHIMADZOU FREQUOL-Z200

Repère	Désignation	Repère	Désignation
01	Châssis	06	mandrin
02	Tableau de commande	07	Palier lisse
03	Compteur	08	Eprouvette

04	Moteur électrique	09	La charge appliquée
05	Arbre de transmission	10	Poids de la charge

Tableau (III.2) description de la machine d'essais de fatigue

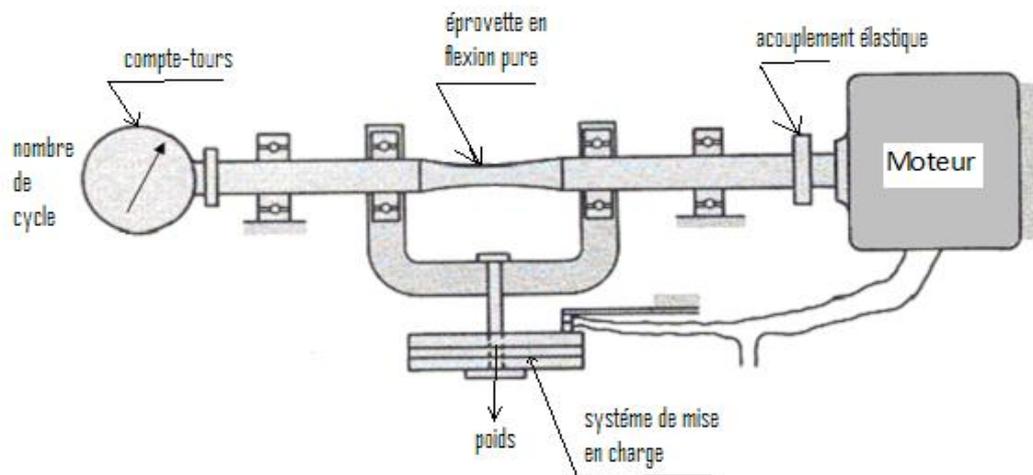


Figure III.2.2 Schéma montre l'application de charge sur l'éprouvette.

III.4.2. Instructions

A. Connecter la machine d'essai de fatigue à l'alimentation électrique par le générateur (11).

B. mettre le nombre de cycle au tableau de commande (02) à zéro.

C. Insérer l'éprouvette désirée (6) aux mandrins (8) et assure que ses axe sont pivoté.

- Premièrement, desserrer le mandrin de l'arbre de transmission.

- Puis, faire introduire l'extrémité gauche de l'éprouvette à travers le trou du mandrin.

- Après, insérer l'extrémité droite de l'éprouvette dans le mandrin, et en fin on utilisant les clés pour serrer bien le mandrin.

F. Charger le support de charge par la charge désirée .

G. Allumer la machine.

H. A la rupture, la fin de course arrête automatiquement la machine, changer l'éprouvette rompue et recommencer les essais.

III.5. Epreuve d'essai

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

III.5.1. Forme

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

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

III.5.2. Dimensions

Elles dépendent de la capacité de la machine et de ces caractéristiques.

Dans ce travail nous avons choisi éprouvette qui à les dimensions données sur la figure III.3 :

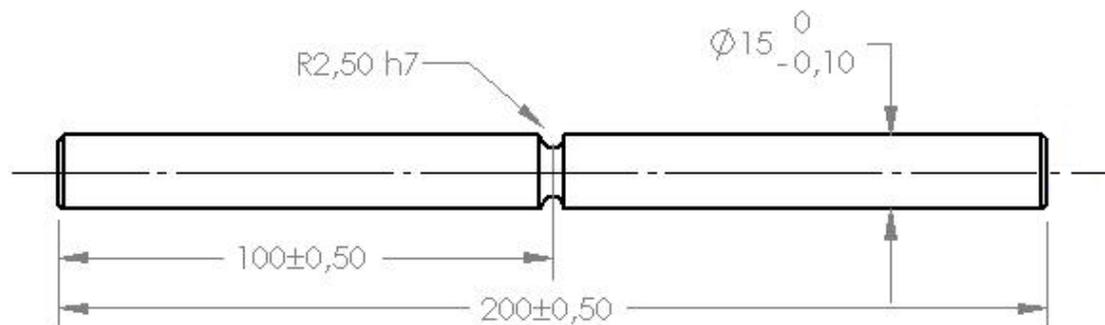


Figure III.3 Géométrie de l'éprouvette pour les essais de flexion rotative.

III.5.3. Usinage des éprouvettes

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

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

de l'état de surface et qui n'introduisent que des contraintes résiduelles et un écrouissage superficiel négligeable.

La finition des éprouvettes par polissage manuel, même longitudinal, doit donc être évité chaque fois que cela est possible [06].

Dans cette présente étude nous avons usiné nos éprouvettes dans les ateliers de fabrication de l'université de l'hadj lakhdar Batna par un tour modèle : *Breda*, type : **BRL-250**

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

III.6. Contrainte maximale de flexion

La contrainte maximale de flexion σ sur la fibre externe se calcule par la formule de Navier [9] :

$$\sigma = \frac{M_f}{M_i}$$

Avec : M_f : moment fléchissant par rapport à la section considérée.

$$M_f = F * L$$

F : la charge appliquée

L : longueur du bras de levier

Et :

$$M_i = \frac{I}{v}$$

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

v : distance de la fibre externe à la fibre neutre.

La figure III.4 montre les points d'application de la charge F sur l'éprouvette.

