

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

51/87

وزارة التعليم والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**

Département : **GÉNIE MÉCANIQUE**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**SUJET**

**CAUSES DE FISSURATION  
DES PIÈCES EN CONSTRUCTION MÉCANIQUE**

**1 PLANCHE**

Proposé par :  
S. N. V. I.

Étudié par :  
B. GUESSAB

Dirigé par :  
Mr. PAVLOV

Promotion : JUIN 1987

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

“  
CAUSES DE FISSURATION  
DES PIECES EN CONSTRUCTION  
MECANIQUE

Proposé par :

S.N.V.I

Etudié par :

B, GUESSAB

Dirigé par :

Mr. PAVLOV

PROMOTION  
Juin 1987

Ministère de l'enseignement supérieur

École nationale Polytechnique

Département : Génie - Mécanique.

Promoteur : M<sup>r</sup> PAXLOV

Élève ingénieur : BENACEUR GOËSSAB

وزارة التعليم العالي

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة - BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

دائرة: الميكانيك

الموجه: بافلوز

طالب المهندس: بن ناصر نصيب

الموضوع: أسباب نشق القطع في البناءات الميكانيكية.  
الملخص: يتضمن هذا المشروع دراسة ظاهرة صوت النشق في القطع الميكانيكية تحت تأثير أحمال متناوبة، ثم دراسة الأسباب المؤدية إلى هذا النشق، طرق تحسين متانة الكلال وأخيراً دراسة آلة تجريب الكلال من طراز "Schenck" في حالة ثني دوّار.

Sujet: Causes de fissuration des pièces en construction mécanique.

Resumé: Ce projet de fin d'études porte sur l'étude du phénomène de fissuration des pièces mécaniques sollicitées par des charges alternées, Les causes susceptibles de produire ces fissures, Les moyens d'améliorer la résistance à la fatigue et enfin sur l'étude de La machine d'essai de fatigue en flexion relative du type "schenck".

Subject: Causes of the fissures in the mechanical-construction Patches.

Summary: this project deals with a study on the phenomenon of the fissures of the mechanical patches when submitted to alternate charges, the very likely causes to these fissures, the means of the fatigue strength improvement and finally a study on the fatigue test-machine called "schenck" in a rotative flexion.

# REMERCIEMENTS.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

Je remercie vivement l'ensemble des Personnes qui ont contribués de près ou de loin à ma formation d'Ingenieur et à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Je cite en particulier.

- M<sup>e</sup> PAVLOV mon Promoteur et Professeur à l'ENP
- M<sup>e</sup> HOCINE BOURAS.
- M<sup>e</sup> SID-ALI MEFTAH.

mes remerciements vont aussi à l'encontre de l'ensemble des Professeurs du département de Genie-Mécanique. et des amis de classe de la promotion. JUIN 1987

# TABLE DES MATIERES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

I	INTRODUCTION	
	1. Generaliteés	1
	2. But.	2
II	CAUSES DE LA FISSURATION DES PIECES MECANIQUES.	3
	1. effet d'entaille	4
	2. effet de La dimension	7
	3. formes des Pieces	8
	4. etat de surface	15
III	PHENOMENE DE FATIGUE	
	A. Mecanisme de Fatigue	18
	A.1. Theories Mécaniques	19
	1.1. theorie des efforts secondaires	19
	1.2. théorie de l'hysteresis des efforts pseudo-élastiques	20
	1.3. théorie de l'écroutissage	22
	1.4. théorie de La propagation des fissures.	23
	B. Méthodes de determination de La Limite d'endurance	
	1. Méthode statistique de Longue durée (tracé de wöhler)	26
	2. Méthode directe de Locati	28
IV	INFLUENCE DE LA STRUCTURE ET DE LA CORROSION SUR LA FISSURATION DES PIECES MECANIQUES.	
	A. Aspects structuraux	32
	A.1. Etude micrographique	32

1.a.	Propagation de La fissure	
1.b.	formation des bandes de glissements	32
A.2.	Etude radiocristallographique.	34
A.3.	Relation entre La limite d'endurance et La structure des métaux	35
A.4.	Influence des traitements thermiques sur La limite d'endurance.	37
	1. trempe et revenu.	37
	2. Cementation , trempe et revenu.	39
	3. Nitruration	40
B.	Influence de La corrosion sur La limite d'endurance.	
B.1.	Fatigue après corrosion	41
B.2.	Fatigue et corrosion simultanées	42
	2.1. aspect.	43
	2.2. mécanisme.	43
	2.3. moyens de prevention.	44
<b>V</b>	<b>INSTALLATIONS DES ESSAIS DE FATIGUE</b>	
	1. Classification des sollicitations	47
	2. Classification des essais de fatigue	50
	2.1 Machine de flexion rotative du type "Scheneck"	50
	a. principe	50
	b. caractéristiques de La machine	53
	c. calculs de resistance.	53
	d. Eprouvette de flexion rotative	56
<b>VI</b>	<b>AMELIORATION DE L'ENDURANCE DES PIECES DE CONSTRUCTION.</b>	

1. Facteur métallurgique et structural 57

2. Facteur constructif.

2.1. contraintes

2.2. coefficients d'influence

3. Exemples d'amélioration de  
l'endurance des pièces de machines

3.1. Arbre à changement de section 62

3.2. Arbre à manivelles, vilebrequins 63

3.3. Vis d'accouplement 67

VII

CONCLUSION

68



## 1. Généralités.

Il est connu depuis déjà très longtemps qu'un nombre considérable des pièces mécaniques se rompent en service d'une manière brusque et sans déformation préventive, sous l'action de charges (traction, flexion, torsion) variables et répétées.

Il a été observé que ce phénomène de destruction des pièces se manifeste même, pour des tensions internes alternées, inférieures à la limite d'élasticité du matériau sans qu'elles ne dépassent une certaine limite supérieure appelée la limite d'endurance du matériau. C'est pourquoi en plus des propriétés mécaniques générales ( $R_s, R_e, K, A, \dots$ ) divers expérimentateurs ont cherché à déterminer la limite d'endurance des pièces avec des essais de fatigue que nous examinerons par la suite.

En plus du phénomène de fatigue qui reste parmi les plus répandus, le frottement et la corrosion peuvent aussi conduire à la destruction des pièces. En effet une grande partie des pièces travaillent par contact donc avec frottement qui provoque la formation de cratères par fragmentation des zones fragiles les plus sollicitées une fois que la limite d'usure est dépassée. Quant à la corrosion, elle se manifeste par une formation de criques superficielles parfois très profondes qui se propagent dans la matière et se multiplient jusqu'à destruction complète des pièces. La corrosion peut être par fitting (engrenages) ou cavitation (ailettes de turbines, de pompes etc...).

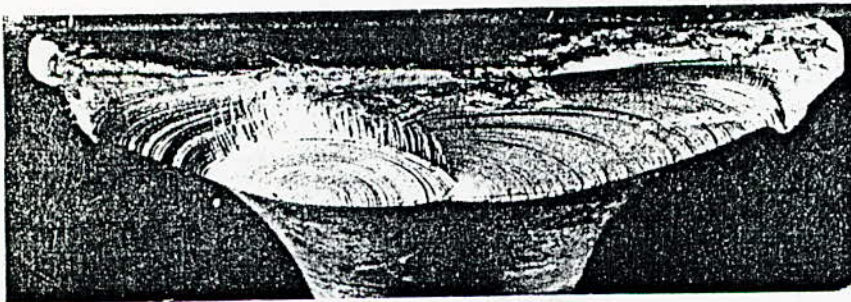
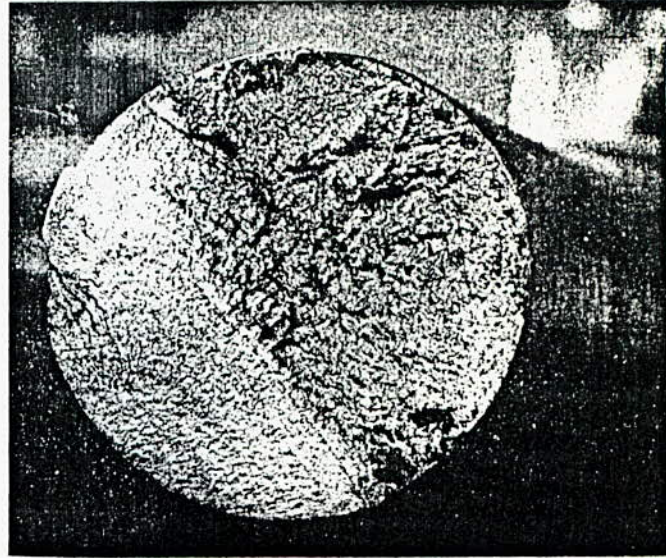
## 2. BUT.

Cette étude consiste en l'étude du phénomène de fissuration des pièces de construction sollicitées par des charges alternées,



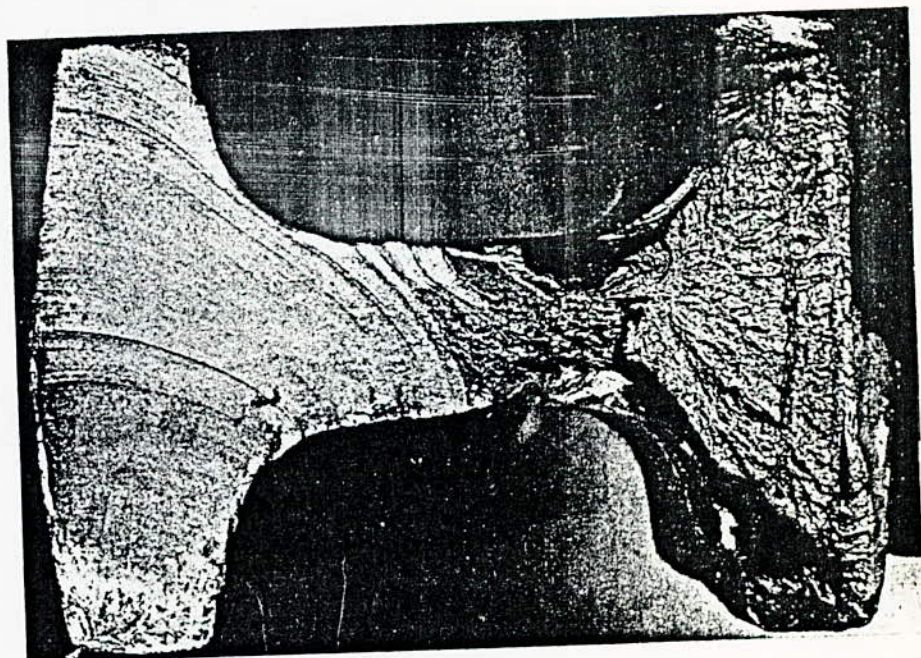
des divers facteurs d'influence sur la limite d'endurance, des possibilités d'amélioration de la résistance à la fatigue et enfin en l'étude de la machine d'essai de flexion rotative "Schenck".

casure de fatigue  
d'une hélice d'avion  
en alliage léger à  
haute résistance  
(A-UAG)



Soupape de moteur  
diesel rompue en  
service par fatigue.

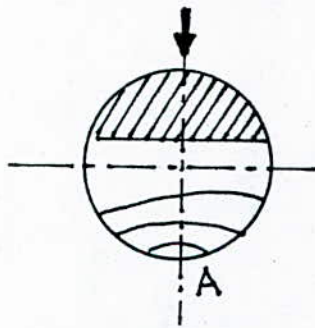
casure de  
fatigue d'un  
essieu de  
camion



## Chapitre II CAUSES DE LA FISSURATION DES PIÈCES MECANIKUES.

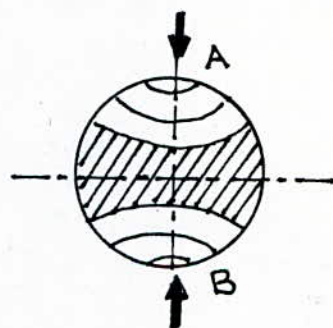
Toute cassure de pièce rompue en service présente un aspect caractéristique. On y distingue deux zones; une première zone lisse occupant une grande fraction de la section totale et qui constitue la cassure par fatigue et une seconde zone à grain cristallin et rugueuse, constitue la cassure instantanée finale. (fig. 1a).

La rupture par fatigue est donc due à la propagation d'une fissure très fine qui s'étend jusqu'à occuper toute la surface.



cassure par fatigue en flexion unilatérale

A: foyer, amorce  
(point d'amorçage de la fissure)



cassure par fatigue en flexion bilatérale.

A, B: foyer, amorce  
(points d'amorçage de la fissure).

Toute amorce (foyer) potentielle de fissuration peut être groupée avec l'un des caractères suivants.

1. métallurgique (inclusion, brûlure, criques)
2. mécanique (concentration des contraintes, défaut de surface)
3. chimique (décarburation, oxydation, piquures de corrosion)

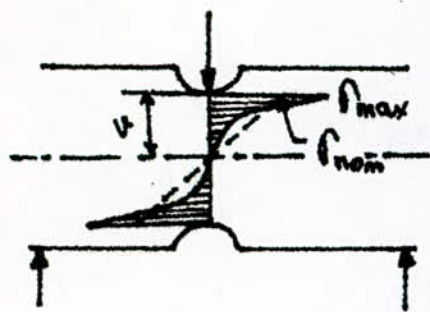
Cependant le caractère de ces amorces ne constitue pas un élément intrinsèque au phénomène de fissuration, mais plutôt leurs situations et orientation dans le champ de contrainte qui déterminent leur danger. C'est pourquoi on peut étudier l'influence des divers facteurs sur la résistance à la fatigue des organes de machines.

### 1. Effet d'entaille.

Un changement de section entraîné par la présence d'une entaille conduit à une modification de la distribution uniforme des contraintes et à faire apparaître à fond d'entaille des pointes de contrainte. Cette concentration des contraintes peut être calculée par les coefficients de concentration de contraintes ( $K_t$  et  $K_{ts}$ ) définis par.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (\text{traction, flexion}).$$

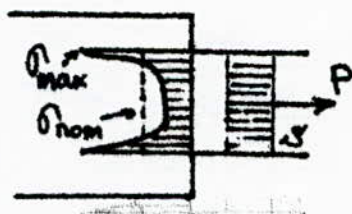
$$K_{ts} = \frac{\tau_{max}}{\tau_{nom}} \quad (\text{torsion}).$$



flexion

$$\sigma_{nom} = \frac{M}{I/y}$$

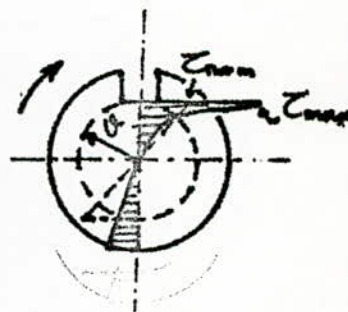
$$\sigma_{max} = K_t \cdot \sigma_{nom}.$$



traction

$$\sigma_{nom} = P/S$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{nom} \cdot K_t$$

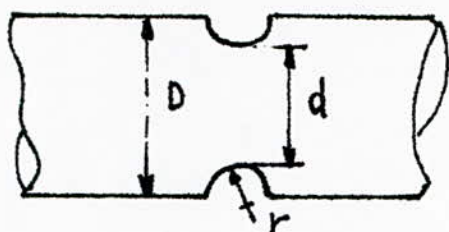


torsion

$$\tau_{nom} = \frac{M_t}{I_p/y}$$

$$\tau_{max} = K_{ts} \cdot \tau_{nom}.$$

Les coefficients de contraintes  $K_t$  et  $K_{ts}$  sont des coefficients théoriques et ne dépendent que de la géométrie des pièces.



$$K_{ts}, K_t = 1 + \left( A \cdot \frac{2r}{D-d} + B \cdot \frac{2r(1+2r/d)^2}{d} \right)^{-1/2}$$

A, B : des facteurs dépendant du mode de sollicitation.

Sollicitation	A	B
traction	0,25	1,00
flexion	0,25	1,80
torsion	1,00	7,00

La sensibilité à l'effet d'entaille en fatigue varie selon la nature du matériau qui permet ou pas une grande déformation plastique. En effet, la présence d'entaille réduit l'endurance des pièces, mais l'influence est d'autant plus grande que le métal a une faible capacité de déformation. C'est pourquoi les métaux ductiles s'adaptent mieux à l'effet d'entaille que les métaux résistants.

L'effet d'entaille s'exprime par  $K_f$ .

$$K_f = \frac{\text{limite d'endurance d'éprouvette lisse}}{\text{limite d'endurance d'éprouvette entaillée}}$$

$$(K_f > 1)$$

Quant à la sensibilité à l'effet d'entaille s'exprime par  $q$ .

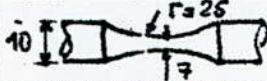

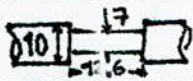

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad 0 < q < 1$$

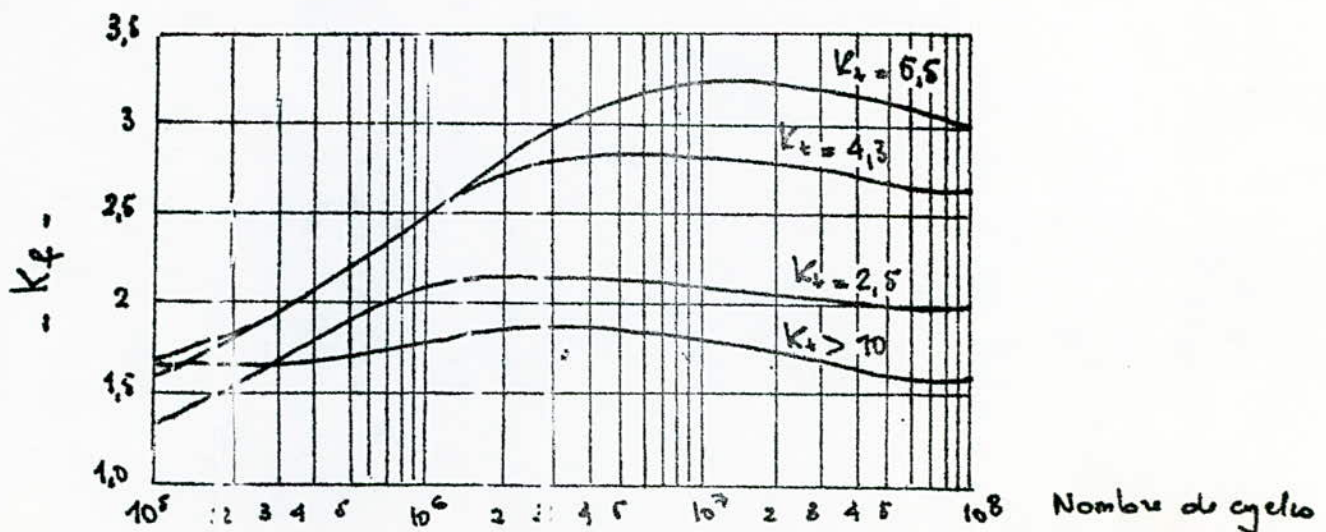
si  $K_f = 1 \Rightarrow q = 0$  : le métal s'adapte merveilleusement à l'effet d'entaille.

si  $K_f = K_t \Rightarrow q = 1$  : la concentration de contrainte statique est complètement reflétée sur l'endurance et le métal ne s'adapte plus.