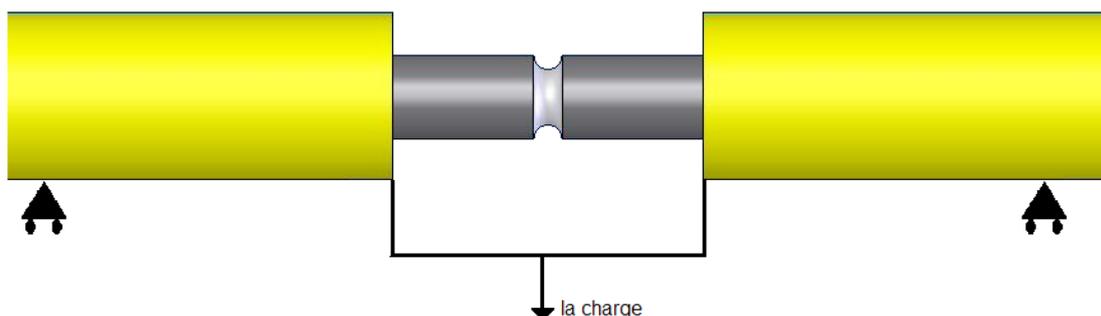


Figure III.4 Points d'application de la charge F

On a

$$\sigma_{max} \leq R_{pe}$$

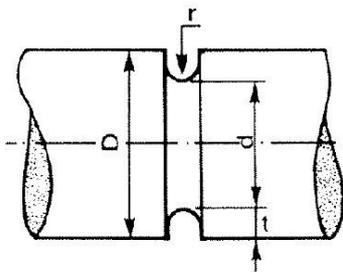
$$\sigma = \frac{M_{fz}}{I_{vz}/v} \leq R_{pe}$$

Et $\sigma_{max} = \sigma_0 \cdot K_{tf}$ avec

σ_0 : La contrainte nominale et.

K_{tf} : Le coefficient de concentration de contrainte.

Détermination de K_{tf} :



$$K_p = \sqrt{\frac{\frac{t}{r} \times \frac{d}{D}}{1 - \frac{d}{D}} + 1} - 1$$

$$K_q = \sqrt{\frac{t}{r}}$$

Figure III.5 : Détermination de K_{tf} pour arbre avec une gorge [26].

Pour le cas de flexion on a :

$$K_{tf} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{0,715K_p}\right)^2 + \left(\frac{1}{2K_q}\right)^2}} + 1$$

$$K_p = \sqrt{\frac{\frac{t}{r} \times \frac{d}{D}}{1 - \frac{d}{D}} + 1} - 1$$

$$K_q = \sqrt{\frac{t}{r}}$$

Avec : $D=15$, $d=10$, $r=4$, et $t=2,5$. \Rightarrow

$$K_p = \sqrt{\frac{2,5}{4} \times \frac{10}{15} + 1} - 1 = 0,5 \quad \text{Et} \quad K_q = \sqrt{\frac{2,5}{4}} = 0,79$$

$$\text{Donc} \quad K_{tf} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{0,715 \times 0,5}\right)^2 + \left(\frac{1}{2 \times 0,79}\right)^2}} + 1 = 1,348$$

Détermination de σ_0 :

$$\sigma_0 = \frac{M_f}{\frac{I}{v}}$$

$$M_f = \frac{P}{2} \times a \quad \text{Et} \quad \frac{I}{v} = \frac{\frac{\pi D^4}{64}}{\frac{D}{2}} = \frac{\pi D^3}{32} \Rightarrow$$

$$\sigma_0 = \frac{\frac{P}{2} \times a}{\frac{\pi D^3}{32}} = \left(\frac{16 \cdot a}{\pi D^3}\right) \cdot P \quad \text{Avec} \quad P = m \cdot g$$

Détermination de σ_{max} :

$$\sigma_{max} = \left(\frac{16 \cdot a}{\pi D^3}\right) \cdot m \cdot g \times 1,348$$

$$\text{On a } g = 10 \text{ mm/s}^2 \quad \text{et} \quad a = 200 \text{ mm}^2 \Rightarrow$$

$$\sigma_{max} = 4,073 \cdot \text{masse}$$

Chapitre VI. Résultats expérimentaux et interprétations

IV Résultats expérimentaux et interprétations

Pour déterminer la tenue à la fatigue de l'acier retenu, telle que la limite d'endurance et son écart-type, on a utilisé trois lots d'éprouvettes, de 51 éprouvettes au total, par des méthodes différentes.

IV.1. Lot no : 01

Ce lot est effectué par la méthode de reclassement des données. Nous avons utilisé 9 éprouvettes sur 9 niveaux différents, espacés de 12 N/mm².

Méthode de reclassement des données

- Matériau : Acier **A60**
- Machine d'essai : SHIMADZOU
- Modèle : FREQUOL-Z200
- Mode de sollicitation : flexion rotative (2100 tr/mn)
- Essai dans l'air

Eprouvette	Contrainte (N/mm ²)	Nombre de cycles	Résultat à 10 ⁶
1	186	31700	●
2	174	36800	●
3	162	76800	●
4	150	196700	●
5	138	358100	●
6	126	1.2×10 ⁶	●
7	114	2×10 ⁶	○
8	102	<2×10 ⁶	○
9	90	<2×10 ⁶	○

Tableau (IV.1) les résultats expérimentaux sur le lot no : 01.

● : éprouvette rompue.