### 1.1. Influence de l'acuité de l'entaille.

L'acuité de l'entaille est un facteur d'une grande influence sur la limite d'endurance des pièces. En effet, le facteur de réduction  $K_f$  s'approche du facteur statique  $K_t$  dans le cas d'entaille peu aiguë, tandis qu'il varie dans le même sens que le rapport  $(R_e/R_m)$  dans le cas d'entaille plus sévère, c'est à dire que l'adaptation est d'autant plus meilleure que ce rapport est faible (cas des aciers austénitiques).

forme d'entaille	$K_t$	$K_f$
	1,04	1
	1,15	1,08
	2,3	2
	2,9	2,6

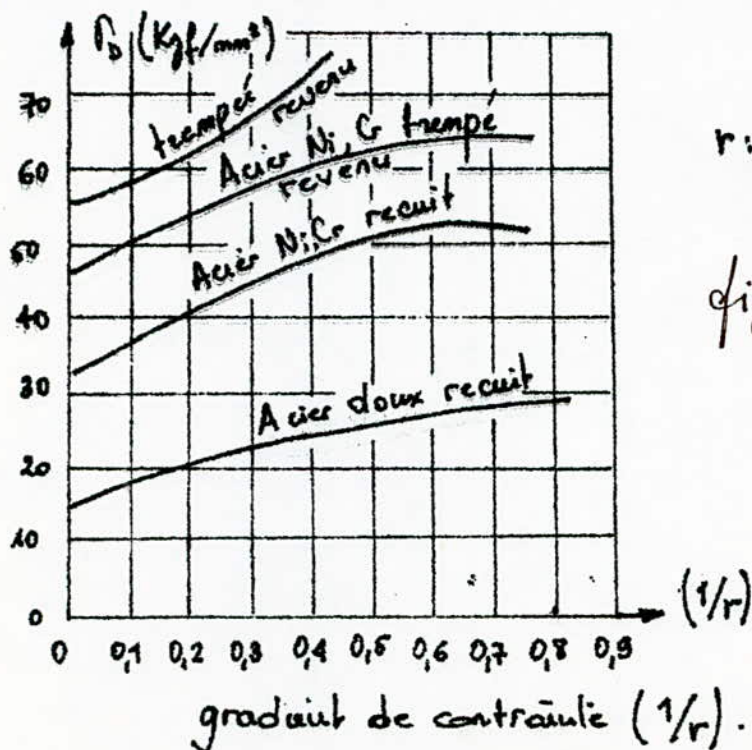


Cette dernière figure représente la variation de l'effet d'entaille ( $K_t$ ) avec l'acuité de l'entaille ( $K_e$ ) et le nombre de cycles, en flexion rotative d'une éprouvette en Alliage 24 ST (J.Y. Mann [1]). Les résultats montrent que le rapport  $K_e$  augmente d'abord avec le nombre de cycles pour atteindre le maximum entre  $10^6$  et  $10^7$  cycles, puis diminue.

## 2. Effet de la dimension.

Il a été observé que pendant les essais de fatigue en traction ou en compression, la limite d'endurance restait plus ou moins constante pour différents diamètres d'éprouvettes. Par contre, elle diminuait avec l'augmentation du rayon de l'éprouvette dans le cas des sollicitations en flexion rotative ou en torsion alternée. En effet, le gradient de contrainte ( $g$ ) diminue quand le rayon augmente (fig 6)

Le gradient de contrainte dans le cas de flexion ou de flexion est représenté par  $g = \frac{1}{r}$ . En effet, la contrainte d'une fibre donnée est proportionnelle à la distance qui la sépare de l'axe neutre.



$r$ : étant le rayon de l'éprouvette.

fig. 6: variation de  $\sigma_D$  avec la dimension et le mode de traitement thermique.

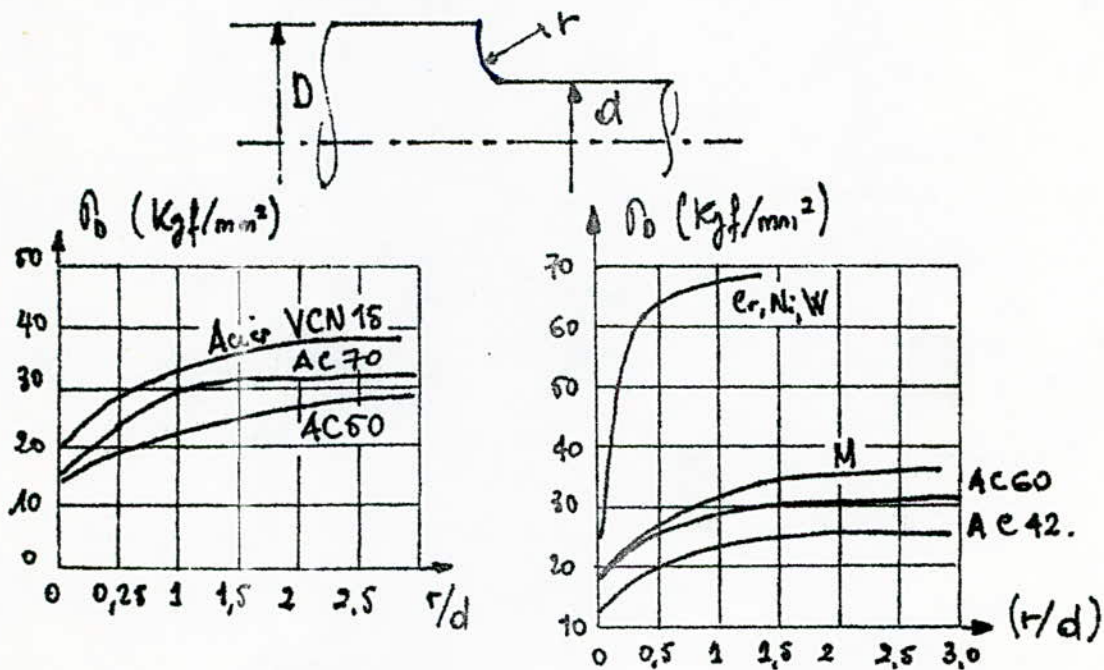
La diminution de la limite d'endurance avec l'augmentation du rayon des éprouvettes peut être expliquée par:

- La diminution du gradient de contrainte.
- L'augmentation de la surface, souvent lieu d'amorçage des fissures à cause des irrégularités d'usinage.
- La diminution probable du rapport de la surface sur le volume qui empêche le dégagement radial de la chaleur accompagnant les efforts qui, quant à lui, se manifeste par une formation des contraintes résiduelles.

### 3. Formes des pièces.

#### 3.1. Congés de raccordement.

À l'aide d'essais de fatigue, différents constructeurs ont montré que la limite d'endurance des pièces avec diminution de section dépend du rayon de raccordement entre les deux diamètres.



Ces deux figures expriment l'influence du rapport  $(r/d)$  sur la limite d'endurance en flexion relative de différentes éprouvettes.  
 $d = 9 \text{ mm}$  et  $D = 18 \text{ mm}$ .

Le changement de section donne lieu à une concentration de contraintes au congé qui par ce fait constitue un foyer d'amorçage des fissures de fatigue.

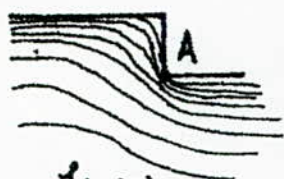


fig (a)

concentration de contraintes  
pièce initiale

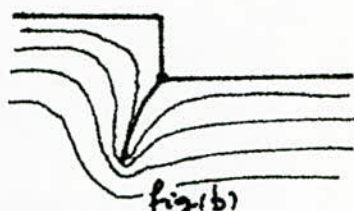


fig (b)

naissance et propagation d'une fissure perpendiculairement aux lignes de forces au sein de la pièce sollicitée par des charges.

Une augmentation convenable du rayon du congé, améliore sensiblement la limite d'endurance des arbres du fait d'une meilleure répartition des lignes de forces.



fig (c)

L'expérience a montré que la rupture d'arbre de la fig (c) peut se produire non pas au congé mais en dehors.

### 3.2. Filetages.

D'après des expériences faites par Moore [2], Les filetages présentent une bonne résistance à l'effet de charges répétées du fait du soulagement qu'apportent mutuellement les filets voisins.

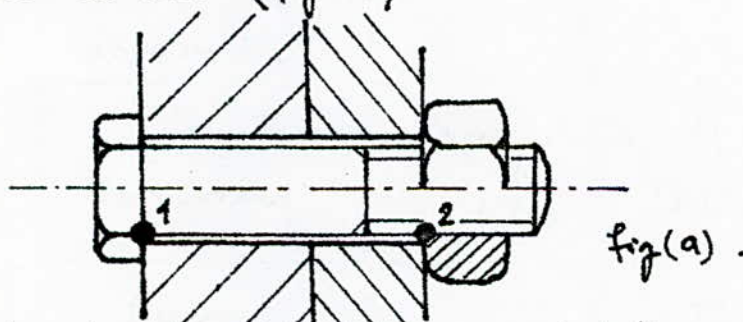
La limite d'endurance des tiges filetées dépend essentiellement de l'amplitude des charges et de la forme des filets. (tableau A)



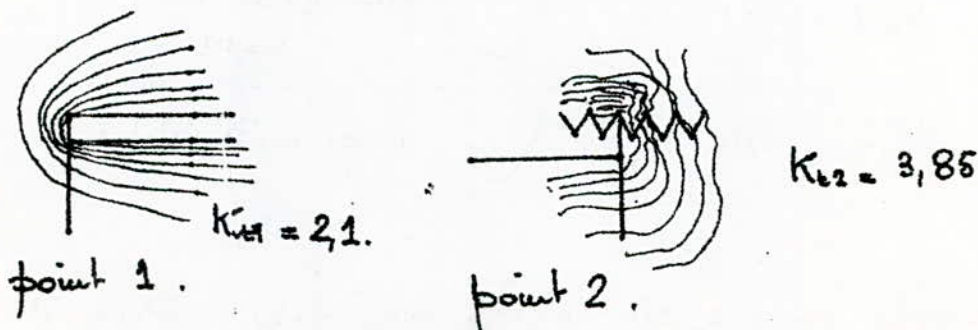
tableau A.

Eprouvettes	représentation du filet	$\sigma_D$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$K_f$
lisses	—	23	—
2 filets triangulaires aigus		17	1,35
2 filets triangulaires ronds		18	1,28
2 filets demi-ronds		18,5	1,24

Dans le système Vis-écrou l'effort de serrage provoque une concentration de contrainte dans les deux premiers filets de l'écrou engagés dans la Vis. (fig (a))

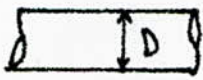
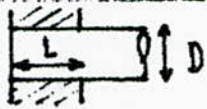




Les points de concentration de contrainte 1 et 2 sont souvent lieu de rupture des systèmes Vis-écrou. En effet, la répartition des lignes de forces dans ces deux points est telle que :

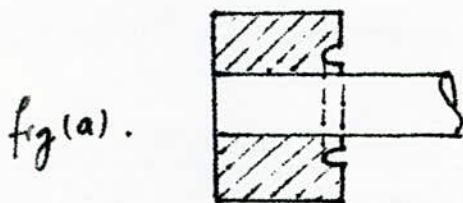


Il arrive souvent que des arbres soumis à des efforts alternés soient emmanchés à force dans les alésages de pièces, la concentration de contrainte ainsi produite à l'extrémité de l'alésage peut servir de foyer pour l'amorçage des fissures de fatigue, qui en se propageant progressivement conduisent à la rupture des arbres. Le tableau (B) donne une idée sur la variation de la limite d'endurance des systèmes emmanchés en fonction des formes des arbres.

Tableau B.

$D = 50 \text{ mm}$ , $L = 34,5 \text{ mm}$	$\sigma_b \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$
	24,2
	9,8
	11,2
	> 15,5

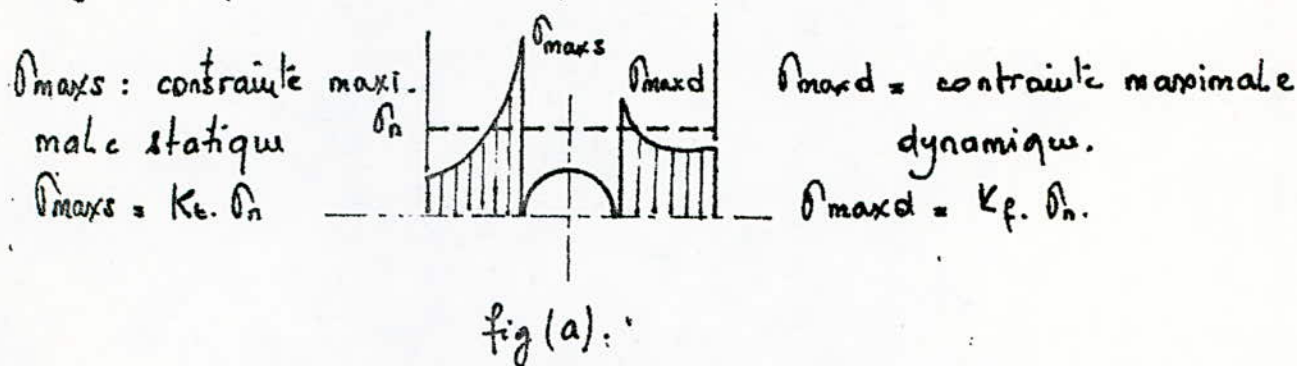
Il a été montré par expérience que l'existence d'une précontrainte de compression superficielle et l'exécution d'une gorge circulaire dans la bague près de l'emmanchement peuvent permettre à l'arbre de retrouver son endurance initiale. (fig a)



En effet, la compression superficielle étouffe toute fissure et la gorge soulage, à l'aide d'une meilleure répartition des contraintes, la section dangereuse.

### 3.4. Trous.

La détermination photo-élastique du coefficient de concentration de contrainte  $K_t$  révèle que le point le plus chargé est toujours le bord extérieur du trou et que les criques de fatigue naissent toujours dans ce point (figa).



La diminution de la concentration de contrainte aux bords d'un trou dans le cas de charges variables explique la sensibilité et l'adaptation à l'effet de trous qu'offre le matériau.

D'après Thum et Oszchatz [3], la limite d'endurance en flexion rotative d'éprouvettes percées de trous transversaux de différents diamètres, est minimale pour un rapport des diamètres du trou et de l'éprouvette ( $\frac{d}{D}$ ) égale à 0,18 (fig b).

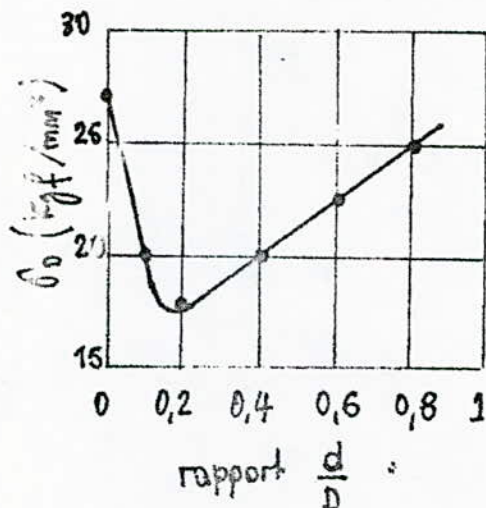
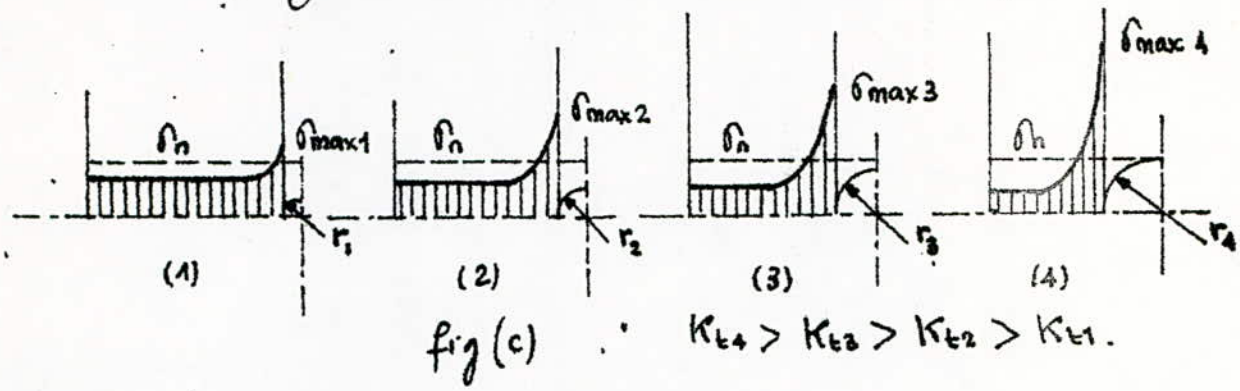


fig (b).

Des essais analogues en traction, flexion rotative, flexion plane, et en torsion ont montré que pour un même diamètre de l'éprouvette la limite d'endurance de celle-ci diminue si le diamètre du trou augmente. En effet, le coefficient de concentration de contrainte  $K_t$  augmente avec l'augmentation du diamètre du trou fig(c).



Les résultats des essais ont également montré que le cas le plus défavorable correspond aux trous d'axe normaux à celui de l'éprouvette. Il existe cependant des moyens pratiques de diminuer l'effet des trous.

- Usinage et polissage d'un arrondi à l'orifice du trou de rayon aussi grand que possible.
- évasement des orifices des trous. En effet, l'évasement par un poinçon conique provoque la formation des précontraintes de compression favorables à la limite d'endurance.
- Usinage d'entailles de soulagement transversales à côté des trous ou mordant légèrement sur le bord. (fig d).

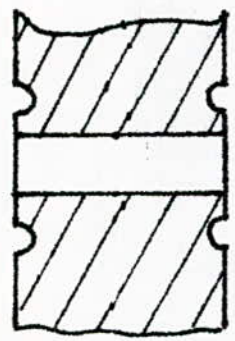
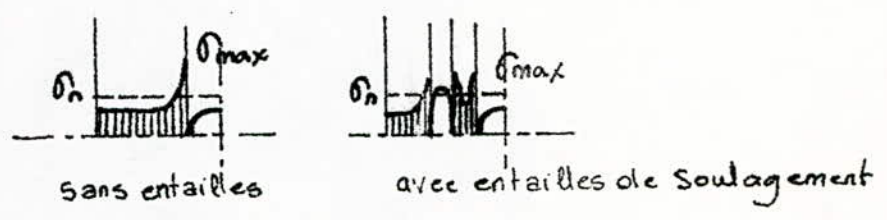


fig (d)



répartition des contraintes

### 3.5. Rainures Longitudinales.

On usine souvent des rainures longitudinales sur les arbres soumis à des efforts alternés. Afin de déterminer l'influence de ces rainures sur l'endurance de ces arbres, des essais en flexion rotative d'éprouvettes rainurées ont conduit au fait que la limite d'endurance diminuait.

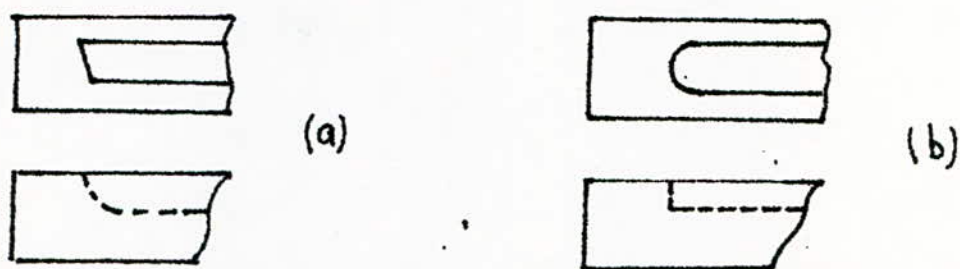
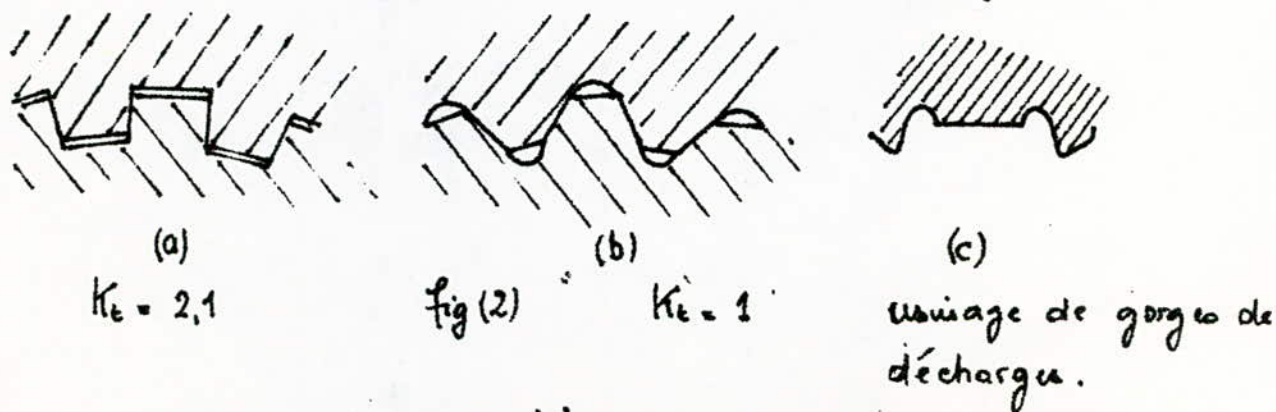


fig (1)

L'arbre de la fig (1.a) offre une meilleure résistance à la fatigue que celui de la fig (1.b) du fait que dans le dernier cas la pointe de contrainte est plus concentrée au fond et à l'extrémité de la rainure qui est usinée par une fraise travaillant en bout produisant des stries circulaires. Par contre, dans le cas de la fig (1.a) la rainure est réalisée par une fraise engendrant des stries longitudinales favorables.