○ : éprouvette non rompue

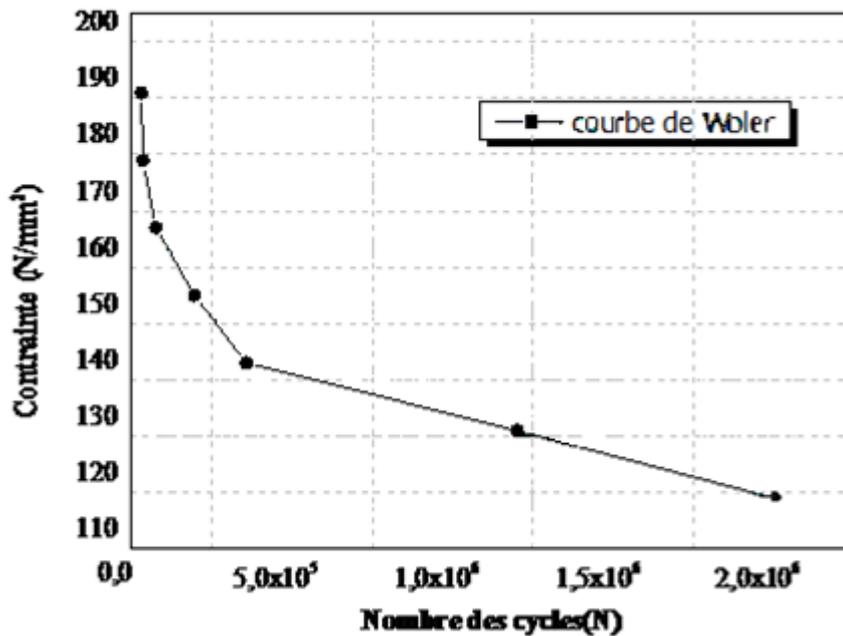
$$\sigma_D = \frac{114 + 126}{2} = 120 \text{ N/mm}^2$$

La limite d'endurance obtenue par cette méthode est: 120 N/mm^2 .

On voit qu'on a utilisé un faible nombre d'éprouvettes, cette méthode est très grossière, puisqu'elle donne, en effet, des valeurs de la limite d'endurance qui peuvent varier. Cette méthode simplifiée ne peut donc être que comme méthode de dégrossissage. Mm^2

Lorsqu'on utilise cette méthode avec un plus grand nombre d'éprouvettes, la précision obtenue est bien meilleure.

Cette valeur de la limite d'endurance (120 N/mm^2) obtenue lors de la première série des essais sera utilisée comme une charge du premier niveau dans les séries des essais suivantes.



Figure

IV.1 Tracé de la courbe de Wöhler du lot n°01

Pour le lot suivant on a utilisé la méthode de l'escalier avec 21 éprouvettes

IV.2. Lot no : 02

Méthode de l'escalier

- Matériau : Acier A60.
- Machine d'essai : SHIMADZOU

- Modèle : FREQUOL-Z200
- Mode de sollicitation : flexion rotative (2100 tr/mn)
- Essai dans l'air

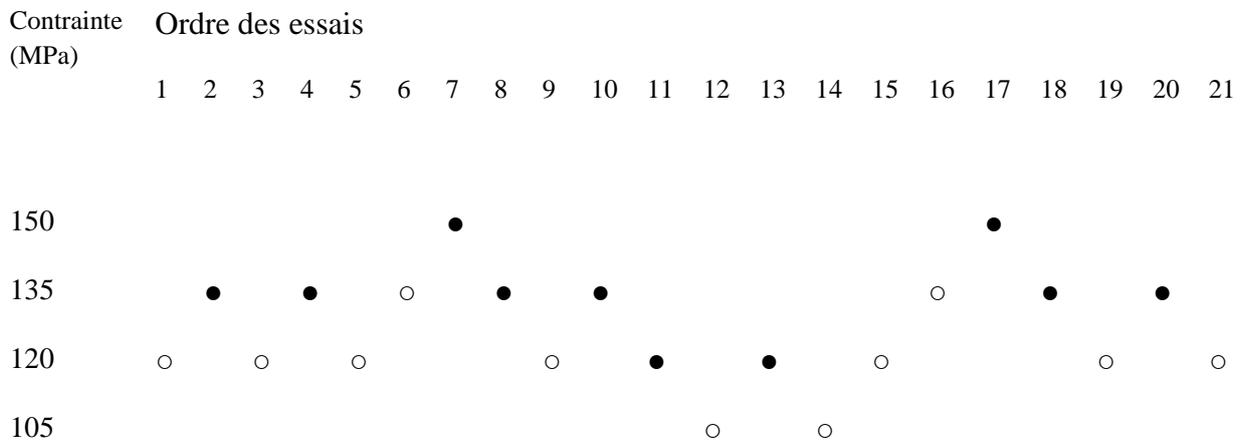


Tableau (IV.2) l'application de la méthode d'escalier sur le lot no : 2.

d = 15 N/mm²

● : éprouvette rompue = 10

○ : éprouvette non rompue = 11

Le calcul est basé sur les éprouvettes rompues.

σ_i (MPa)	i	N _i	i.N _i	i ² .N _i
150	2	2	4	8
135	1	6	6	6
120	0	2	0	0
105				
	Σ	N=10	A=10	B=14

L'estimation m de μ :

$$m = S_0 + d \left(\frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right)$$

$$= 120 + 15 \left(\frac{10}{10} - \frac{1}{2} \right)$$

$$m = 127,5 \text{ N/mm}^2$$

L'estimation s de l'écart-type σ de la courbe de réponse à la contrainte :

$$S = 1,62d \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0,029 \right)$$

$$= 1,62 * 15 \left(\frac{140 - 100}{100} + 0,029 \right)$$

$$S = 8,055 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{On a : } \frac{NB - A^2}{N^2} = 0,4 > 0,3$$

L'estimation m de μ est distribuée avec un biais négligeable et un écart-type :

$$\sigma_m = \frac{G}{\sqrt{N}}$$

$$G = 1 + \frac{d}{8\sigma}$$

$$G = 1 + \frac{15}{8(8,055)}$$

$$G = 1,232$$

$$\Rightarrow \sigma_m = \frac{1,232}{\sqrt{10}}$$

$$\sigma_m = 0,389$$

On a :

$$\frac{1}{2} < \frac{d}{\sigma} = 1,862 < 2$$

Donc l'estimation m de μ est satisfaisante.

IV.3. Lot no : 03

Méthode de l'escalier

- Matériau : Acier **A60**.
- Machine d'essai : SHIMADZOU

- Modèle : FREQUOL-Z200
- Mode de sollicitation : flexion rotative (2100 tr/mn)
- Essai dans l'air

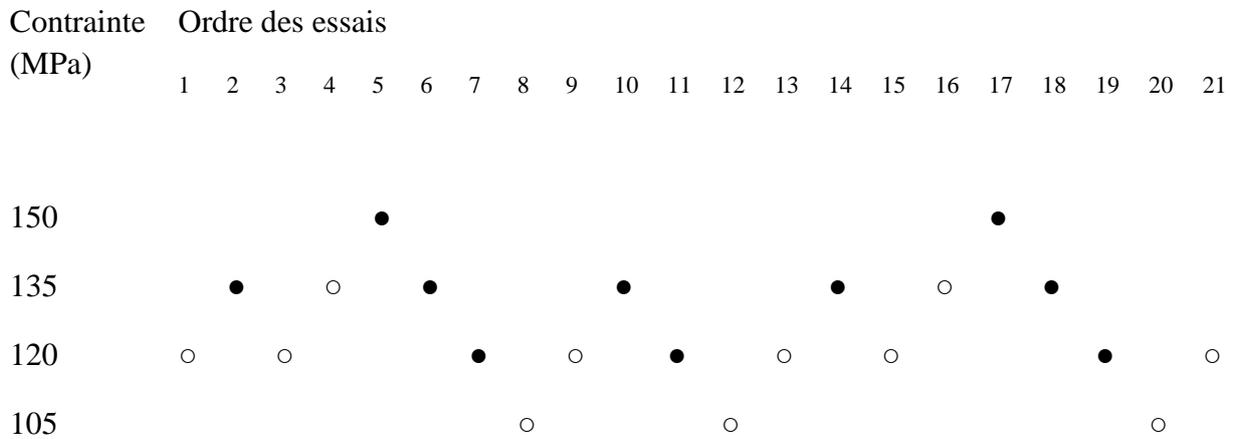


Tableau (IV.3) l'application de la méthode d'escalier sur le lot no : 03.

$d = 15 \text{ N/mm}^2$

● : éprouvette rompue = 10

○ : éprouvette non rompue = 11

Le calcul est basé sur les éprouvettes rompues.

σ_i (MPa)	i	N_i	$i.N_i$	$i^2.N_i$
150	2	2	4	8
135	1	5	5	5
120	0	3	0	0
105				
	Σ	$N=10$	$A=9$	$B=13$

L'estimation m de μ :

$$m = S_0 + d \left(\frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right)$$

$$= 120 + 15 \left(\frac{9}{10} - \frac{1}{2} \right)$$

$$m = 126 \text{ N/mm}^2$$

L'estimation s de l'écart-type σ de la courbe de réponse à la contrainte :

$$S = 1,62d \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0,029 \right)$$

$$= 1,62 * 15 \left(\frac{130 - 81}{100} + 0,029 \right)$$

$$S = 9,405 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{On a : } \frac{NB - A^2}{N^2} = 0,49 > 0,3$$

L'estimation m de μ est distribuée avec un biais négligeable et un écart-type :

$$\sigma_m = \frac{G}{\sqrt{N}}$$

$$G = 1 + \frac{d}{8\sigma}$$

$$G = 1 + \frac{15}{8(9,405)}$$

$$G = 1,199$$

$$\Rightarrow \sigma_m = \frac{1,199}{\sqrt{10}}$$

$$\sigma_m = 0,379$$

On a :

$$\frac{1}{2} < \frac{d}{\sigma} = 1,594 < 2$$

Donc l'estimation m de μ est satisfaisante.

IV.4. Recherche de la durée de vie

L'allure générale du diagramme (S, N) est donnée par les résultats des essais de la méthode de reclassement des données et la courbe de Wöhler est représentée sur la figure IV.1.

Pour ajuster cette courbe, on utilise l'équation de Stromeier. Cette équation est nettement plus réaliste que celle de Wöhler et s'écrit sous la forme :

$$\text{Log } N = a - b \text{ Log } (\sigma - \sigma_D)$$

Avec :

a et b : deux constantes inconnues ;

σ_D : limite d'endurance estimée à 10^6 cycles ;

N : nombre de cycles à rupture ;

σ : amplitude de la contrainte appliquée.

L'estimation de a et b se d'après les résultats expérimentaux. Pour cela, on peut appliquer la méthode des moindres carrées.

La forme linéaire de l'équation de Stromeyer est :

$$\text{Log } N = a - b \text{Log } (\sigma - \sigma_D)$$

$$Y = A + BX$$

Avec :

$$Y = \text{Log } N \text{ et } X = \text{Log } (\sigma - \sigma_D) \text{ à condition que : } \sigma - \sigma_D > 0.$$

Pour chaque valeur de $\text{Log } N_i$ et de $\sigma_i - \sigma_D$, on a :

$$Y_i = A + BX_i$$

La résolution du système linéaire à deux équations :

$$B \sum_{i=1}^n x_i^2 + A \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i = 0$$

$$B \sum_{i=1}^n x_i + n \cdot A - \sum_{i=1}^n y_i = 0$$

Nous permet de déterminer A et B.

Il reste à déterminer les quantités :

$$\sum_{i=1}^n x_i^2, \quad \sum_{i=1}^n x_i, \quad \sum_{i=1}^n x_i y_i, \quad \sum_{i=1}^n y_i$$

Le tableau IV.1 montre comment effectuer le calcul de ces quantités :

N°éprouvette	$\sigma_i - \sigma_D$	$\log \sigma_i - \sigma_D$	Nombre de cycles N	$\log N_i$	$x_i \cdot y_i$	x_i^2
		x_i		y_i		

1	66	1,8195	31700	4,5010	8,1895	3,3107
2	54	1,7323	36800	4,5658	7,9093	3,0011
3	42	1,6232	76800	4,8853	7,9298	2,6349
4	30	1,4771	196700	5,2938	7,8194	2,1818
5	18	1,2552	358100	5,5540	6,9713	1,5757
6	6	0,7781	1.2×10 ⁶	6,0791	4,7301	0,6055

Tableau (IV.4) Calcul des quantités : x_i , y_i , $x_i \cdot y_i$, x_i^2 .