Le moyen le plus simple d'améliorer la limite d'endurance des arbres avec rainures, est d'arrondir les angles vifs au fond de la rainure et d'abattre les arêtes des bords extérieurs (fig 2. b).



#### 4. Etat de surface.

Il est évident que les pièces présentant un bon état de surface résistent mieux à l'effet des charges alternées que les pièces usinées de manière grossière (fig a).

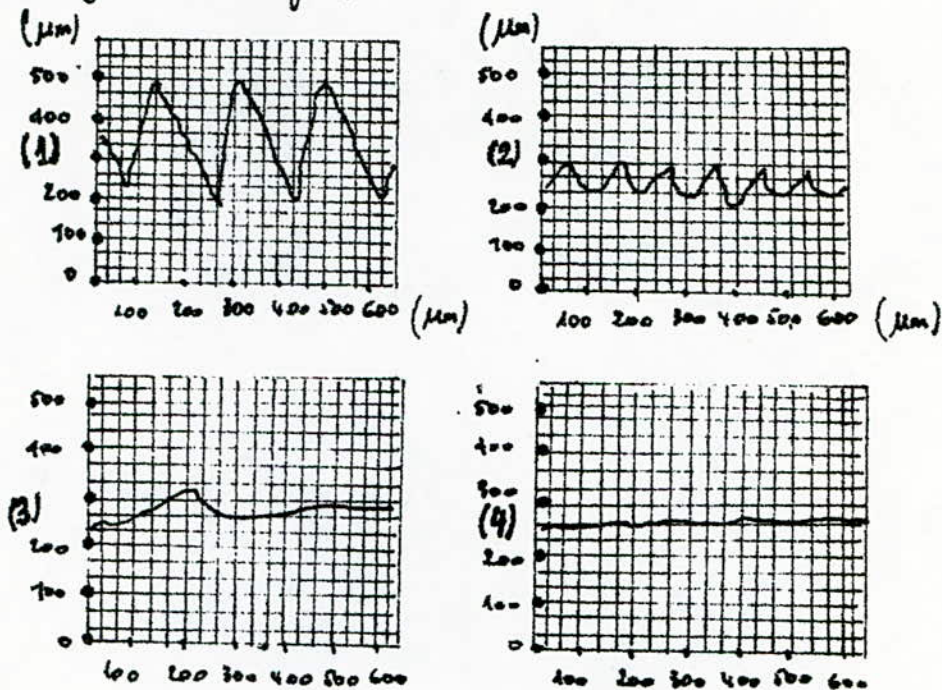


fig (a)

- (1) : surface fraisé grossièrement.  $\sigma_D = 20 \text{ kgf/mm}^2$ .
- (2) : — — — fraisé finement.  $\sigma_D = 25 \text{ kgf/mm}^2$ .
- (3) : surface polie à la main grossièrement.  $\sigma_D = 16 \text{ kgf/mm}^2$ .
- (4) : — — — polie à la main finement.  $\sigma_D = 16,5 \text{ kgf/mm}^2$ .

Toute irrégularité ou défaut de surface peut être considéré comme une microfissure capable de conduire à la rupture si elle se trouve orientée favorablement dans le champ des contraintes.

#### 4.1. Rayures d'usinage.

Les expériences faites par divers chercheurs ont montré que dans plusieurs cas la cassure finit suit rigoureusement la dis-

ection des stries d'usinage et que les stries circulaires servent beaucoup plus d'amorce de fissures de fatigue que celle longitudinales. Il a été également montré que la limite d'endurance des pièces ne dépend pas directement de la rugosité de la surface, mais plutôt de l'acuité et de l'écartement des entailles (stries).

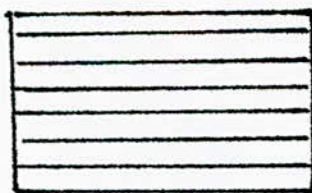
Il apparaît donc indispensable, l'étude des stries qui développent les outils de machines sur les surfaces des pièces pendant leur usinage dont les résultats doivent nous permettre chaque fois d'opter pour le meilleur procédé d'usinage développant les stries les moins dangereuses possible.

#### 4.1.a. Tournage

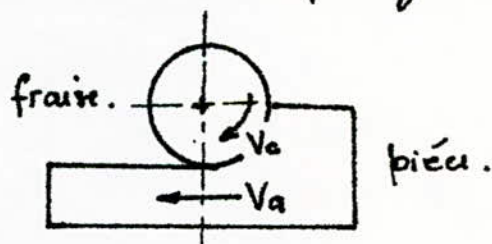
Il est préférable de pratiquer un tournage lent avec une faible profondeur de passe et un bon refroidissement.

#### 4.1.b. Fraisage.

Il convient de faire tourner la fraise dans le même sens que l'avance de la pièce, mais avec une vitesse relative plus grande.



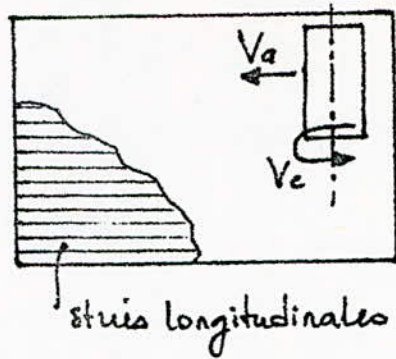
stries engendrées par un fraisage en concordance.



#### 4.1.c. Rectification.

Comme dans le cas du tournage, il est préférable de réduire la profondeur de passe et de refroidir abondamment la pièce afin d'éviter l'apparition des contraintes d'extension défavorables à la limite d'endurance.

Le meulage doit être longitudinal dans la mesure du possible



réctification plane

$V_c$ : vitesse de coupe.

$V_a$ : — d'avance.

#### 4.2 Surface brute de forge.

Dans beaucoup d'application pratiques, Les aciers sont utilisés à l'état brut. de forge et de traitements thermiques. Le mauvais état de surface ajouté à la présence de calamines et la fragilisation due à une décarburation superficielle constituent les principales causes de l'amorçage des fissures de fatigue.

La limite d'endurance de telles pièces peut être améliorée par traitements thermo-chimiques (cimentation, cyanuration) qui provoquent des contraintes superficielles de compression favorables.



# Chapitre III PHENOMENE DE FATIGUE

## A. Mécanismes de fatigue.

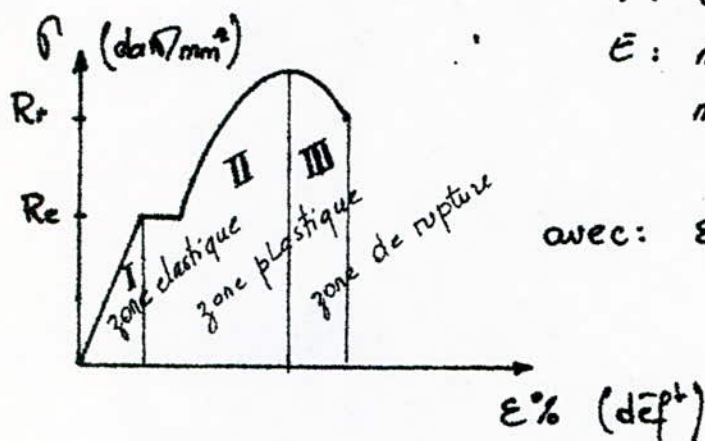
Au début, le phénomène de cassure des pièces était attribué au dépassement soit d'un effort maximal, soit d'une déformation optimale conformément aux théories de l'élasticité.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

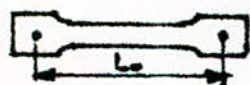
$\varepsilon$ : déformation en pourcent.

$\sigma$ : contrainte appliquée.

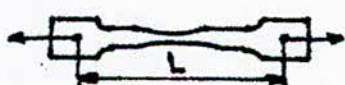
$E$ : module d'élasticité du matériau.



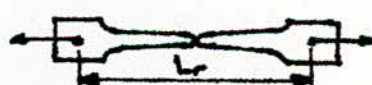
avec:  $\varepsilon = \frac{l \cdot l_0}{l_0} \cdot 100.$



épr. initiale



épr. en déformation  
élast. puis plast.



épr. en rupture.

schémas de la déformation d'une éprouvette essayée en traction statique jusqu'à rupture.

Ces anciennes théories permettent de calculer avec précision les efforts statiques et leur effets, mais demeurent incapables de conduire à de bons résultats dans le cas de charges dynamiques, ceci peut être expliqué par le fait que:

- l'élimination de l'effort n'entraîne pas la disparition immédiate de la déformation correspondante et un phénomène d'hysteresis peut apparaître en cas d'efforts cycliques.
- Les contraintes ne sont pas réparties uniformément, comme le suppose la théorie de l'élasticité, par suite des concentrations de contraintes dues aux formes même des pièces.
- en absence d'efforts extérieurs, les contraintes ne sont plus nulles, car les métaux sont généralement le siège de contraintes internes d'origine mécanique ou thermique.
- Les métaux ne sont ni continus ni homogènes.

C'est pourquoi, un grand nombre de chercheurs se sont orientés vers l'étude du phénomène réel de la fissuration des pièces de machines, qui conduit le plus souvent à leur rupture.

Les différentes études et expériences ont conduit aux théories mécaniques et physiques suivantes.

## **A1.** Théories mécaniques.

### 1. Théorie des efforts secondaires.

Il a été observé que la résistance effective des corps solides diffère beaucoup de celle attribuée aux efforts de cohésion moléculaires. En effet, les défauts et microfissures existant à la surface ou à l'intérieur des pièces créent des

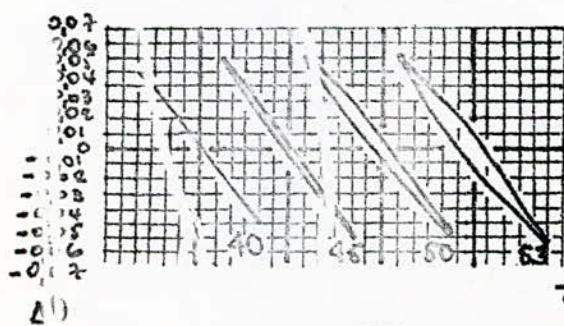
concentrations de contraintes. De plus, ces pièces peuvent être le siège de contraintes résiduelles dues à certains traitements mécaniques (écrouissage) ou thermiques (trempe).

Ainsi donc, les métaux par suite de l'hétérogénéité physique, chimique et de l'existence des contraintes résiduelles, sont soumis à des efforts secondaires, qui se manifestent par formation des points de contraintes, qui peuvent dépasser localement la résistance de cohésion du métal. ce qui provoque l'amorçage d'une fissure microscopique qui se propage dans le métal jusqu'à sa rupture.

Dans le cas de corps polycristallin, une concentration de contraintes apparaît aux frontières communes des cristaux, du fait que ces derniers se déforment différemment par suite de leur différentes orientations, limite d'élasticité et caractéristiques de durcissement.

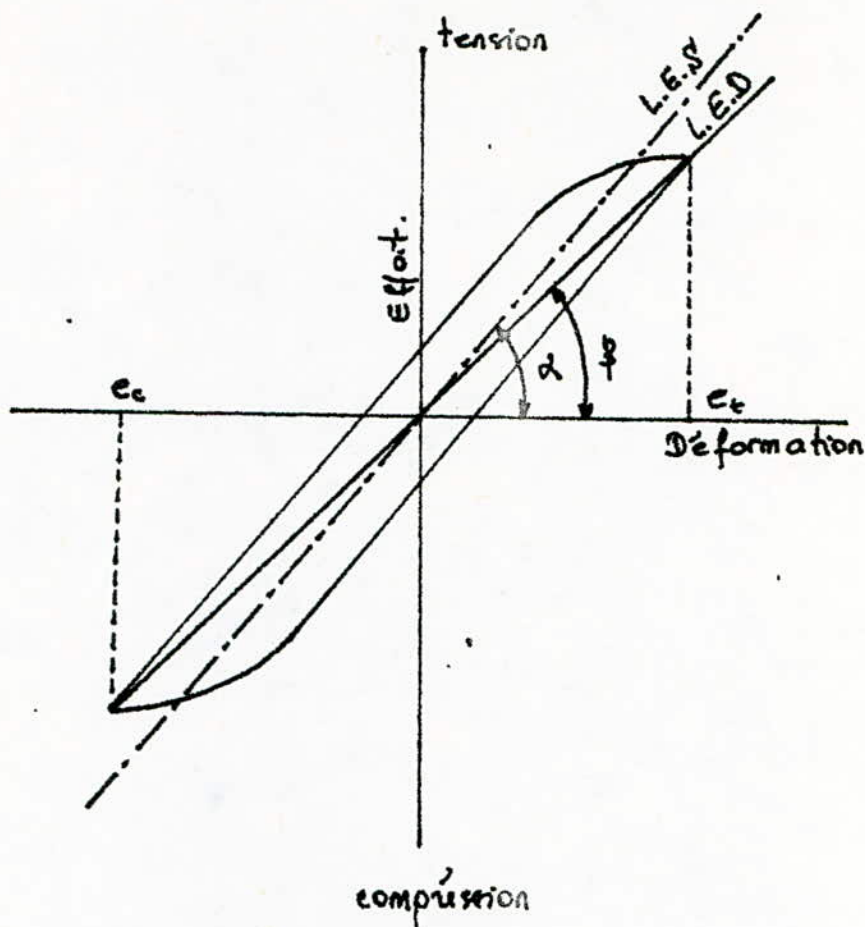
## 2. Théorie de l'hysteresis des déformations pseudo-élastiques.

Tout matériau déformé élastiquement revient lentement à sa position initiale, qui dans le cas d'efforts répétés avec une grande fréquence ne peut jamais être atteinte, ce qui provoque une sorte de pompage de la déformation, de plus il a été observé par enregistrement que la courbe des efforts décroissant ne coïncide pas avec la courbe des efforts croissants. Il se produit donc un phénomène d'hysteresis des déformations appelés pseudo-élastiques.



cycles d'hysteresis en torsions alternés relevés sur machine "Schenck" pour un acier au nickel-chrome.

$\tau$  (kgf/mm<sup>2</sup>)



cycle de déformation avec hysteresis aux efforts alternés axiaux.

La ligne élastique dynamique (L.E.D) est pratiquement une droite, et correspond à une certaine limite supérieure des efforts alternés, appelé limite d'élasticité dynamique qui a été identifiée avec la limite d'endurance par Bauehinger [4].

L'expérience montre qu'en répétant les cycles d'efforts un grand nombre de fois, leur aire varie d'un cycle à un autre et deux cas peuvent se présenter.

1. L'aire du cycle tend vers une limite, le cycle se stabilise et une rupture ne peut se produire tant que l'amplitude et la fréquence des efforts restent inchangés. Il y a donc une limite d'endurance.

2. Augmentation continue de l'aire du cycle et une rupture surviendra sûrement après un nombre suffisant de cycles.

La forme du cycle et son évolution indiquent donc l'état de fatigue du métal.

### 3. Théorie de l'érouissage.

Gough et Hanson [5] ont déduit des expériences, la théorie de l'érouissage, constatant que les métaux ductiles peuvent se déformer plastiquement sous l'effet de charges alternées et que cette déformation décroît régulièrement du fait de l'érouissage progressif du matériau. Une fissure ne peut se former que si l'amplitude des efforts dépasse la limite élastique et quand le durcissement atteint la capacité maximale d'érouissage du matériau.

Des mesures de dureté indiquent que seules certaines régions des cristaux atteignent le durcissement maximal, et Gough [6] en conclut que la fissure naît et se propage dans des zones à dureté d'érouissage élevée.

On admet donc que la fatigue conduit aux deux étapes de modification suivantes.

1. Perturbation non dangereuse de la structure du métal provoquant un durcissement par érouissage
2. Si l'effort et le nombre de cycles sont suffisamment grands, des fissures se forment et peuvent conduire à la rupture.

A haute température, l'érouissage ne provoque aucun durcissement, par suite de la restauration et de la recristallisation immédiates.

#### 4. Théorie de la propagation des fissures.

La théorie de la propagation d'une fissure repose sur le fait que l'énergie nécessaire à son extension est proportionnelle à sa surface et qu'une extension est accompagnée par une diminution de l'énergie de déformation du métal au voisinage de la fissure. Il y'a donc propagation si l'énergie de surface de la fissure dépasse celle de déformation du métal.

Head [ ] a proposé un modèle de calcul de la vitesse de propagation d'une fissure, tenant compte de l'énergie absorbée par déformation plastique aux extrémités de la fissure.

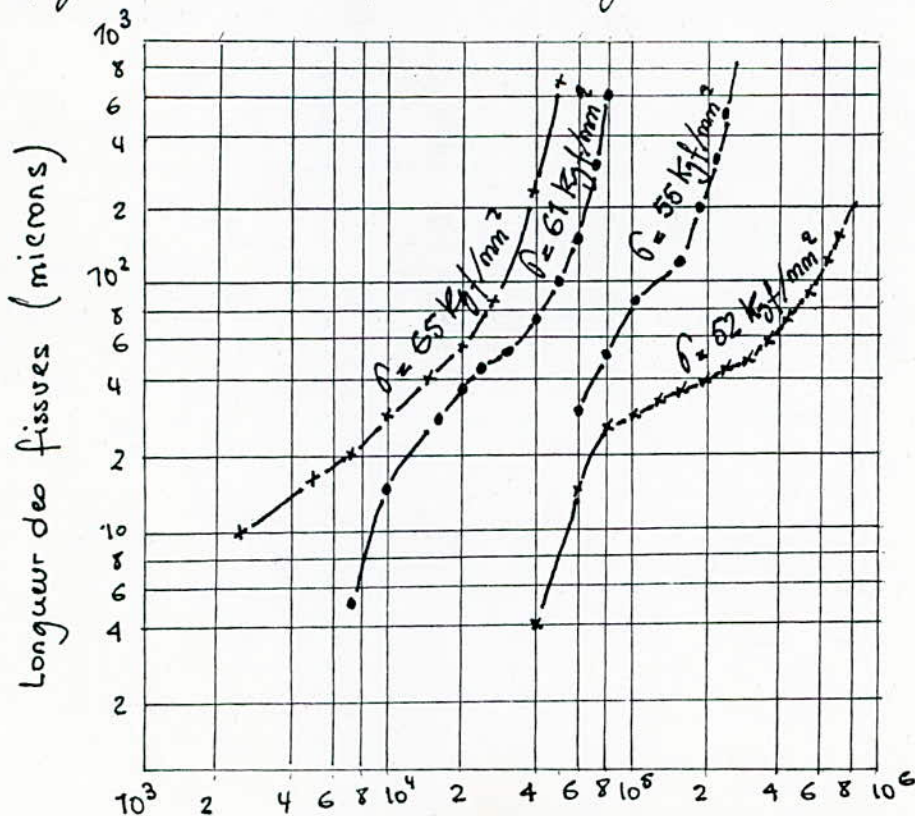
$$\frac{dl}{dN} = \frac{l^{3/2}}{s^{1/2}} f(\sigma_a)$$

$\sigma_a$  : contraintes alternées

$s$  : profondeur de la zone plastifiée précédant la fissure.

$l$  : demie-longueur de la fissure au bout du  $N^{\text{ième}}$  cycle.