On a :

$n=6$,

$$\sum_{i=1}^6 x_i = 8,6854, \quad \sum_{i=1}^6 y_i = 30,879, \quad \sum_{i=1}^6 x_i y_i = 43,5494,$$

$$\sum_{i=1}^6 x_i^2 = 13,3097,$$

Le système d'équation devient alors :

$$13,3097 \cdot B + 8,6854 \cdot A - 43,5494 = 0$$

$$8,6854 \cdot B + 6 \cdot A - 30,879 = 0$$

La résolution de ce système nous donne les résultats suivants :

$$B = -1,56 \text{ et } A = 7,404$$

La fonction de lissage devient alors :

$$\mathbf{\log N = 7,404 - 1,56 \log (s - 120)}.$$

S (N/mm ²)	Log N	N (cycles)
186	4,5655	37000
174	4,7014	51000
162	4,8717	76000

150	5,0996	125000
138	5,4457	280000
126	6,1900	1550000

Tableau (IV.5) les valeurs de N (cycles) pour La fonction de lissage.

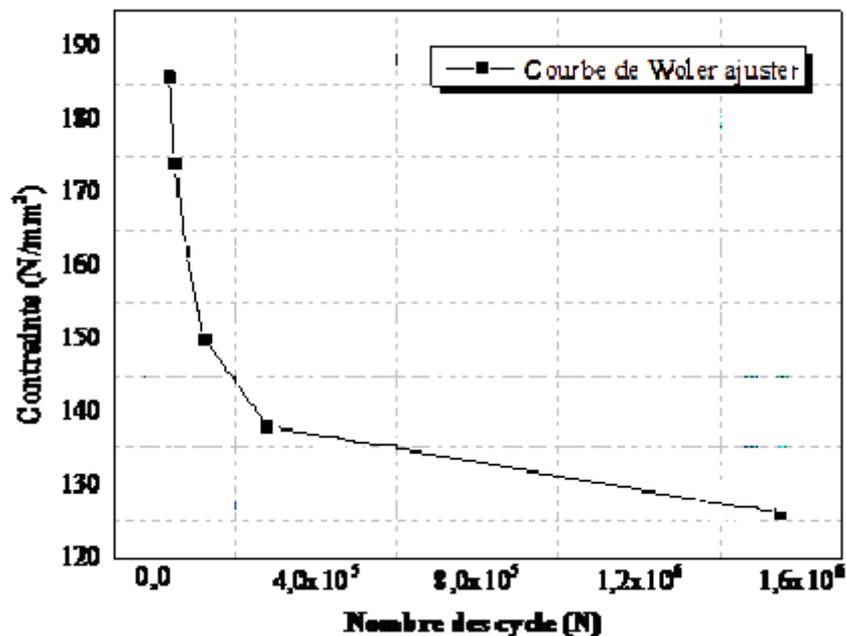


Figure
Tracé de la

IV.2.

courbe de Wöhler ajustée

IV.5. Analyse de défaillance

Une analyse de la défaillance se déroule en trois étapes successives :

1. enquête préliminaire,
2. analyse morphologique de la pièce défaillante,
3. examens complémentaires en laboratoire.

IV.5.1. L'enquête préliminaire

La défaillance d'une pièce ou d'un organe de machine peut avoir débuté dans un passé quelquefois lointain ou s'être produite brutalement [02]. Il est donc nécessaire d'adopter une démarche prudente pour son analyse et de recueillir tout d'abord le maximum d'information sur :

- ses circonstances,

- les conditions de service,
- l'environnement,
- les incidents antérieurs.

Il faut également rassembler toutes les données concernant le matériau, sa nuance, son origine, les traitements mécaniques, thermiques, thermo-chimiques et de surface que la pièce a subie.

IV.5.2. Analyse morphologique de la pièce défaillante

Cette analyse se fait à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe, en s'efforçant d'examiner attentivement l'aspect général de la dégradation et les accidents de surface de façon à recueillir tous les renseignements et indices susceptibles de permettre :

- de classer la défaillance,
- de définir le mode de chargement et le type de sollicitation,
- de localiser la zone d'amorçage,
- d'orienter les examens complémentaires en laboratoire (microscopie électronique, optique, essais mécaniques, etc.).

IV.5.3. Examen complémentaire en laboratoire

Ces examens ont pour but de compléter l'analyse morphologique. Ils permettent entre autre [02] :

- de confirmer ou d'apporter des précisions sur les causes d'amorçage et les modes de propagation des fissures,
- de vérifier la conformité des matériaux aux spécifications, du point de vue composition chimique, structure ou caractéristique mécaniques.

Les moyens utilisés pour effectuer ces examens complémentaires sont essentiellement:

- la microscopie optique et électronique,
- l'analyse chimique,
- les essais mécaniques.

La confrontation des résultats des examens complémentaires [02], avec ceux de l'analyse morphologique et des informations rassemblées au cours de l'enquête préliminaire, doivent permettre d'atteindre le but final, qui est de déterminer les remèdes et les moyens préventifs, donc de remettre en cause séparément ou ensemble:

- la conception mécanique de la pièce,
- le choix du matériau et des traitements thermiques,
- le contrôle des conformités produit et pièce,
- les conditions d'utilisation.

IV.6. Etude micrographique et interprétation

Un examen microscopique (microscope optique)

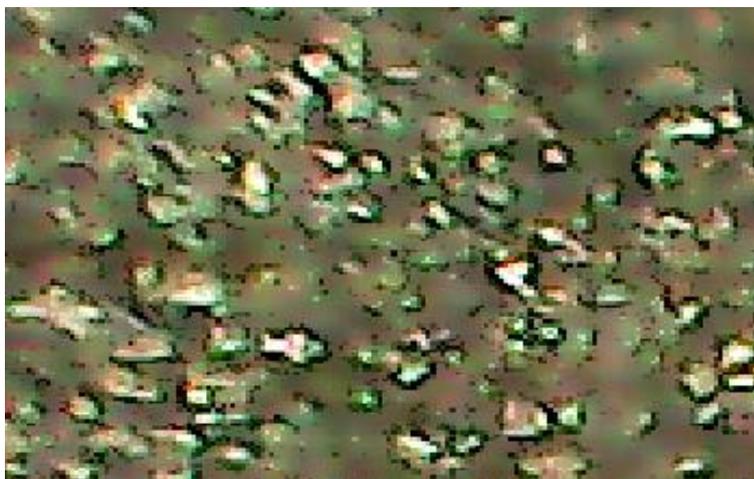


Figure IV.3 facies d'une éprouvette rompue en acier **A60** a l'échelle microscopique
(200 :1)

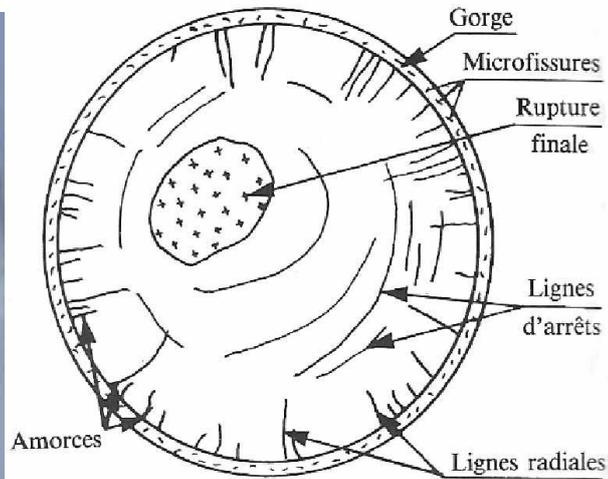
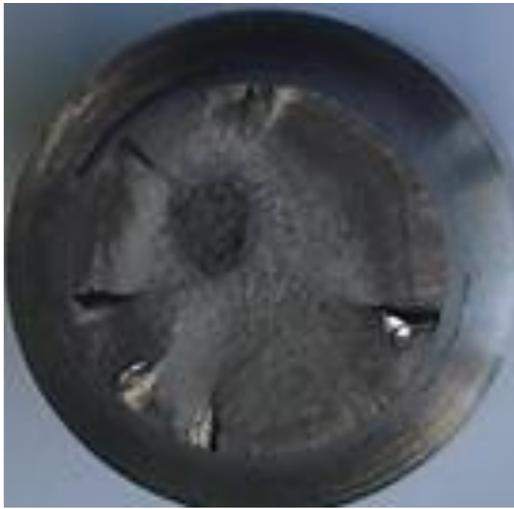


Figure IV.4.a facies d'un éprouvette

Figure IV.4.b Caractéristiques des

ruptures

rompue en acier **A60** a l'échelle (1 :1)
de flexion rotative

développées en fatigue sous sollicitation
de flexion rotative [02].

La présence d'une zone lisse périphérique et d'une zone centrale grenue est caractéristique des ruptures développées en fatigue sous sollicitation de flexion rotative.

La présence de nombreuses lignes radiales sur tout le pourtour de la cassure témoigne de la multitude d'amorçages superficiels [02].

La position centrale de la rupture finale est liée aux fortes concentrations de contraintes qui affectent la pièce au niveau de la gorge, mais sa faible étendue indique que la pièce est peu chargée.

L'examen de la zone d'amorçage permet enfin de constater la présence de nombreuses microfissures à la surface de la gorge.

Ces défauts, provoqués lors de l'usinage (sans doute par le «broutage» de l'outil), sont à l'origine de la rupture qui s'est ensuite développée sous l'effet des sollicitations normale de service **figure IV.4.b**.

IV.6.1 Interprétation sur quelques éprouvettes rompues lors des essais de fatigue

Voici quelques faciès de rupture observés lors des essais de fatigue :

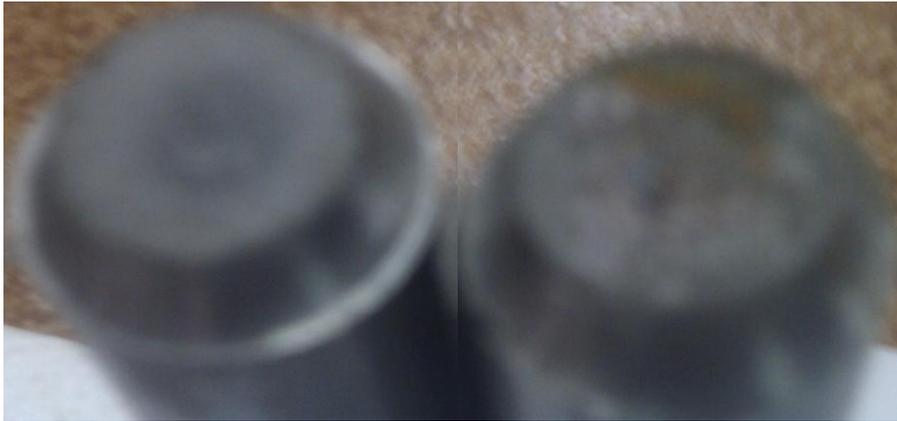


Figure IV.5 éprouvette N° 1 rompue de 31700 (cycles) à 186 N/mm^2



Figure IV.6 éprouvette N° 2 rompue de 36800 (cycles) à 174 N/mm^2



Figure IV.7 éprouvette N° 3 rompue de 76800 (cycles) à 162 N/mm^2



Figure IV.8 éprouvette N° 4 rompue de 196700 (cycles) à 150 N/mm^2



Figure IV.9 éprouvette N° 5 rompue de 358100 (cycles) à 138 N/mm^2



Figure IV.10
éprouvette N° 6 rompue de 1.2×10^6 (cycles) à 126 N/mm^2

IV.6.2 Commentaires

En premier lieu, on constate sur les éprouvettes il existe deux zones sur la surface ; la première zone est lisse montre que la propagation de fissure a commencée, et la deuxième zone est rugueuse montre la rupture finale.