La figure ci-contre exprime la longueur de la fissure en fonction de la



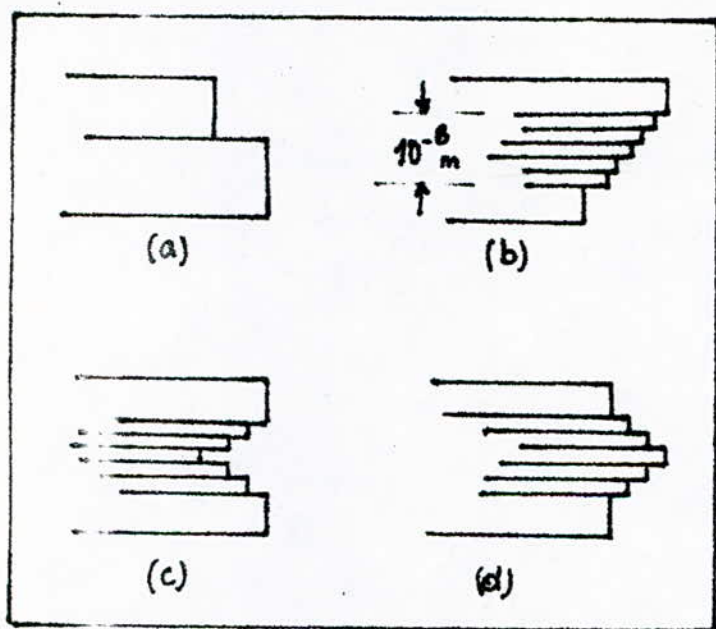
contrainte appliquée et du nombre de cycles.

## A.II. Théories Physiques

L'application de contraintes cycliques voisines de la limite d'endurance provoque au bout d'un certain nombre de cycles, la formation de bandes de glissement persistantes, facilement observables sur les surfaces polies.

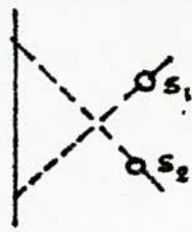
Dans le cas de certains métaux, ces bandes de glissement conduisent à l'apparition de microfissures par le mécanisme physique de formation d'intusions et d'extrusions sur les surfaces des pièces.

Les deux modèles suivants expliquent cette théorie.

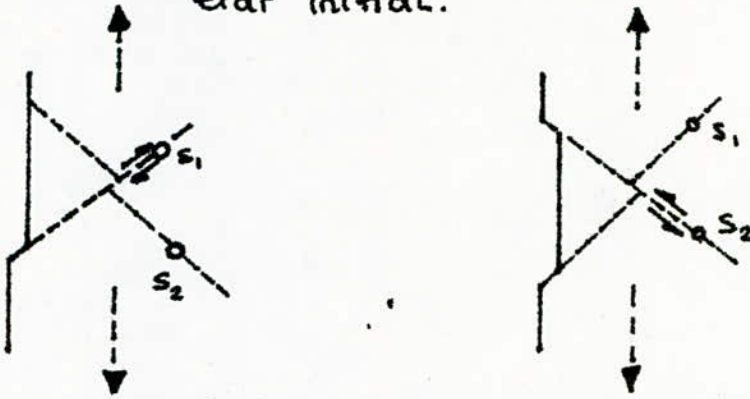


modèle de Wood de formation des fissures de surface par glissement.

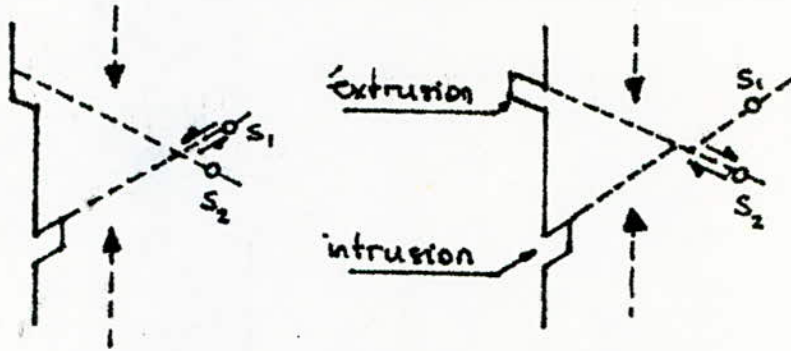
- fig (a, b) : formation de marches statiques.  
fig (c) : ——— d'intusions.  
fig (d) : ——— d'extrusions.



état initial.



Première alternance. (traction).



Seconde alternance. (compression).

modèle de Cottrell et Hull.

A chaque alternance de l'effort, le signe des dislocations engendrées par les sources  $s_1$  et  $s_2$  s'inverse et ainsi se forme les intrusions et extrusions qui ne sont autres que des microfissures.

D'après ces deux modèles, on conclut que l'apparition de bandes de glissement constitue l'un des caractères particuliers de la fatigue.



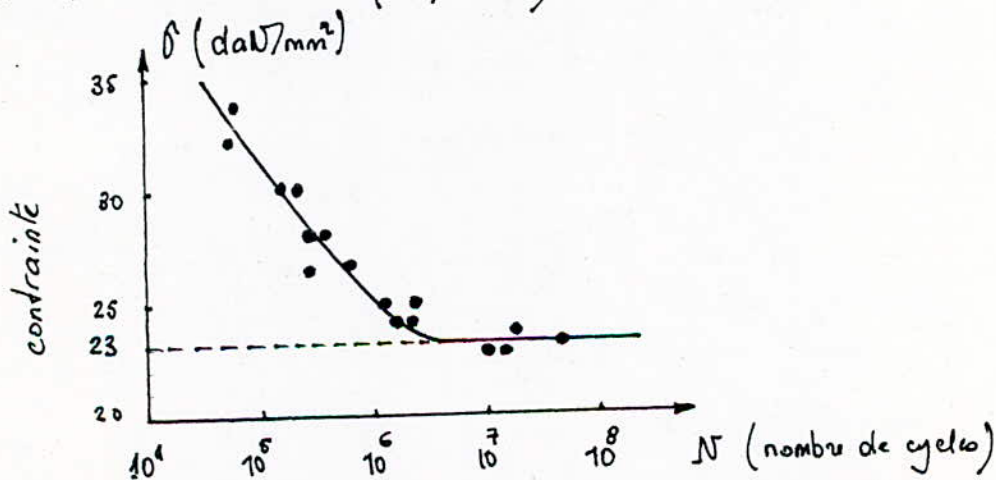
## B. Méthodes de détermination de La Limite d'endurance des métaux.

Différents expérimentateurs ont proposé différentes méthodes de détermination de la limite d'endurance des aciers, parmi les plus simple on cite.

- La méthode basé sur le tracé de la courbe de Wöhler
- méthode directe de Locati.

### B.1. Méthode statistique de longue durée (tracé de la courbe de Wöhler).

Soit une série d'éprouvettes identiques de même matériau, soumises à des essais de fatigue en variant d'une éprouvette à l'autre la contrainte maximale ( $\sigma_{max}$ ) tout en conservant le rapport de contrainte ( $R_s = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ ) constant. On remarque que chaque éprouvette se rompt après un certain nombre de cycles  $N$ , appelé, durée de vie du matériau en fatigue dans le niveau de contrainte appliqué, la courbe de Wöhler est l'ensemble des points de coordonnées  $(N, \sigma_{max})$



courbe de Wöhler pour un acier doux essayé en flexion rotative.

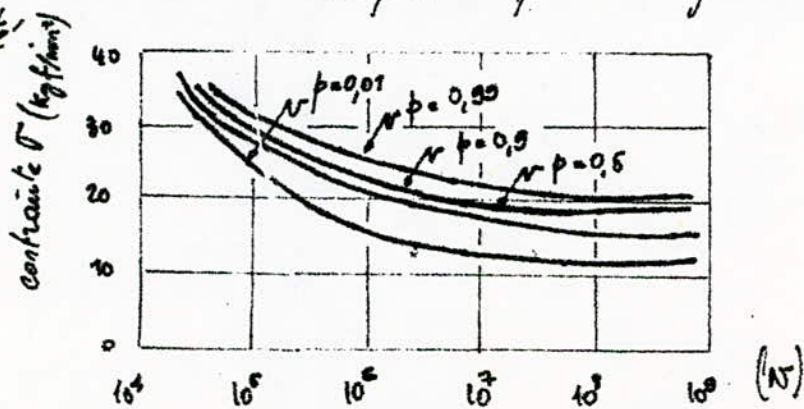
Pour certains matériaux comme les aciers, la courbe de Wöhler tend asymptotiquement vers une horizontale ( $\sigma = \sigma_0$ ). Cette limite n'est autre que la limite d'endurance du matériau qui est définie comme étant la plus grande valeur de  $\sigma_{max}$  pour laquelle l'éprouvette présente une durée de vie infinie. Sur une courbe de Wöhler on peut distinguer trois parties distinctes.

1. l'asymptote horizontale correspondant à la limite d'endurance.
2. ligne oblique donnant la durée de vie en fonction de la contrainte. (zone d'endurance limitée).
3. zone des contraintes élevées ou domaine de la fatigue oligocyclique.

Or du fait des paramètres suivants,

- tolérances d'usinage et de montage des éprouvettes.
- défauts de centrage des éprouvettes.
- variation des paramètres pendant les essais (température, corrosion atmosphérique)
- hétérogénéités chimiques et structurales.

Le tracé de la courbe de Wöhler présente des points figuratifs plus ou moins dispersés et les trois zones citées précédemment ne sont observables qu'avec une certaine précision. C'est pourquoi la courbe de Wöhler est remplacée par une famille de courbes d'équiprobabilité.



Le point de coordonnées  $(N_p, \sigma_p)$ , indique que la pièce sollicitée par la contrainte  $\sigma_p$ , a la probabilité "p" de rompre au bout de  $N$  cycles. La courbe moyenne d'endurance est celle pour laquelle 50% des éprouvettes se rompent après  $N_{0,5}$  cycles au niveau de contraintes  $\sigma_{0,5}$ . On remarque toute fois que le tracé des courbes de Wöhler nécessite un grand nombre (30 ÷ 40) d'éprouvettes, ce qui rend cette méthode coûteuse bien qu'elle soit la meilleure.

## B.2. Méthode directe de Locati.

Il convient de concevoir une méthode de détermination de la limite d'endurance des métaux à l'aide d'un nombre d'essais réduit pendant un temps restreint. M<sup>r</sup> Locati a dans ce but développé une méthode directe des paliers successifs qui repose sur l'hypothèse de Miner. [7].

### B.2.1. Théorie du dommage de Miner.

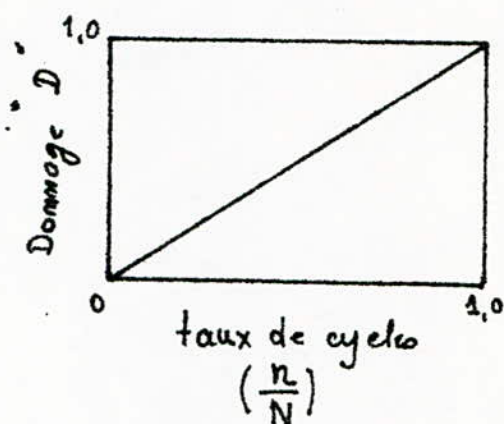
Le dommage présente deux aspects différents, dont le premier est physique et le second descriptif représentant quantitativement l'endurance des matériaux.

M<sup>r</sup> Miner [7] a proposé une première loi linéaire du dommage, reposant sur le fait que l'application de  $n_i$  cycles à un niveau de contrainte  $\sigma_i$ , dont le nombre de cycles moyen de rupture est  $N_i$ , entraîne un accroissement du dommage d'un taux de  $\frac{n_i}{N_i}$  et que la rupture surviendrait quand la somme des taux de dommage atteint l'unité.

$$\sum_{i=1}^s \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_s}{N_s} = 1.$$

Autrement dit, si une certaine fraction  $\frac{n_i}{N_i} = x$  de la durée de vie de l'éprouvette est consacré à un niveau de contrainte  $\sigma_i$ ,

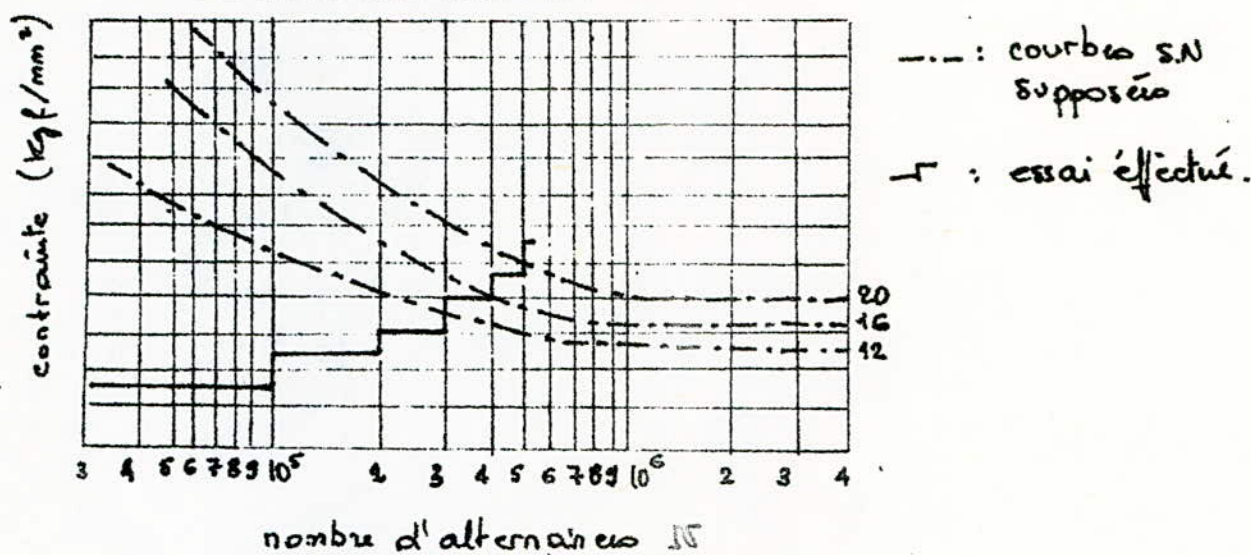
la durée de vie restante pour le niveau de contrainte  $\sigma_k$  est

$$\frac{n_k}{N_k} = 1 - \frac{n_i}{N_i} = 1 - x.$$


Conformément donc à la méthode des paliers successifs développée par M<sup>r</sup> Locati, l'éprouvette est soumise à des paliers de charges échelonnées croissantes, chaque palier correspond à un nombre de cycles "n" constant, l'échelonnement des charges étant lui-même constant, le premier palier est situé légèrement en dessous de la limite d'endurance présumée. On représente de plus sur le diagramme de Wöhler les branches horizontales de trois courbes hypothétiques dont le coude est situé vers  $10^6$  cycles (cas des aciers). Pour une commodité de la représentation, on utilise des abscisses en échelle logarithmique. Les courbes d'endurance présentent alors une partie droite inclinée tant que la limite d'endurance n'est pas atteinte et une ligne horizontale parallèle à l'axe des abscisses une fois que cette limite est atteinte. On calcule en suite pour chacune des trois courbes, les dommages partielles  $\frac{n}{N}$  correspondant aux différents niveaux de contraintes. On porte par la suite les valeurs des dommages cumulés pour chacune des trois courbes en fonction des limites d'endurance correspondantes et la contrainte, pour laquelle le dommage cumulé est égale à 1, représente la limite d'endurance de l'éprouvette essayé.

Soit un exemple de calcul.

1. tracé des courbes.



2. Calcul des dommages cumulés.

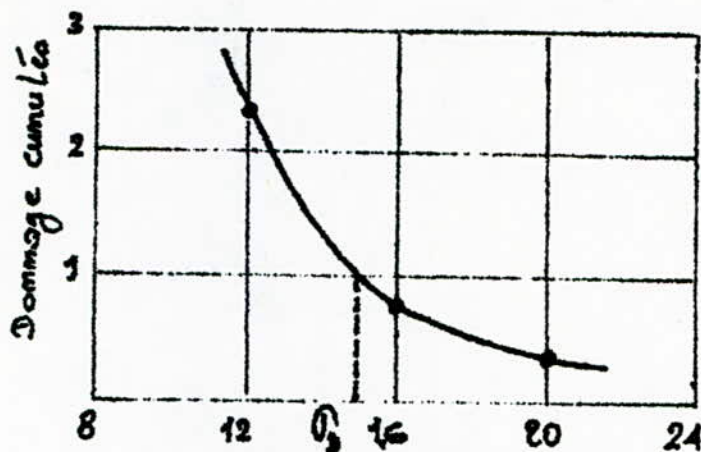
contraintes (kgf/mm <sup>2</sup> )	Nombre de cycles -n.	Dommages cumulés					
		Courbe $\sigma_D=12$		Courbe $\sigma_D=16$		Courbe $\sigma_D=20$	
		N	$n/N$	N	$n/N$	N	$n/N$
8	$10^6$	$\infty$	0	—	—	—	—
12	$10^5$	$10^6$	0,10	$\infty$	0	—	—
16	$10^5$	$4 \cdot 10^5$	0,22	$10^6$	0,10	$\infty$	0
20	$10^5$	$2 \cdot 10^5$	0,50	$5 \cdot 10^5$	0,20	$10^6$	0,10
24	$10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	0,83	$3 \cdot 10^5$	0,33	$6 \cdot 10^5$	0,16
28	$4 \cdot 10^4$	$0,7 \cdot 10^5$	0,57	$1,8 \cdot 10^5$	0,22	$3,2 \cdot 10^5$	0,12
dommages cumulés			2,22		0,85		0,38

3. détermination de la limite d'endurance de l'éprouvette essayée.

Du tableau précédent on relève les points suivants.

( $\sigma_D=12$ ,  $D=2,22$ ) ; ( $\sigma_D=16$ ,  $D=0,85$ ) et ( $\sigma_D=20$ ,  $D=0,38$ )

On relie ces trois points par la courbe représentant la variation du dommage en fonction de la limite d'endurance.



limite d'endurance. ( $Kgf/mm^2$ ).

D'après la méthode de Locati, l'éprouvette a une limite d'endurance  $\sigma_b = 15 Kgf/mm^2$ .

INFLUENCE DE LA STRUCTURE  
ET DE LA CORROSION SUR LA  
LIMITE D'ENDURANCE.

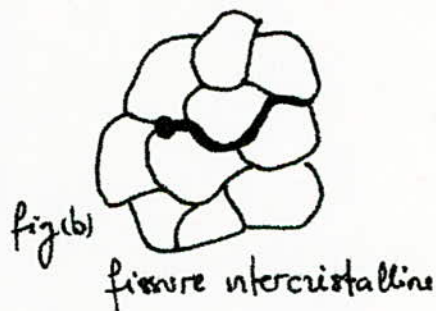
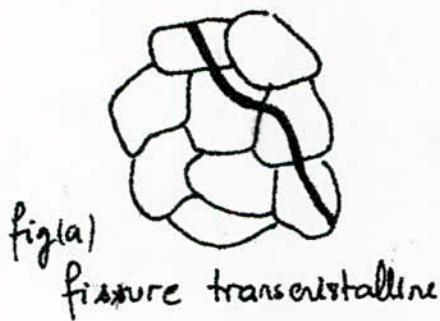
Chapitre IV

# A. ASPECTS MÉTALLOGRAPHIQUES ET STRUCTURAUX.

## A.1. Étude micrographique.

### A.1.a. Propagation de La fissure.

La méthode de métallographie microscopique a permis de révéler l'existence de fissures dans les éprouvettes ayant subi un grand nombre d'alternances. Dans le cas du fer, des aciers ferreux et à structures de ferite et perlite, les fissures de fatigue naissent et préfèrent se propager à travers les grains de ferite. C'est pourquoi ce type de fissuration est appelé transcrystalline. Par contre la fissuration intercrystalline est favorisée en cas de présence de piqûre de corrosion ou de fragilisation intergranulaires (fig a et b).



Les fissures se propagent souvent suivant une allure en zig-zag du fait de la difficulté que rencontre la fissure pour se faire chemin dans le métal localement durci par écrouissage. Il arrive parfois que la propagation d'une fissure soit bloquée par suite de la modification locale du champ de contrainte due à l'ouverture de la fissure, d'un durcissement et d'un vieillissement local (fig c).





### A.1.b. formation des bandes de glissement.

La micrographie a permis également de constater la formation après un certain nombre d'alternances des efforts, des bandes de glissement sur les surfaces d'éprouvettes. Ces bandes de glissement chargées de microfissures-isolées au début-s'étendent ensuite pour couvrir toute la surface fig (1).



fig (1) : fissures dans les bandes de glissement après  $1,56 \cdot 10^6$  cycles sous  $\pm 19 \text{ kgf/mm}^2$ . Acier doux.  
M. Hempel [8].