IV.6.2.1 Éprouvette N°1, 2, 3 :

Les résultats que nous avons obtenus, représente la fatigue dans le domaine oligocyclique (1) parce que nous avons appliqué des charge plus élevée sur les éprouvettes, Nous étions peut être près de la limite élastique du matériau qui a plastifié à chaque flexion et ainsi accéléré l'apparition de la rupture par fatigue

Il faudrait faire des essais avec des contraintes plus faibles pour obtenir des résultats qui nous amènent au domaine d'endurance limité (2).

IV.6.2.2 Éprouvette N°4, 5, 6 :

Quand on a appliqué des charges inférieures à celle du premier, nous notons que le nombre de cycles aussi s'élève et le phénomène de fatigue va apparaitre sur le domaine d'endurance limité (2).

IV.6.2.3 Éprouvette N°7, 8, 9 :

Les éprouvettes dans ce domaine d'endurance illimité (3) ne sont pas rompue parce que les charges sont faibles donc on peut dire que la limite d'endurance σ_D entre les deux domaines (2) et (3) est calculer par méthode de reclassement des données nous obtenons $\sigma_D = \frac{114+126}{2} = 120 N/mm^2$.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Ce travail, a été consacré à une étude expérimentale sur le comportement en fatigue en flexion rotative d'un acier d'usage général (A60).

Cette étude a pour but de connaître les caractéristiques de fatigue de cet acier, telle que la limite fatigue à N cycles (10^6 cycles).

Pour ce faire, nous avons donc réalisé des essais dynamiques sur des éprouvettes cylindriques entaillés, par des différentes méthodes.

L'étude a comporté les étapes suivantes :

Vérification de la conformité de la nuance (composition chimique, caractéristiques mécaniques, etc.), et nous avons trouvé que la nuance est conforme aux normes de livraison,

Réalisation des essais de fatigue par la méthode de reclassement des données sur

01 lot de 09 éprouvettes qui a donné comme limite de fatigue à 10^6 cycles 120 MPa. Cette dernière a été utilisée comme une charge du premier niveau pour les essais suivants, qui sont réalisés par une méthode qui donne des résultats plus précis ; cette méthode (reclassement des données) permet de tracer point par point la courbe de Wöhler.

Réalisation des essais de fatigue par la méthode de l'escalier sur 02 lot de 21 éprouvettes pour chacun, et qui ont donné le résultat suivant : 127,5 MPa et 126 MPa. On voit bien ici, une dispersion des résultats obtenus.

L'ajustement de la courbe de Wöhler, tracée par les résultats des essais réalisés par la méthode de reclassement des données.

La dispersion expérimentale des résultats, observée lors des essais fatigue est la résultante de plusieurs facteurs qui influent sur le phénomène de fatigue tels que : les facteurs métallurgiques, géométriques, conditions de surface, conditions de sollicitation, l'influence de l'environnement, etc.

Enfin pour éliminer ou minimiser l'influence de ces facteurs sur la limite de fatigue nous proposons quelques solutions suivantes.

- le choix du matériau à utiliser lors de la conception de la pièce,
- la propreté du matériau augmente l'endurance,

➤ l'état de surface a une influence importante sur la limite d'endurance (une pièce présentant un état de surface fin est plus endurante que la même pièce avec un état de surface grossier),

- traitement de durcissement sur les couches superficielles,
- développement de contraintes résiduelles de sens favorable,
- diminution de la température du milieu de travail de la pièce,
- éviter un environnement agressif (air humide par exemple).

Référence

bibliographie

Référence bibliographique

[01] A.-F. GOURGUES-LORENZON(2006) **Comportement, endommagement et rupture par fatigue** thèse d'Amine Bennani, soutenue à l'Ecole des Mines de Paris.

[02] Alexis BANVILLET 2001 **Prévision de durée de vie en fatigue multiaxiale sous chargements réels : vers desessais accélérés** Thèse de Doctorat, L'ENSAM Centre de Bordeaux.

[03] Alain Daidier. Manuel Paredes.(*Version : 2011/2012*) **Modelisation mecanique avancée** INSA de Toulouse.

[04] Atidel GHORBEL2010, "**Fatigue du polyamide 66 chargé de fibres de verre courtes**" Doctorant Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie

[05] Bardia ESMAEILLOU (2011) **Approche cinétique du comportement en fatigue du Polyamide 66 renforcé par 30% de fibres de verre** Thèse de Doctorat, ENSAM SMI de paris. École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'Ingénieur. Doctorat ParisTech.

[06] Bastenaire F, Pomey G, Rabbe P, (1971) **etude statique des duree de vie en fatigue et des courbes de woler de cinq nuances d'acier** . mem scient de la rev metallurgie LXVIII n10.

[07] Bernard Barthélémy (1980) **notions pratiques de mécanique de la rupture** Paris eyrolles.

[08] Brek Samir 2012 **Modélisation numérique de la propagation de l'endommagement et de la rupture dans les matériaux composites stratifiés sous sollicitations thermomécaniques et cycliques** Thèse de Doctorat, Département de genie mecanique. Faculte de technologie Université Hadj Lakhdar de Batna.

[09] Buthod.H Lieurade.H.P (1986) **influence des propriétés mécaniques sur les caractéristiques d'endurance en flexion d'une gamme étendue d'acier**. Rev de met.

[10] Claude Bathias André Pineau (2008) **Fatigue des matériaux et des structures tome, Introduction, endurance, amorçage et propagation des fissures, fatigue oligocyclique et gigacyclique** [Hermès Science Publications](#).