À la suite d'un polissage électrolytique, la plupart des bandes de glissement de surface disparaissent sauf un certain nombre de ces bandes qui restent persistentes. Ces dernières se produisent généralement pour des contraintes peu supérieures à la limite d'endurance et dès qu'on atteint 10% de la durée de vie totale de l'éprouvette essayée. À la rupture, ces bandes persistantes n'existent plus, mais de nombreuses striations apparaissent sous forme d'une suite d'arêtes et de crevasses appelées extrusions et intrusions respectivement (fig 2).



fig (2).

micrographie électronique de la surface d'une éprouvette d'acier doux fatiguée en flexion alternée sous  $\pm 20 \text{ kgf/mm}^2$ .

Ces intrusions et extrusions n'étant autres que des microfissures, la rupture par fatigue peut être la conséquence d'une expansion et propagation de ces dernières.

Dans le cas des métaux à structures simples sollicités par des contraintes alternées, des pores se forment et se réunissent pour former des embryons de criques. En cas de grandes contraintes, ces pores se forment dans les sous-joints à grande désorientation résultant de la déformation locale des grains. Ces embryons de criques peuvent servir d'amorces aux fissures de fatigue.

## A.2. Étude radiocristallographique.

L'évolution de la structure des métaux soumis à des efforts de fatigue, a fait l'objet d'un grand sujet de recherche. Au moyen des rayons X il a été observé que l'évolution cristalline ne se manifeste que pendant la courte période précédant immédiatement la rupture. La modification cristalline se caractérise par une apparition d'astérisques sur les tâches de diffraction. Il est alors possible de prévoir la cassure si on a la chance d'irradier la surface où la fissure apparaît. La modification de la maille cristalline peut être due à un déséquilibre des contraintes superficielles par suite de la diminution des contraintes de tension dues aux efforts alternés.

Des travaux effectués sur des monocristaux d'argent et de zinc par Shrier [9] ont conduit au fait que l'évolution cristalline au cours des essais de fatigue passe par trois étapes.

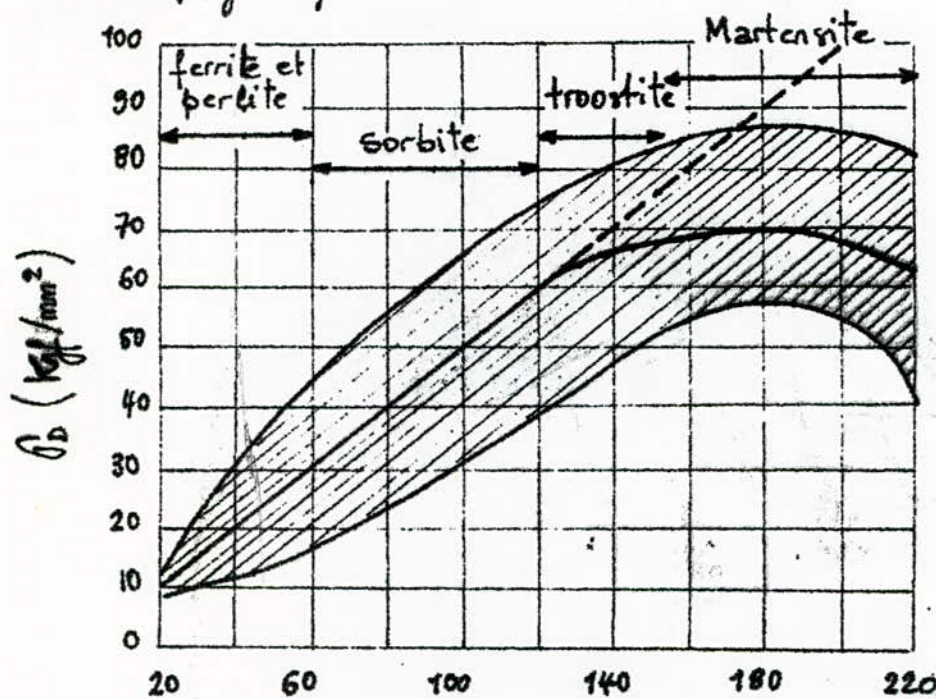
- a. augmentation du nombre des dislocations et durcissement par écrouissage.
- b. formation de sous-joints et disparition des dislocations à l'aide de glissement dans le réseau distordu.
- c. fragmentation du métal et augmentation rapide du nombre des dislocations.

Ces trois étapes sont observées quelque soit le niveau des contraintes, mais les distorsions et fragmentations apparaissent plus tôt sous fortes contraintes.

### A.3. Relation entre La limite d'endurance et La structure des métaux.

Plusieurs expérimentateurs ont cherché à relier par des formules empiriques, la limite d'endurance aux différentes propriétés mécaniques ( $R_r, R_e, A, S, K, HB \dots$ ) mais malheureusement toutes les relations proposées ne sont applicables que pour des cas précis des matériaux et des conditions d'expériences.

C'est avec la charge de rupture qu'il existe la relation la plus nette. En effet, dans la plupart des travaux publiés, la limite d'endurance est reliée directement à la charge de rupture  $R_r$ , le rapport  $\sigma_D/R_r$  est appelé rapport d'endurance. La charge de rupture étant elle même liée à la structure du matériau, on peut donc conclure que cette dernière peut être reliée à la limite d'endurance (fig 3.1).



fig(3.1): relation entre la charge de rupture, la structure et la limite d'endurance

$R$  (kgf/mm<sup>2</sup>)

Il est possible de définir des rapports  $\sigma_b/R_m$  avec précision en cas où on considère des aciers de même structure micrographique.

- Ferrite : le rapport d'endurance  $\sigma_b/R_m$  peut varier de 0,57 à 0,63 ces deux limites correspondent respectivement au fer pur avec 0,05 % de carbone et à l'acier doux étiré et recuit.
- Perlite : pour un acier à perlite lamellaire ( $R_m = 80 \text{ daN/mm}^2$ ) le rapport  $\sigma_b/R_m$  est de l'ordre de 0,38. lorsque la structure de l'acier est à perlite granulaire la charge de rupture et la limite d'endurance sont plus basses, mais le rapport d'endurance  $\sigma_b/R_m$  reste plus ou moins constant (0,37)
- ferrite et perlite : cette structure peut être obtenue dans le cas des aciers à l'état recuit. le rapport  $\sigma_b/R_m$  diminue de 0,63 à 0,38 au fur et à mesure que la teneur en carbone augmente.
- Sorbite : une structure sorbitique des aciers peut être obtenue après trempe et revenu à haute température (Amélioration). le rapport  $\sigma_b/R_m$  pour de telle structure est particulièrement élevé (0,56 ÷ 0,60)
- troostite : Les aciers trempés et revenus à moyennes températures ( $\approx 400^\circ\text{C}$ ) dont la structure est formée de troostite ; leur rapport d'endurance  $\sigma_b/R_m$  est de l'ordre de 0,45.
- Martensite : Les aciers trempés et revenu à basses températures dont la structure est martensitique, ont un rapport d'endurance  $\sigma_b/R_m$  qui peut varier de 0,3 à 0,4.

Il est très important de noter la bonne résistance à la formation des germes de fissures dans le cas d'aciers très résistants et la bonne résistance à la propagation des fissures dans le cas des aciers

plastiques.

#### A.4. Influence des traitements thermiques sur la limite d'endurance.

Tout traitement thermique agit sur la structure du matériau en provoquant des contraintes internes résiduelles qui peuvent être favorables ou non à la limite d'endurance et ceci selon que la pièce traitée soit localement mieux adaptée ou non aux conditions de travail.

##### A.4.1. Trempe et revenu.

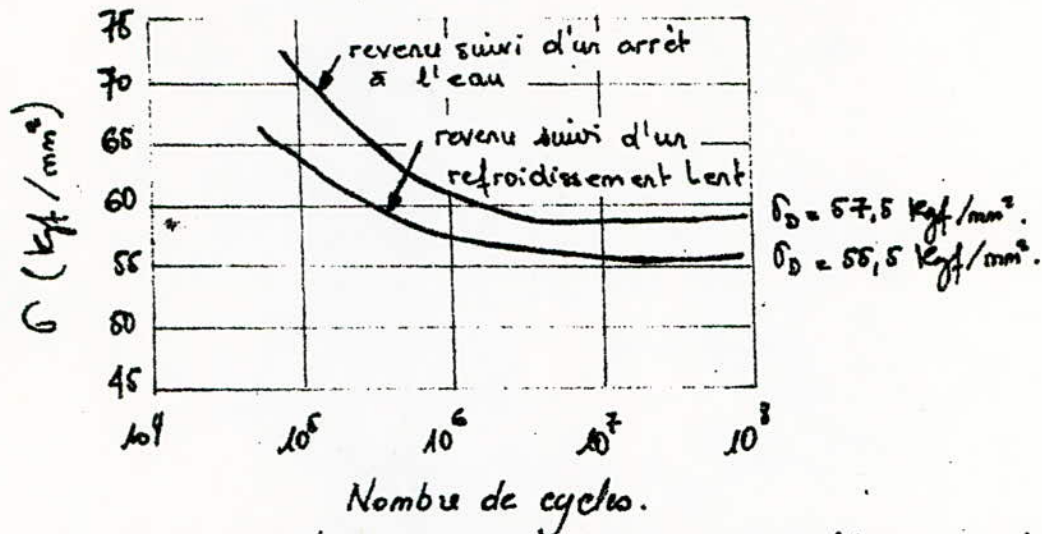
J. Domey [10] a montré que les contraintes résiduelles développées par trempe à refroidissement rapide sont défavorables dans le cas de sollicitations de traction quelque soit l'acier, mais qu'elles peuvent être favorables dans le cas de sollicitations de flexion pour les aciers demi-durs et durs. En effet, une trempe au dessous de la ligne de transformation  $A_1$  développe des contraintes de tension au centre et de compression à la périphérie. L'évaluation de l'influence des contraintes internes sur la limite d'endurance a été étudiée par Bühler et Buchholz [11] pour un acier à 0,34 % de carbone essayé en flexion rotative (tableau. 4.1).

Tableau (4.1).

refroidissement à partir de 600°C dans.	contraintes résiduelles en surface (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_D$ (kgf/mm <sup>2</sup> )
le four	0	28
l'huile à 80°C	- 21	30
l'eau glacée ...	- 34	33
l'eau salée à - 5°C	- 34	34

Pour certains aciers, la trempe énergétique diminue à une valeur très basse la limite d'endurance qui ne peut être améliorée qu'avec rev.

en et a malgré l'abaissement de la charge de rupture (fig 4.2).



fig(4.2): Amélioration de l'endurance en flexion rotative d'un acier (Z40C13), chauffe: à 1000°C, trempé à l'air suivi d'un revenu pendant 20 min à 660°C.

On peut conclure qu'il est préférable de terminer le revenu par un refroidissement rapide pour une meilleure limite d'endurance.

Une trempe superficielle augmente sensiblement l'endurance des organes. Cette amélioration est due aux contraintes de compression produites en surface par la structure martensitique.

La fig (4.3) présente l'influence de l'épaisseur de la couche durcie sur la limite d'endurance ( $\sigma_D$ ).

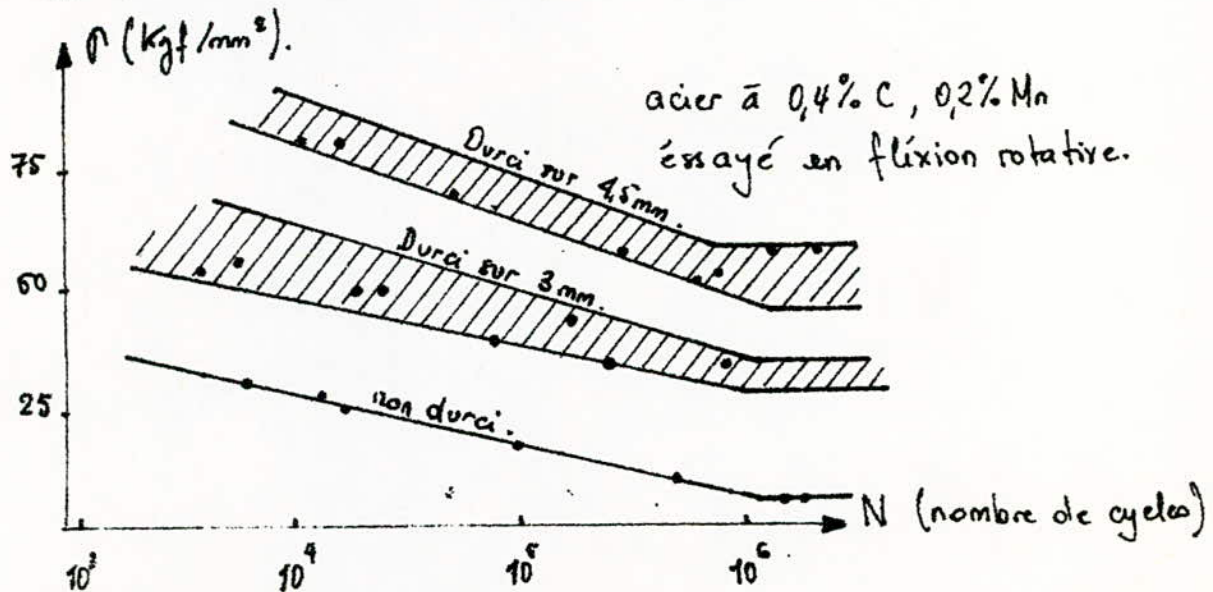
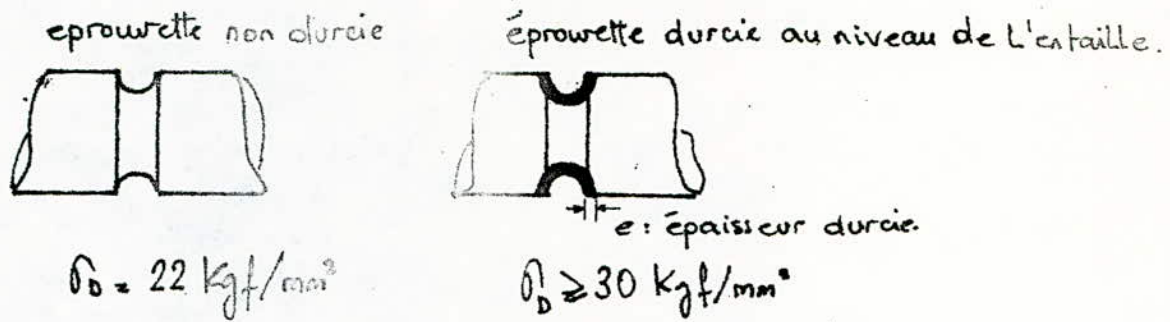


fig (4.3)

La trempe superficielle à partir d'un chauffage au chalumeau a permis d'augmenter sensiblement la limite d'endurance d'une éprouvette entaillée (fig 4.4).



#### A.4.2. Cémentation et trempe, revenu.

La cémentation suivie de trempe transforme la répartition des contraintes en créant en surface des contraintes de compression (résultat de l'augmentation du volume spécifique de la couche cémentée) et des contraintes de tension à cœur, de sorte que la superposition de la tension due à la flexion et des contraintes résiduelles dues aux traitements est caractérisée par une diminution des contraintes de tension en périphérie et une augmentation à cœur (fig 4.5). Ce qui favorise l'amorçage de la fissure de fatigue sous la couche durcie.

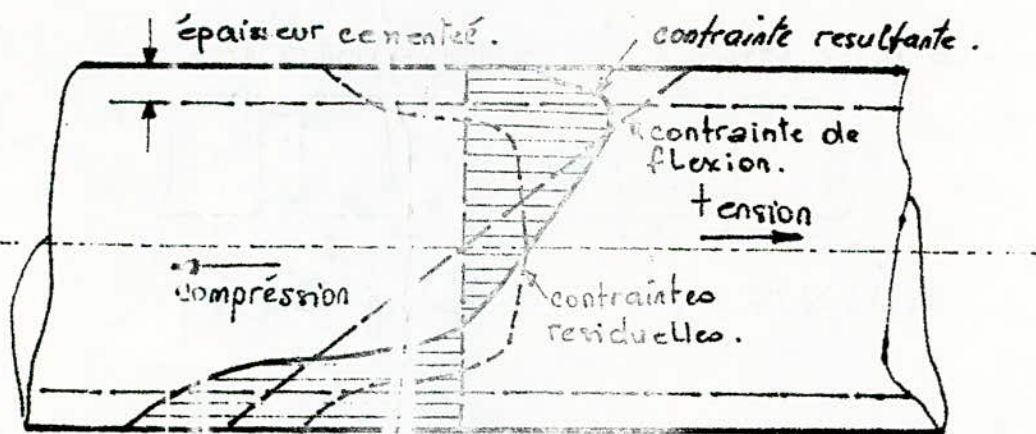


fig (4.5) : Distribution des contraintes dans une pièce cémentée, en flexion.

Le tableau (4.2) donne une idée sur l'influence de la cémentation sur  $\sigma_D$ .

### A.4.3. Nitruration.

La nitruration des pièces provoque un durcissement superficiel par précipitation de nitrure et une formation des contraintes de compression ce qui permet d'aboutir à des résultats analogues à ceux obtenus par cémentation suivie de trempe. (Tableau 4.6).

Tableau (4.6): influence de la nitruration.

composition des aciers en %	limite d'endurance en flexion rotative (Kgf/mm <sup>2</sup> )		
	sans Nitrurat.	avec Nitrurat.	% d'augment.
C = 0,3 ; Cr = 1,83 ; Al = 1,12	40,5	55	36
C = 0,32 ; Cr = 1,24 ; Al = 0,93	48,5	62,5	30
C = 0,16 ; Cr = 0,85 ; Mo = 0,41	46,5	67,5	47

Tableau (4.7): influence de la cémentation.

composition des aciers en %	limite d'endurance en flexion rotative (Kgf/mm <sup>2</sup> )		
	non cémenté	cémenté	% d'augment.
C = 0,16	25,6	48,1	88
+ 1% Cr	40,7	83,4	105
+ Cr = 2 ; Mo = 0,2 ; Ni = 2	60	191,4	209



## B. INFLUENCE DE LA CORROSION SUR LA LIMITE D'ENDURANCE.

La majorité des pièces de construction en Algérie sont exposées au phénomène de la corrosion c'est pourquoi l'étude de l'influence des milieux corrosifs (l'humidité, l'eau de mer, pétrole etc...) sur la limite d'endurance de ces pièces s'annonce très importante.

En effet, le phénomène de corrosion se manifeste par une formation de piqûres et parfois même des fissures de fatigue qui conduisent souvent à la rupture avec une diminution de la limite d'endurance. Selon que la pièce soit préalablement attaquée ou non par la corrosion, on distingue deux cas différents de l'influence de cette dernière sur la résistance à la fatigue des pièces sollicitées par des charges répétées.

### 1. Fatigue après corrosion.

La corrosion dans ce cas agit sur l'état de surface des pièces en provoquant l'apparition de défauts superficiels augmentant la rugosité et son influence sur la limite d'endurance dépend du caractère même de la corrosion.

Trois cas peuvent alors être distingués.

#### 1.a. Corrosion généralisée.

La surface de la pièce est uniformément atteinte (fig a)

#### 1.b. Corrosion localisée.

La corrosion dans ce cas provoque une attaque en un certain nombre de points en créant des piqûres profondes. L'endurance et l'ensemble des propriétés mécaniques se trouvent réduites à des valeurs très basses (fig b)

#### 1.c. Corrosion intergranulaire.

L'influence de ce type de corrosion devient très importante

surtout lorsqu'il s'agit de métaux dont la fissuration est elle-même intergranulaire (fig c)

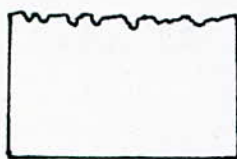


fig (a)



fig (b)



fig (c)

## 2. Fatigue et corrosion simultanées.

L'étude du phénomène de fatigue sous corrosion est d'une importance capitale du moment qu'il intéresse la majorité des organes fonctionnant en présence de milieux aussi fréquents que l'eau et l'air, qui réduisent énormément la limite d'endurance de ces organes (fig 2.a)

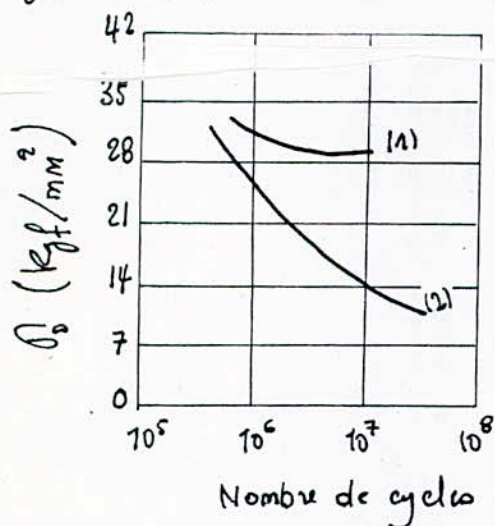


fig (2.a)

courbe de fatigue d'un acier au carbone à 0,56% C recuit ( $R_e = 64 \text{ kgf/mm}^2$ ) sous corrosion.

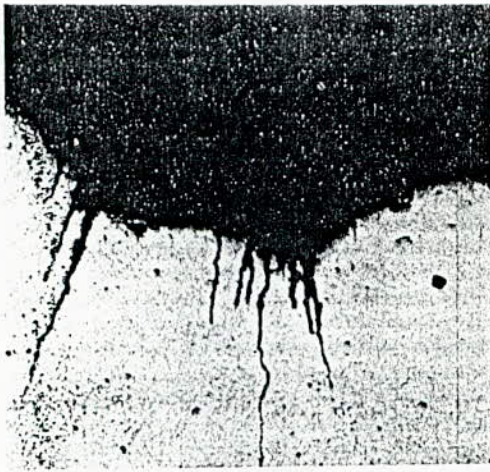
(1) : à l'air.

(2) : de l'eau douce.

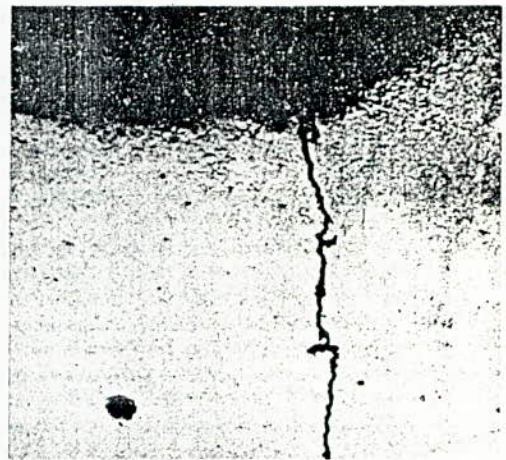
L'influence de la présence d'oxygène dans tout processus de fatigue sous corrosion est prédominante; c'est pourquoi des milieux comme l'eau douce, l'eau de mer, les huiles acides, les gaz sulfureux et l'air humide sont très actifs vis à vis de la formation des fissures de fatigue

## 2.1. Aspects.

L'aspect des cassures de fatigue sous corrosion depend essentiellement de la nature du milieu corrosif et de la structure du materiau. Ainsi sur les éprouvettes en acier on observe des piqûres de rouille formant des anneaux et couvrant l'ensemble de la surface. Le nombre de criques issues des piqûres est d'autant plus grand que l'agressivité du milieu corrosif est plus élevée (fig 2.b et c).



fig(2.b). fissures de fatigue au fond d'un filetage d'un tube en acier au manganèse silicium sous corrosion dans une solution de  $H_2S$ .



fig(2.c). fissures de fatigue au fond d'un filetage d'un tube en acier au manganèse silicium sous corrosion dans une solution de  $Na_2SO_4$ .

L'agressivité de  $H_2S$  supérieure à celle de la solution  $Na_2SO_4$  explique le grand nombre de criques formées lors de la fatigue-corrosion dans la solution d'acide sulfurique.

## 2.2. Mécanisme de la fatigue sous corrosion.

Lors de la fatigue sous corrosion, il se produit une formation de criques dues aux piqûres provoquant un effet d'entaille causant des détériorations locales très fortes. Ce fait est expliqué par une aération différentielle des divers points du métal, donnant naissance

à une différence de potentiel et à des actions électrochimiques entre la surface en cathode et les fonds de piqûres en anode.

Simnad et Evans [12] pensent que les efforts alternés agissent sur la corrosion par les facteurs suivants.

1. endommagement de la structure cristalline qui devient plus réactive vis à vis des agents de corrosion.
2. rupture du film protecteur (enlèvement des produits de la corrosion) avec diminution de la polarisation anodique ou diminution de la résistance du chemin électrolytique entre anodes et cathodes localisées.
3. augmentation de l'apport d'oxygène avec diminution de la polarisation cathodique.

Autrement dit, après un début normal de la corrosion plus ou moins généralisée, le film protecteur se trouve rompu par les vibrations dues aux efforts alternés. Il en résulte une corrosion électrochimique préférentielle entre la surface en cathode et les fonds des piqûres en anode. Les produits de la corrosion évacués par les vibrations, accélèrent le processus en améliorant l'alimentation de la surface en oxygène et en diminuant la stabilité du métal. Après un certain nombre de cycles le phénomène ralentit du fait de l'augmentation de la résistance entre la surface et le fond des criques avec la propagation de la fissure. D'autres criques peuvent alors être développées, dont l'une finira par aller très loin et entraînera la cassure par fatigue.

### 2.3 Moyens de prévention contre la corrosion.

Le moyen le plus simple d'éviter les résultats d'une corrosion est de fabriquer les organes de machines exposés à des actions chimiques de la part des milieux corrosifs, en métaux non attaquables ou inoxydables, mais cette solution est souvent rejetée du fait des prix qui

deviennent écessifs pour des pièces de grandes dimensions. C'est pourquoi on a fait appel à d'autres techniques dont les plus répandues sont les suivantes.

### 2.3.1. Action sur Le métal.

On peut à l'aide de certains traitements du métal, augmenter la résistance à la corrosion de celui-ci

#### 2.3.1.a. revêtements protecteurs.

Les revêtements protecteurs peuvent être de nature métallique ou non métallique.

##### — revêtements métalliques.

ces revêtement peuvent être obtenus par des techniques très variées, parmi ces techniques on peut citer:

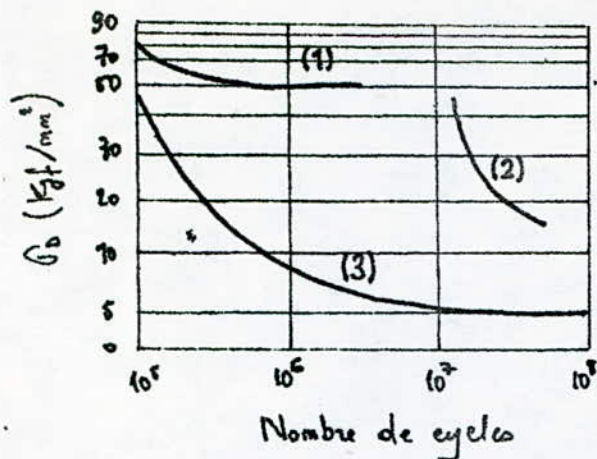
- revêtement au trempé (zincage à chaud, étamage, ...)
- aluminage au pistolet.
- traitements thermiques: nitruration, cémentation au zinc (shérardisation) ou carbonituration suivie de zincage et bichromatage.

##### — revêtements non métalliques.

on peut également protéger le métal contre la corrosion en utilisant des peintures comme les résines épony et vernis silicones ou des revêtements plastiques (Nylon etc...) en cas où les conditions de travail le permettent.

#### 2.3.1.b. Compressions superficielles.

Au cours de l'action des efforts alternés, les fissures s'ouvrent et se referment alternativement à chaque alternance, de manière à ce que le liquide soit aspiré ou refoulé. Une réduction de l'action de pompage du liquide dans la fissure qui augmente la résistance à la corrosion, peut être obtenue à l'aide de compression superficielle préalablement produite par grenailage (fig 3)



influence du grenaillage sur la fatigue corrosion d'un acier à 0,8% C, 0,57% Mn étiré, rectifié ( $R_m = 143 \text{ Kgf/mm}^2$ )

(1): non grenaillé, à l'air.  
 (2): non grenaillé, fatigue-corrosion  
 (3): grenaillé, fatigue-corrosion.

- fig (3) -

### 2.3.2. Action sur le milieu corrosif

On peut diminuer l'agressivité du milieu corrosif en le mélangeant avec certaines solutions comme le carbonate de soude, les chromates et bicarbonate de sodium et de potassium. Ces deux dernières solutions peuvent même rendre le milieu passif par formation d'une pellicule constituée par des oxydes ferriques et chromiques hydratés. Le Tableau (4) donne une idée sur les résultats obtenus des différents procédés de protection de l'acier contre la fatigue sous corrosion d'eau douce (BUCHHOLZ et KRERELER [13]).

Tableau (4.) Acier essayé	%	$\sigma_D$ en $\text{Kgf/mm}^2$			Moyen de protection employé.	Efficacité du moyen (c) %
		corrosion		à l'eau douce avec protec.		
		à l'air	à l'eau douce			
Au carbone, recuit	0,87	43	14	31	Galvanisation à chaud	159
— " —	0,70	33	21	29	Shérardisation	67
— " —	0,33	26	21	26	revêtement de résine	100
— " —	0,35	23	17	23	Addition de 0,02% $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	100
— " —	0,33	30	20	27	} Addition à l'eau de corrosion de 0,5 à 1% d'hui le émulsionn autc.	70
— " —	0,44	28	18	23		52
— " —	0,50	31	19	25		48

# chapitre V INSTALLATIONS DES ESSAIS DE FATIGUE.

Dans Les applications courantes, La majorité des organes essentiels de machines, supportent des efforts variables, c'est pourquoi les essais ordinaires de métaux par traction, dureté, choc..., se sont avérés insuffisants en vue du phénomène de la fatigue. Il est donc apparu indispensable de faire subir les éprouvettes et Les pièces réelles elle-mêmes des essais dont Les conditions sont aussi voisines que possible des conditions de fonctionnement. ce type des essais est appelé "essai d'endurance ou de fatigue".

Nous indiquerons dans ce chapitre Les principaux types de machines d'essai et une simple exposition des différents modes d'essai de fatigue

## 1. Classification des sollicitations dans Les essais de fatigue

### 1.1. sollicitations à amplitude constante.

On distingue trois types de sollicitations en fonction du temps (alternés, répétés, ondulés) quelque soit la nature des efforts appliqués (traction, flexion, torsion)

#### a/ sollicitations alternés

Les efforts changent de signe alternativement, si de plus les valeurs extrêmes sont égales en module ( $|\sigma| = |\sigma|$ ), la sollicitation est dite alterné pure sinon elle est dite alterné dissymétrique

#### b/ sollicitations répétés.

Les efforts conservent le même signe et varient de zéro à une valeur soit positive, soit négative ( $0$  et  $+\sigma$  ou  $0$  et  $-\sigma$ ). La valeur moyenne étant soit  $+\sigma/2$  soit  $-\sigma/2$ .

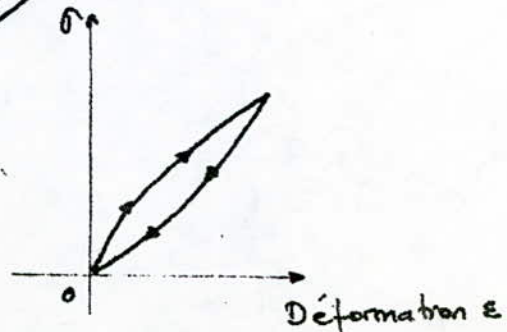
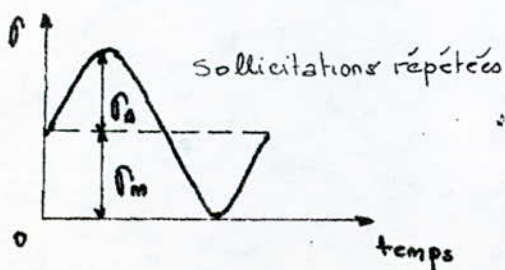
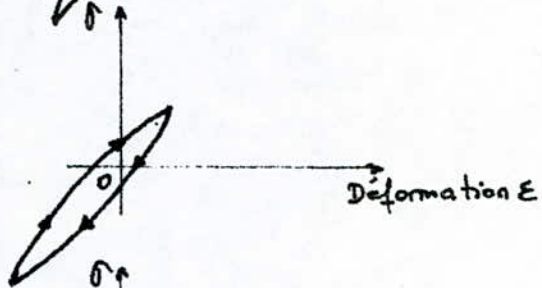
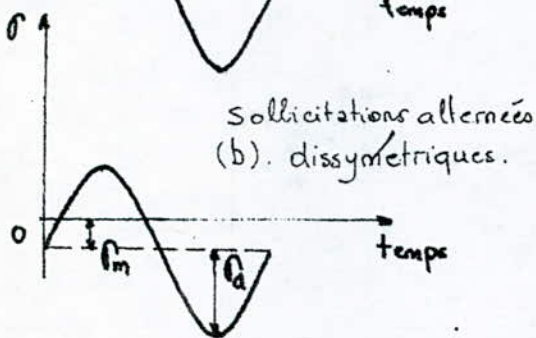
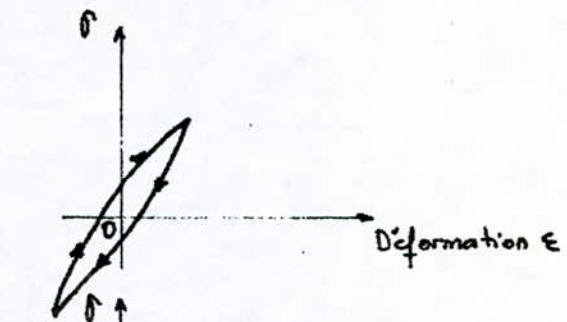
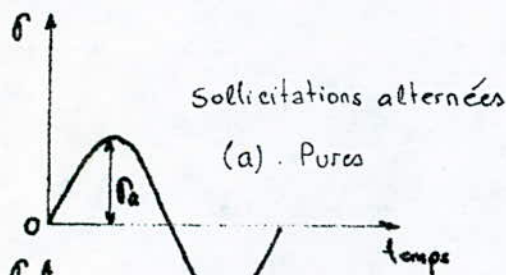
c/ sollicitations ondulées.

Les efforts varient de part et d'autre d'une certaine valeur moyenne non nulle, soit positive, soit négative, mais la valeur minimale demeure différente de zéro.

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

- si  $\sigma_m < \sigma_a$  : Les sollicitations sont alternées
- si  $\sigma_m = \sigma_a$  : Les sollicitations sont répétées.
- si  $\sigma_m > \sigma_a$  : Les sollicitations sont ondulées.

En admettant une variation sinusoidale de la contrainte en fonction du temps, les fig 1.a à 1.d traduisent chacun des cas cités ci-dessus. La variation de la contrainte en fonction de la déformation a été également représentée.





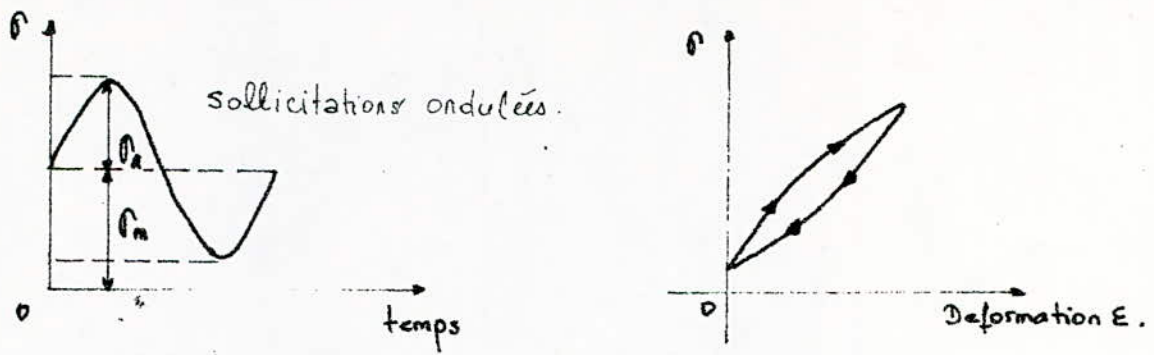


fig 1: représentation des différents cas de sollicitation; effort - temps et effort - déformation

### 1.2. Sollicitations à amplitude variable.

Afin de se rapprocher le plus possible des conditions pratiques, des expérimentateurs ont imaginé des essais de fatigue sous amplitude variable avec modulation sinusoïdale de cette dernière ou non (fig 2.a; 2.b et 2.c).

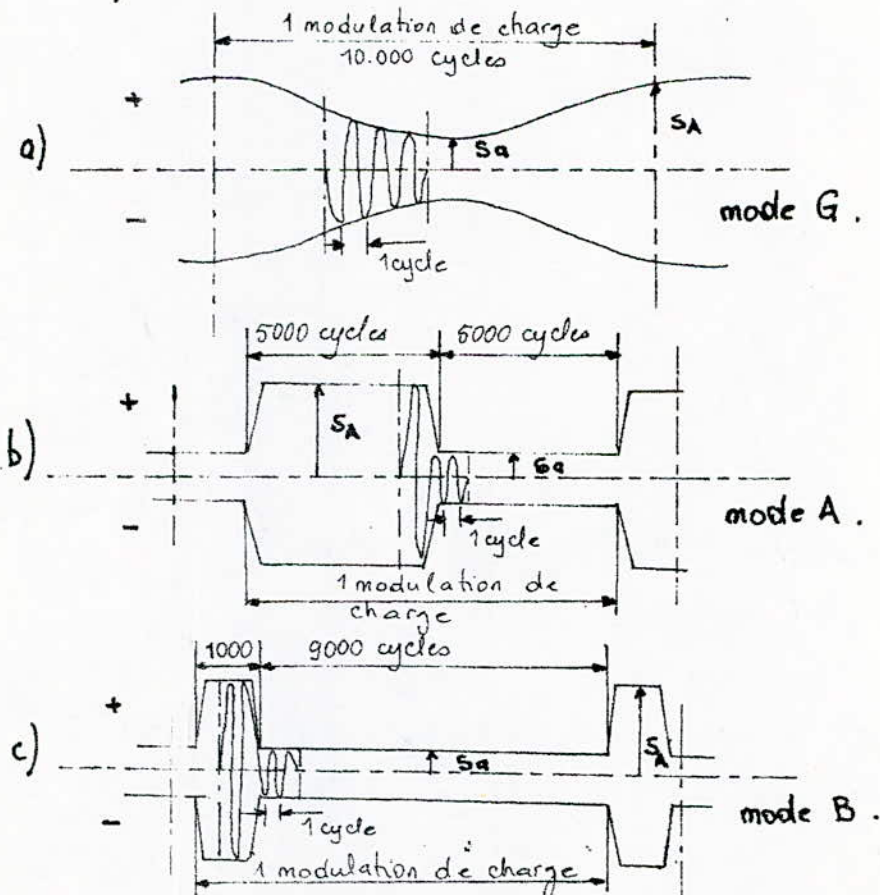


fig 2. schéma de variation de l'amplitude des contraintes.

## 2. Classification des essais de fatigue

D'après la nature des efforts appliqués et quelque soit le mode de sollicitation, on peut établir une classification des essais de fatigue.

- essais sous efforts axiaux (traction, compression)
- essais de flexion plane ou rotative.
- essais de torsion.
- essais sous efforts combinés (exemple: flexion et torsion)

A ces différentes catégories d'essais correspondent les divers types de machines: machine de flexion plane, machines de flexion rotative, machines de flexion par choc, machines de torsion, machines à efforts combinés. Ces machines permettent d'effectuer des essais sous amplitude constante ou, à l'aide d'un système de programmation, des essais à amplitude variable.