[11] Cazaud R, Pomey G, Janssen Ch, (1969) **la fatigue des métaux** Dunod, Paris.

[12] Didier DUPRAT (2004) **Fatigue et mécanique de la rupture des pièces en alliage léger** Bureau d'études. Aérospatiale Toulouse.

[13] François PLESSIER 2008 **Approche mécanique multi-échelle des interactions hydrogène plasticité** LMP Université Bordeaux I.

[14] Guillaume TIRAND, 2008 **"Corrélation entre paramètres de soudage par laser d'un alliage de base aluminium et résistances mécaniques et à la corrosion des assemblages."** Doctorant Université Bordeaux I.

[15] Hadrien BIDOUCARD 2009 **Etude de l'effet de surcharges sur la tenue en fatigue a grande durée de vie d'un acier ferrito-bainitique sous chargement d'amplitude variable** Thèse de Doctorat, arts et metier Paristech

[16] Hichem DJABALI Hichem YOUSFI (2009) **Étude expérimentale de la fatigue en flexion rotative** Thèse d'Ingenieur d'état Département de genie mecanique. Faculte de technologie Université Hadj Lakhdar de Batna.

[17] Jérôme BENABES (18 décembre 2006) **Approche energetique non local du calcul de durée de vie de structure en fatigue multiaxiale sous chargement d'amplitude variable'application a une roue de train ferroviaire'** Thèse de Doctorat, ENSAM, CER de Bordeaux.

[18] Komlan AGBESSI, 2012 **"Approche Multi-échelle des processus d'amorçage de fissures en fatigue sous chargements complexes."** Doctorant Arts et Métiers ParisTech.

[19] Lyamine Saidani, (2007) **Etudes esperimentale du comportement en fatigue des métaux par flexion rotative** Thèse de MAGISTER Spécialité : Mécanique, option : CM Université Med Boudiaf de M'sila.

[20] Marc Blétry 2007 **Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux**

[21] Mohamed ELMAY 2012 **"Etude de la tenue en fatigue d'un acier inoxydable pour l'aéronautique en milieu marin corrosif."** Doctorant Arts et Métiers ParisTech.

[22] Mohamad JABBADO (2006) **Fatigue polycyclique des structures métalliques : durée de vie sous chargements variables** Thèse de Doctorat, de l'Ecole Polytechnique Spécialité : Mécanique et Matériaux de Bordeaux.

[23] P.BONNET (2004-2005) **fatigue des métaux 'matériaux et procédés'** Institut supérieur de mécanique de PARIS.

[24] Robbins H. Monro S. (1951) **A stochastique approximation méthode** Ann of math stat. University of North Carolina.

[25] Ruben PEREZ MORA (FMS), 2012. **"Etude de la résistance en fatigue gigacyclique de matériaux pour aubes de turbines (dans les domaines aéronautique et de l'énergie)."** Doctorat en co-tutelle entre Arts et Métiers ParisTech et le CIATEQ (Queretaro, Mexique), en partenariat avec l'Université de Morelia (Mexique).

[26] Said Bensaada (1992) **Traitements thermiques, classification et designation des aciers et fontes.**

[27] Thomas DELAHAY (2004) **Developement d'une méthode probabiliste de calcul en fatigue multiaxiale prenant en compte la repartition volumique des contrainres.** Thèse de Doctorat l'ENSAM CER de Bordeaux.

[28] V. PERIER, L. DIENG, L. GAILLET, S. FOUVRY 2009 **Propagation d'une fissure par fatigue dans un fil de câble de haubanage** 19^{ème} congrés rrançais de Mécanique, Marseille.

[29] Viviana Coto Hunziker 2002 **'Resistance a la fatigue en rotation et resistance en flexion de huit materiaux resineux, composites et acetax'** thèse de doctorat en médecine dentaire' facule de médecine Section de Médecine dentaire Département de Prothèse dentaire'' à l'université de Genève

[30] Younes DEMMOUCHE, 2011 **"Comportement en fatigue des assemblages soudés par FSW."** Doctorant Arts et Métiers ParisTech.

Résumé

Le but de cette thèse est de déterminer le comportement des éprouvettes de métal (acier A60) sous sollicitations de contraintes périodiques à amplitude constante, analogue à celles qui se produisent dans la pratique lors des sollicitations de service.

Le matériau testé était : un acier à usage courant en mécanique générale. Non traité (A60). Le test en fatigue utilisé était celui des éprouvettes entaillées en machine de flexion rotative à 10^6 cycles. Les méthodes de reclassement des données et de l'escalier ont été utilisées pour déterminer la limite de fatigue.

La limite d'endurance obtenue par cette méthode est: 120 N/mm^2 . Et la fonction de lissage devient alors : $\text{Log } N = 7,404 - 1,56 \text{ Log } (s - 120)$.

La dispersion expérimentale des résultats, observée lors des essais a été prise en considération par l'utilisation des approches mathématiques, pour rendre possible l'utilisation des courbes de Wöhler probabilisées dans un concept fiabiliste.

Mots clés : Fatigue, flexion rotative, endurance, durée de vie.

Abstract

The object of this thesis is to determine the behavior of test specimens of metal (steel A60) under stress of constant amplitude periodic constraints, similar to those that occur in practice when working stresses.

The test material is a steel in common use in general engineering. Untreated (A60). The fatigue test used was that of notched specimens in rotating bending machine 10^6 cycles. Methods of placing data and the stairs were used to determine the fatigue limit.

The endurance limit obtained by this method is: 120 N/mm^2 . And the smoothing function becomes: $\text{Log } N = 7.404 - 1.56 \text{ log } (s - 120)$.

The experimental results of the dispersion observed in the tests was made in consideration by the use of mathematical approaches to make possible the use of Wöhler curves probabilized in a reliability-concept.

Key- Words: Fatigue, rotating bending, endurance, life length.