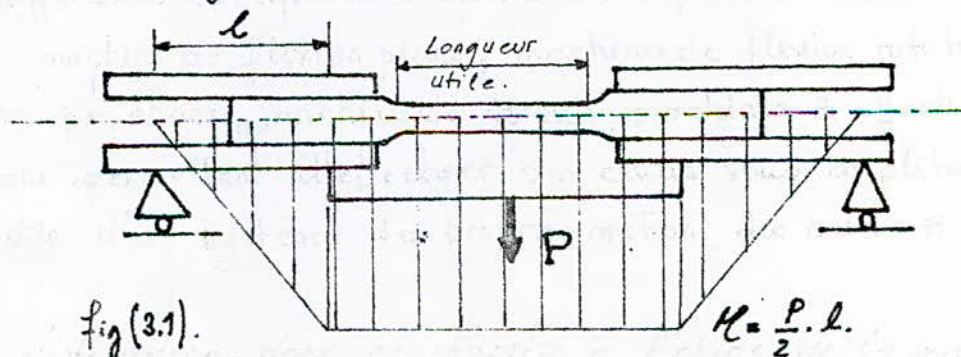
On s'intéressera dans ce chapitre à l'étude de la machine d'essai en flexion rotative du type "Schenck" qui reste parmi les plus utilisées.

### 2.1. Machine de flexion rotative du type "Schenck".

#### a/ Principe.

Dans les essais de flexion rotative, toutes les fibres, sauf la fibre neutre, sont successivement tendues puis comprimées. Ce mode de sollicitation s'obtient généralement par la rotation de l'éprouvette soumise à un effort de flexion de direction fixe.

L'éprouvette étant montée sur deux appuis, le moment de flexion est constant le long de la partie utile de l'éprouvette (fig 3.1).



L'éprouvette tourne à une vitesse de rotation de 2760 tr/mn, et supporte l'effort donné par un poids (d'une masse se déplaçant le long d'une tige filetée à l'aide du système Vis-écrou) au moyen d'une chape montée sur un roulement à deux rangées de billes qui permet d'obtenir un axe d'application de l'effort rigoureusement vertical, en dépit de la flexion de l'éprouvette.

Les contraintes agissant sur chaque fibre varient ainsi en fonction du temps suivant une loi sinusoïdale avec une valeur moyenne nulle; chaque rotation de l'éprouvette à un cycle d'effort. (fig 3.2).

L'amplitude de la variation de l'effort étant maximale pour les fibres externes, intervient dans le calcul de la contrainte.

$$\sigma_a = \sigma_{\max} = \frac{M}{I/r} \quad (\text{formule de Navier})$$

M: moment fléchissant par rapport à la section considérée.

I: moment de la section par rapport à l'axe neutre.

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

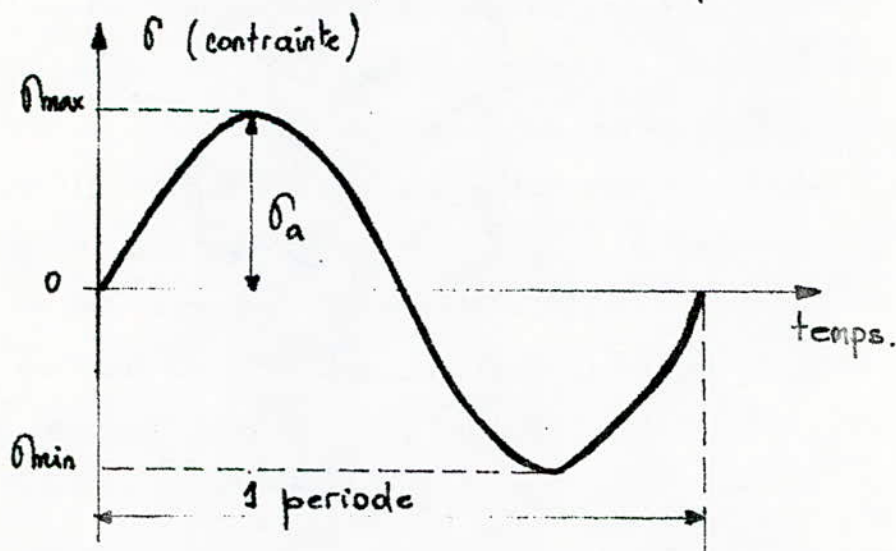


fig (3.2): variation de la contrainte en fonction du temps pendant l'essai en flexion rotative.

La figure (3.3) représente le schéma de principe de la machine "scheneck".

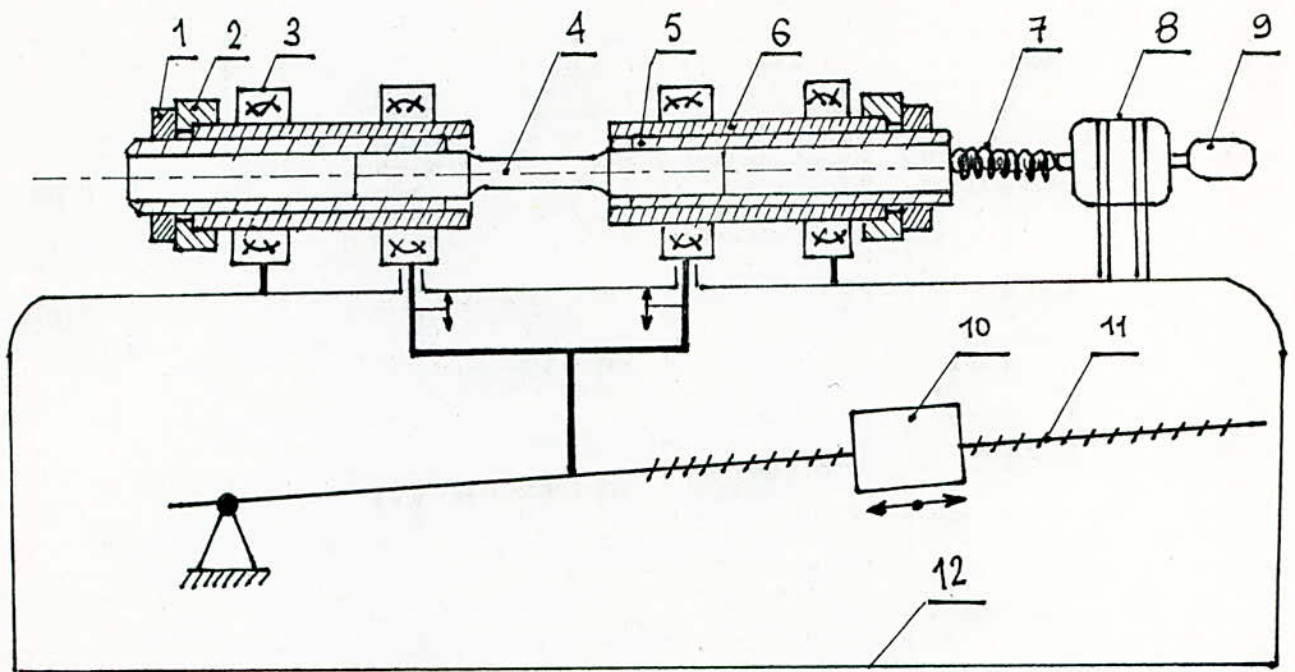


Fig (3.3)

1. Écrou moleté de serrage
2. Écrou moleté de montage et démontage.
3. Roulement orientable à deux rangées de billes.
4. Eprouvette d'essai.
5. chargeur conique.
6. arbre conique.
7. arbre flexible.
8. moteur électrique ; puissance : 0,32 kW.
9. Compteur digital.
10. masse.
11. tige fileté.
12. bâti.

La coupe longitudinale de la machine offre une meilleure exposition de l'appareil.

b/ Caractéristiques de La machine.

L'appareil "Schenck" est une machine d'essai de fatigue de flexion rotative à moment constant, présentant les caractéristiques suivantes

$n = 2760$  trs/mn vitesse de rotation de l'éprouvette

$P = 30$  daN charge maximale.

$f = 46$  Hz fréquence mécanique.

$K = 0,32$  KW Puissance du moteur électrique.

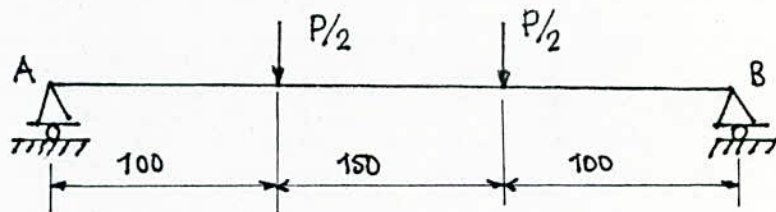
c/ Calculs de résistance.

c.1. Calcul de roulement.

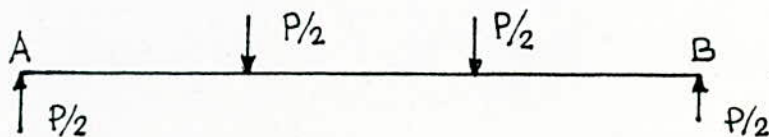
Les roulements utilisés dans ce type de machine sont à deux rangées de billes; En effet, ces types de roulements s'adaptent merveilleusement avec la nature de fonctionnement de la machine.

- possibilité d'une grande vitesse de rotation.
- bon fonctionnement sous charges radiales moyennes.
- possibilité de faible désassement de la bague intérieure par rapport à la bague extérieure.

Pour dimensionner le roulement, il est nécessaire de calculer et définir les différentes charges auxquelles il est soumis.



Par raisons de symétrie on a les réactions aux paliers A et B égales à  $P/2$ .



Le plus grand effort que donne la masse surchargée est  $P = 15 + 3,5d$

$$P_{\max} = 18,5 \text{ daN.}$$

La charge équivalente appliquée au roulement s'exprime par  $P_e$ .

$$P_e = x \cdot F_r + y \cdot F_a$$

où  $x$ : facteur radial  $F_r$ : charge radiale.

$y$ : facteur axial  $F_a$ : charge axiale.

On néglige dans notre cas la charge axiale, la charge équivalente devient.  $P_e = x \cdot F_r$  et  $x = 1$ .

$$\text{or } F_r = P_{\max} = 18,5 \text{ daN.}$$

La charge dynamique peut être calculée à l'aide de la relation suivante.

$$C = P_e \left( \frac{L_n \cdot n}{16666} \right)^{1/k}$$

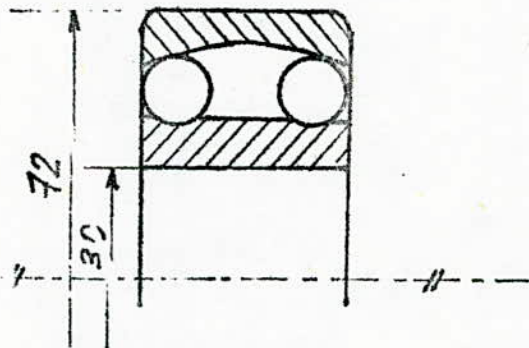
$$n = 2760 \text{ trs/mn}$$

$k = 3$  cas des roulements à billes.

$L_n = 10^7 \text{ h.}$  longévité des roulements.

$$\text{Al. } C = 18,5 \left( \frac{10^7 \cdot 2760}{16666} \right)^{1/3} = 2189 \text{ daN.}$$

Le roulement 30 BS 23 répondra aux données de charge et de longévité.



## C.2. Calcul de l'arbre flexible.

L'arbre flexible assurant la transmission du mouvement du moteur électrique vers le chargeur conique est un ensemble de deux ressorts à boudin enroulés l'un dans l'autre suivant deux sens contraires (fig 3.4).



Les deux ressorts sont soumis à un même moment de torsion  $M_t$ .

$$M_t = \frac{K}{n} \quad ; \quad [K] = W \quad ; \quad [n] = \text{tr/mn.}$$

$$\text{AN: } M_t = \frac{0,32 \cdot 10^3}{2760 \cdot \frac{2\pi}{60}} = 1,107 \text{ mN.}$$

D'après la condition de résistance on a.

$$\frac{M_t}{W_0} \leq \tau$$

$W_0$ : moment de résistance à la flexion.

$$W_0 = \frac{\pi d^3}{16}$$

$$\Rightarrow \frac{M_t}{\frac{\pi d^3}{16}} \leq \tau \Rightarrow d^3 \geq \frac{16 M_t}{\pi \cdot \tau} \Rightarrow d \geq \left( \frac{16 M_t}{\pi \tau} \right)^{1/3}$$

$\tau$ : tension admissible de cisaillement.

Les ressorts sont fabriqués à partir de l'acier 60SC  $\neq$  trempé à  $850^\circ\text{C}$  et revenu à  $450^\circ\text{C}$ , qui présente les caractéristiques suivantes

$$R_p = 135 \text{ Kgf/mm}^2 \quad ; \quad R_e = 120 \text{ Kgf/mm}^2 \quad ; \quad \text{HB} = 370.$$

$$\tau = 60 \text{ Kgf/mm}^2.$$

$$\text{ressort 1: } d_1 \geq 2,1 \text{ mm}$$

$$\text{ressort 2: } d_2 \geq 2,1 \text{ mm}$$

## 07/ Éprouvette de flexion rotative.

La machine de flexion rotative Schenck étant à moment constant, Les éprouvettes qui lui sont destinées sont cylindriques et normalisées comme le montre La figure (3.5).

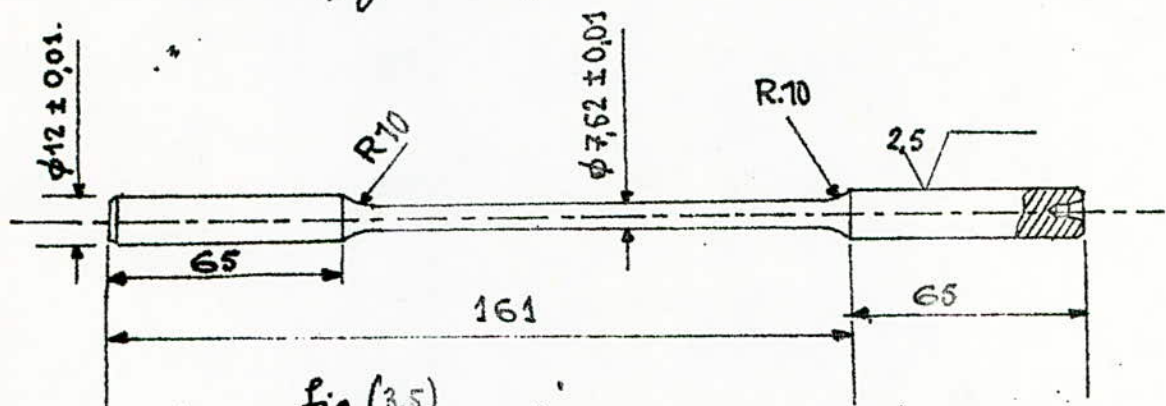


fig (3.5)  
Éprouvette de flexion rotative du type Schenck.

Du fait que la plupart des ruptures par fatigue s'amorcent à la surface libre du métal, la résistance à la fatigue d'une éprouvette peut être profondément influencée par l'état de surface. Par conséquent, la préparation de l'éprouvette doit éviter d'altérer la structure et les caractéristiques du métal, en particulier en supprimant tout échauffement et en réduisant au minimum l'érouissage de la surface. La partie utile étant le lieu probable de la rupture, doit être usinée avec une finesse de surface de 0,01 mm (possibilités réduites selon l'atelier du département).

Il est recommandé, dans le cas des alliages légers, de protéger la surface de l'éprouvette après usinage et polissage éventuel contre toute corrosion atmosphérique.



## chapitre VII AMÉLIORATION DE L'ENDURANCE DES PIÈCES DE CONSTRUCTION.

L'amélioration de la limite d'endurance des pièces de machines est liée directement aux deux facteurs suivants.

### 1. facteur métallurgique et structural.

Ce facteur concerne essentiellement le choix des métaux et alliages ainsi que les traitements mécaniques et thermiques qui conduisent aux structures les plus favorables à la limite d'endurance.

Pour garantir un bon choix de matière il est indispensable de connaître en dépit des propriétés mécaniques ( $R_f, R_e, A, k, \dots$ ) la limite d'endurance dans les conditions de travail (efforts alternés, corrosion, ...) des pièces réelles.

Pour les aciers résistants, la résistance à la germination des fissures est importante mais l'apparition d'une fissure entraîne immédiatement une rupture fragile. Par contre, dans le cas des aciers ductile la résistance de formation des germes de fissures est plus faible mais du fait de l'écrasement des zones proches des extrémités de la fissure la résistance à la propagation de cette dernière se trouve considérablement améliorée. ce qui rend l'utilisation des matériaux plastiques souhaitable dans le cas des pièces présentant des concentrations de contraintes dues essentiellement aux formes des pièces (trous, entailles, changements de section, rainures, etc...). Il est cependant possible de remplacer dans la mesure du possible certains alliages coûteux par des aciers ordinaires traités avec un prix de revient par fois beaucoup plus bas.

Du point de vue des traitements thermiques, le revenu à refroidissement rapide après trempe s'est avéré très convenable et qui

à 600°c offre au métal une limite de fatigue élevée avec une bonne résilience.

Pour des pièces travaillant à la flexion ou à la torsion, il est recommandé de produire à leurs surfaces des contraintes de compression dont l'effet est de réduire les tensions des fibres externes les plus sollicitées. Cette compression peut être produite mécaniquement (étrépage, trefilage, galetage, grenailage...) ou par traitements thermiques ou thermo-chimiques (refroidissement rapide après revenu, trempe superficielle, cémentation, nitruration, carbonituration...). En général, l'utilisation des aciers améliorés (trempe + revenu à haute température) est la plus répandue surtout pour les aciers dont la teneur en carbone varie de 0,35% à 0,45%.

XC 42 ; XC 48 ; XC 45 ; 40 NC ; 45 NC ; 40 NCD 2 ; 35 NCD 4 ;  
35 NCD 16 ; 40 NCD 18

En présence d'agents de corrosion, une grande résistance à ceux-ci offre le meilleur résultat mais les possibilités financières nous obligent souvent à faire appel aux différents revêtements protecteurs (résine synthétique, phosphatation des aciers, etc...).

D'après les statistiques des dommages, 20% des causes de rupture des pièces de machines sont dues aux facteurs métallurgiques (élaboration, transformations, traitements thermiques).

## 2. Facteur constructif.

Dans l'attente d'une matière non coûteuse et de grande résistance à la fatigue, les constructeurs disposent actuellement de moyens simples en modifiant convenablement l'allure des pièces dans le but de réduire au minimum les concentrations de contraintes.

Il est donc appréciable que les ingénieurs pensent pendant le tracé des pièces à obtenir une meilleure répartition des contraintes selon les conditions de travail.

## 2.1. détermination des contraintes appliquées.

L'analyse des conditions de travail, permet de déterminer la nature des efforts (traction, flexion, torsion) exercés sur les pièces en service et leur variation dans le temps.

Lorsque les pièces présentent des formes variées (changement de section, trous, entailles...) la détermination de la répartition des contraintes ainsi que les points de contraintes devient nécessaire. Ces dernières peuvent être évaluées qualitativement et quantitativement par divers procédés dont le plus répandu est : la mesure des paramètres cristallographiques par diffraction au rayon X.

L'étude de tout effort passe par trois étapes essentielles.

- l'enregistrement en fonction du temps de chacune des contraintes principales.
- détermination de la répartition des contraintes à l'état statique.
- détermination en différents points la variation des contraintes en fonction du temps.

## 2.2. Calcul des coefficients d'influence.

Les constructeurs allemands ont depuis la deuxième guerre mondiale introduit dans le calcul de la limite de fatigue les divers coefficients d'influence résultant des effets d'usinage, de formes, de corrosion, des procédés technologiques de fabrication etc...

$$\sigma_{\text{pièce}} = \sigma_{\text{épr}} \cdot \prod_{k=1}^n K_{\text{inf } k}$$

$K_{\text{inf}}$  : coefficient d'influence.

$\sigma_{\text{épr}}$  : limite d'endurance de l'éprouvette.

$n$  : le nombre de facteurs d'influence.

Quelques coefficients d'influence sur la fatigue sont donnés ci-dessous

- conditions de transformation	K <sub>inf</sub>	
fibrage	0,81 - 0,60.	
État brute	} acier doux.	0,85.
de forge		0,58.
oxycoupage	} acier mi-doux.	0,77.
		} aciers spéciaux.
- Dimensions		
en flexion	} d = 30 mm.	0,9.
		} d = 150 mm.
- Formes des pièces		
- Arbres à épaulement		
Acier mi-dur	} r/d = 0,5	0,94.
		} r/d = 0,03
Acier spécial	} r/d = 0,5	
traité		} r/d = 0,03
- Arbres avec trou transversal		
- États de surface.		
tournage grossier.		0,88 - 0,72.
tournage soigné.		0,92 - 0,74.
lime grossière.		0,82 - 0,80.
lime douce.		0,95 - 0,92.
Poli à l'éméri fin.		0,98 - 0,97.
rectification soignée.		0,99 - 0,92.
- Nature de la surface.		
grenailé		1 - 1,3.
galatéé sur arbre lisse.		1,2 - 1,3.
galatéé sur conge.		1,5 - 2,0.
cémentation, nitruration, trempe super- fixette		1,0 - 2,0

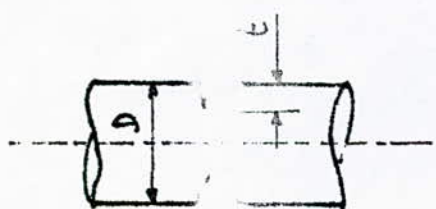
En pratique, les coefficients d'influence se multiplient de sorte que la limite d'endurance de la pièce réelle soit réduite à une valeur très basse par rapport à celle du métal de base.

On peut ajouter à ces différents coefficients, ceux dus aux entailles :

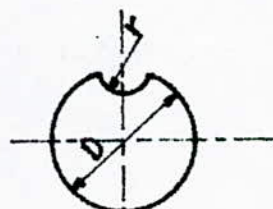
- gorges fig (2.2.a).		$K_f$
traction et flexion	$\left\{ \begin{array}{l} r = t = 0,07 D. \\ r = t = 0,25 D. \end{array} \right.$	1,2
		1,1
torsion	$\left\{ \begin{array}{l} r = t = 0,09 D. \\ r = 0,00 D ; t = 0,21 D. \end{array} \right.$	1,3
		1,5

- rainures longitudinales fig (2.2.b).		
rondes	$r \leq 0,2 D$	torsion 2,1
rectangulaires	$r = 0,1 t$	torsion 4,3
	$t = 0,2 t$	torsion 2,6
	$t = 0,5 t$	torsion 1,6

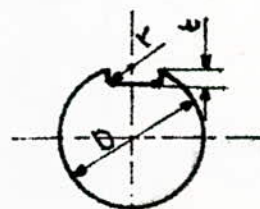
- filetages		
triangulaires I.S.O	$\left\{ \begin{array}{l} \text{acier doux} \\ \text{Acier au nickel traité} \end{array} \right.$	2,84
		3,85
ronds	$\left\{ \begin{array}{l} \text{acier doux} \\ \text{acier au nickel traité} \end{array} \right.$	1,76
		3,32



entaille  
fig 2.2.a



rainure ronde



rainure rectangulaire.

fig 2.2.b.

### 3. Exemple d'amélioration de l'endurance des pièces de machines.

Dans cette partie, on montre la possibilité d'améliorer la limite d'endurance des organes de machines par changement de formes. L'étude morphologique de la cassure et les conditions de travail des organes qui permet de remonter jusqu'aux causes de la rupture est supposée faite.

#### 3.1. arbre à changement de section.

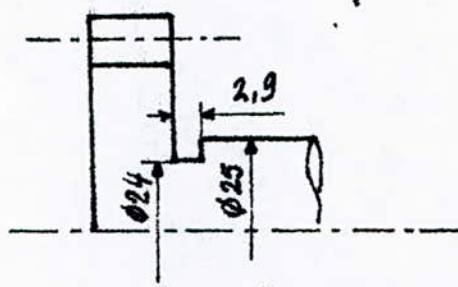


fig (3.1.a): arbre d'une pompe à engrenage, muni d'un pignon

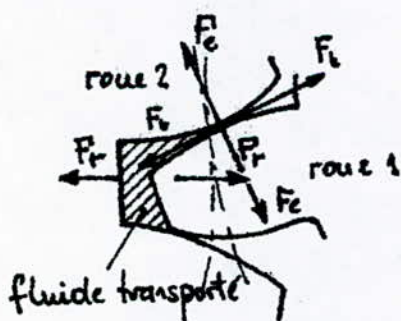


fig (3.1.b).

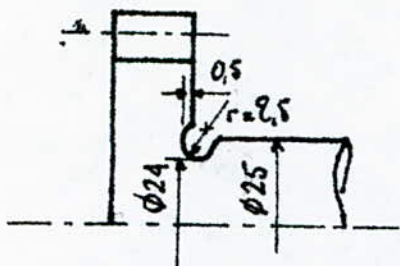
$F_t$ : effort tangentiel de frottement  
 $F_r$ : effort radial de pression dû à un changement du volume spécifique du fluide transporté.

$F_e$ : effort moteur d'entraînement.

La fig (3.1.b) représente les différents efforts agissant sur les flancs des dents engrenées, ces efforts sont transmis intégralement au fond de la rainure à angles vifs provoquant ainsi une grande concentration de contrainte et facilitant l'amorçage des fissures de fatigue sur toute la circonférence de la rainure.

Le coefficient de concentration de contrainte  $K_t$  atteint 4,6.

La durée de vie de l'arbre de la figure (3.1.a) étant faible, on a cherché à l'améliorer en remplaçant la gorge à angle vif par une gorge à fond arrondi (fig 3.1.c) permettant une meilleure répartition des contraintes.



Le coefficient de concentration de contrainte se trouve réduit à 2,1.

fig (3.1.c).

Cette nouvelle forme de l'arbre offre une meilleure résistance à la fatigue.

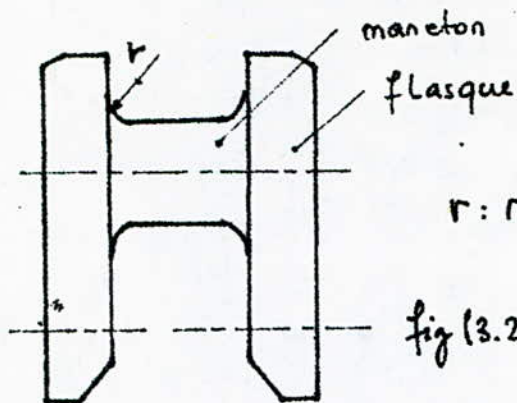
### 3.2. Arbre à manivelles, Vilebrequins.

Les vilebrequins d'automobiles sont sollicités par des charges dynamiques complexes et dont les valeurs ne peuvent être connues qu'avec une certaine précision.

Parmi les efforts agissant sur le maneton d'un vilebrequin, on cite.

- Les efforts dynamiques résultant de l'explosion du mélange carburant dans les cylindres.
- Les efforts de frottement entre la surface du maneton et celle de la bielle.
- Les efforts de réaction des paliers.

Comme premier pas, on améliore la limite d'endurance des vilebrequins par exécution d'un arrondi de raccordement de rayon aussi grand que possible entre le maneton et le flasque fig (3.2.a).



$r$ : rayon du congé de raccordement.

fig (3.2.a)

Si des contraintes d'ordre constructif nous obligent à se limiter à une certaine valeur du rayon de raccordement, des résultats appréciables peuvent être obtenus en pratiquant un écouissage superficiel du métal par galetage ou grenailloge dans la région du congé ou en créant des contraintes superficielles de compression par un chauffage à haute fréquence. fig (3.2.b)

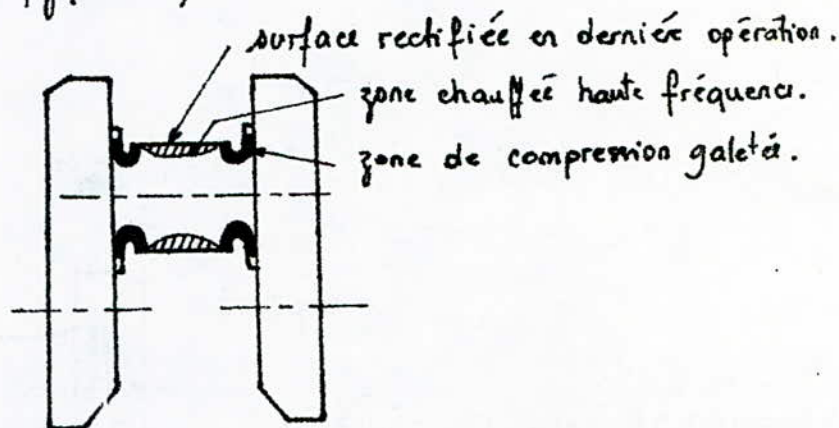
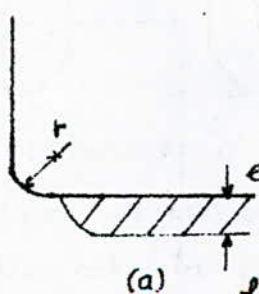
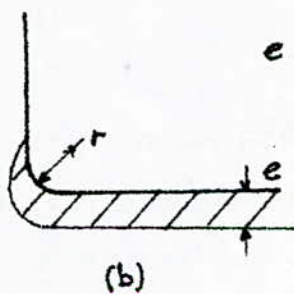


fig 3.2.b



(a)



(b)

$e$ : épaisseur de la zone chauffée

fig (3.2.c)

il est préférable que la zone chauffée s'étende jusqu'au congé pour éviter les tensions superficielles au voisinage de la zone chauffée.



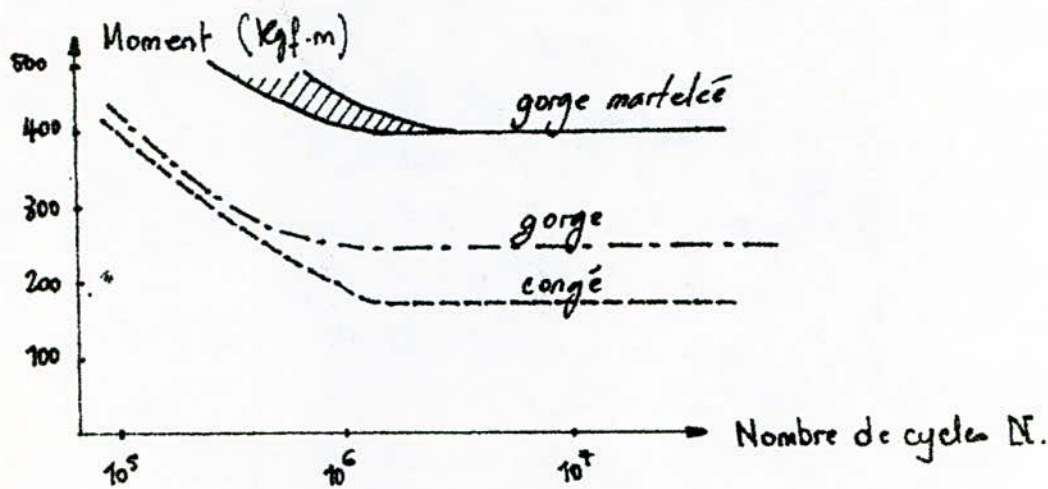
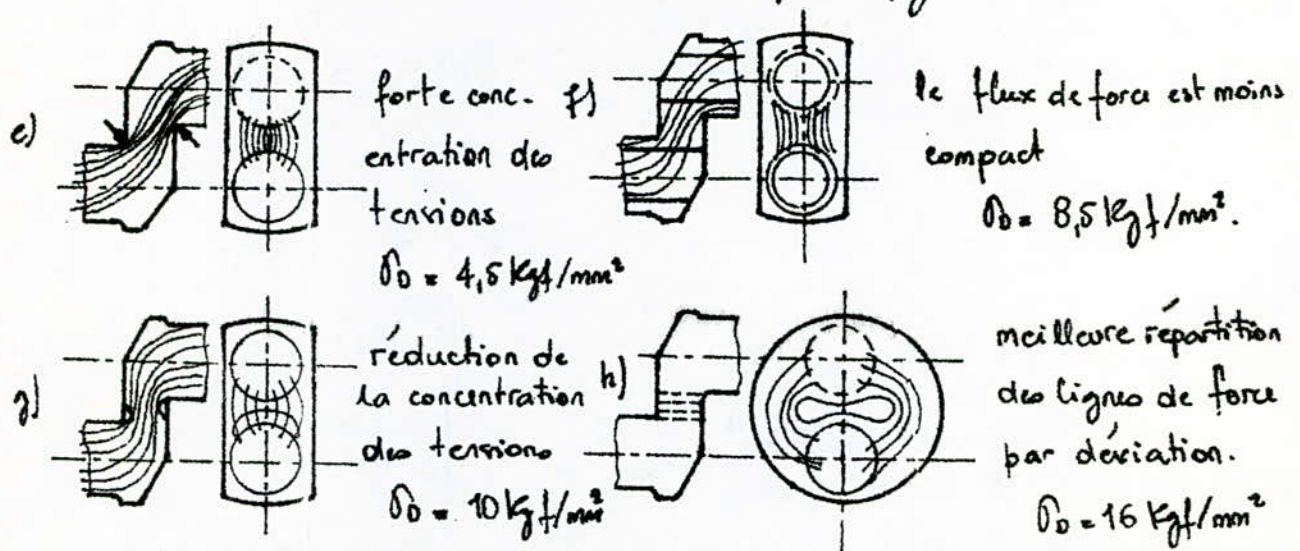


fig 3.2.d : courbes d'endurance en flexion répétée d'éléments de vilebrequins diversement traités.

Cadillac [14] a précisé que pour des vilebrequin d'automobiles, l'exécution des gorges de décharge martelés à l'endroit des congés de raccordement double la limite d'endurance de ces vilebrequins. fig (3.2.d).

Un dessin du vilebrequin favorable à l'endurance peut être mis au point si on tient compte de la répartition des lignes de force dans le maneton et dans le coude du vilebrequin. fig 3.2.e à 3.2.h.



- fig 3.2 -

Fremont [15] a proposé de donner aux flasques un profil évidé avec un renflement des bords détournant favorablement les lignes de force. L'usinage dans ce cas devient difficile, c'est pourquoi de telles formes ne sont obtenues que par moulage de la fonte. L'expérience a montré qu'un recouvrement augmentant la rigidité du vilebrequin est préférable (fig 3.2.i).

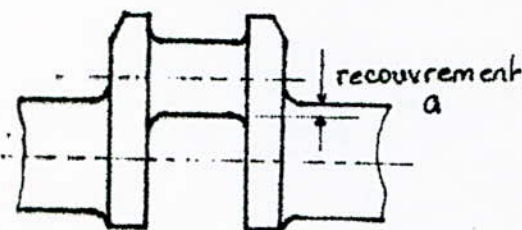


fig 3.2.i

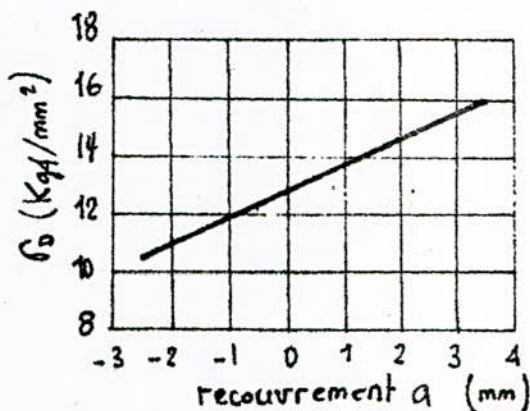


fig 3.2.j: influence du recouvrement sur la limite d'endurance en flexion d'un vilebrequin.

Enfin, on termine par quelques abaques représentant l'influence des dimensions des éléments du vilebrequin sur l'endurance de ce dernier. (fig 3.2.1 à 3).

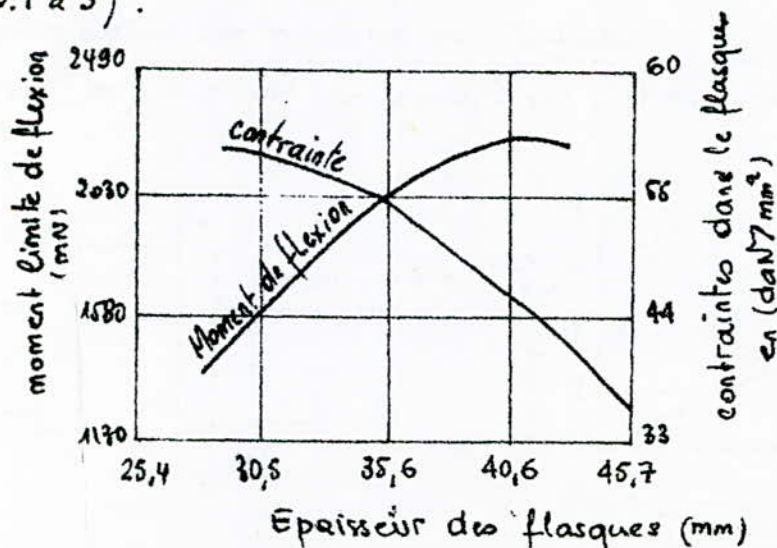


fig 3.2.1: influence de l'épaisseur des flasques.

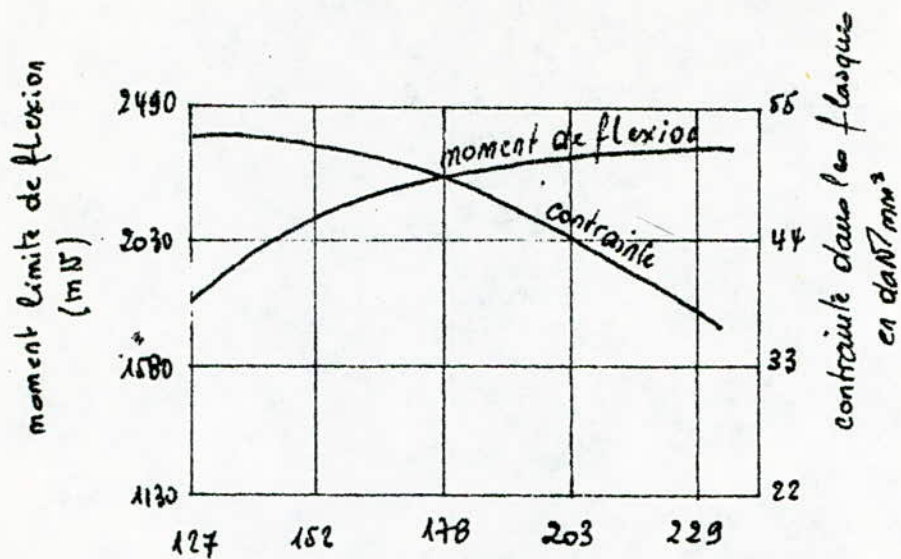


fig 3.2.2: Largeur des flasques en mm  
influence de la largeur des flasques

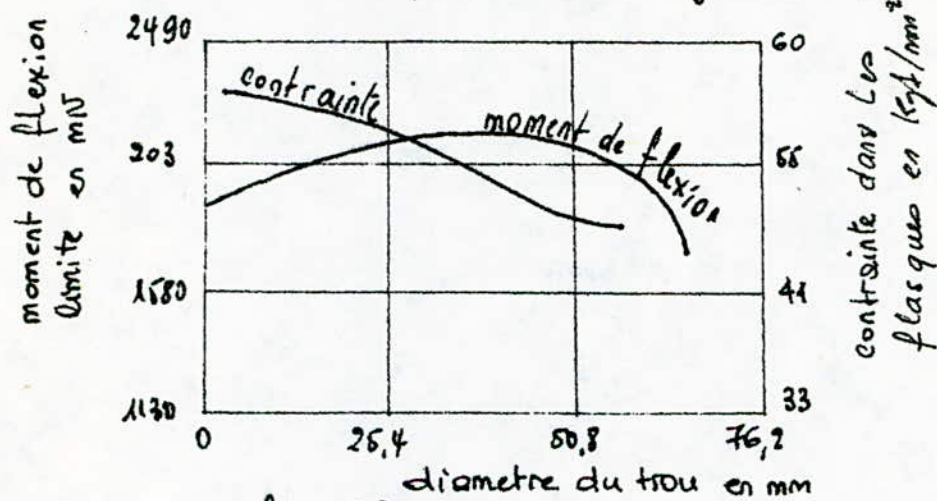


fig 3.2.3: diametre du trou en mm  
influence du diametre des trous d'allegement

### 3.3. Vis d'accouplement.

Dans le cas des pièces importantes, la recherche de la limite d'endurance se fait par une série d'essais sur les pièces réelles elle-mêmes dont la forme est modifiée chaque fois jusqu'à obtention d'une limite de fatigue satisfaisante.

On prend l'exemple d'un vis d'accouplement prévu dans un assemblage pour démontage rapide. (fig 3.3.1).

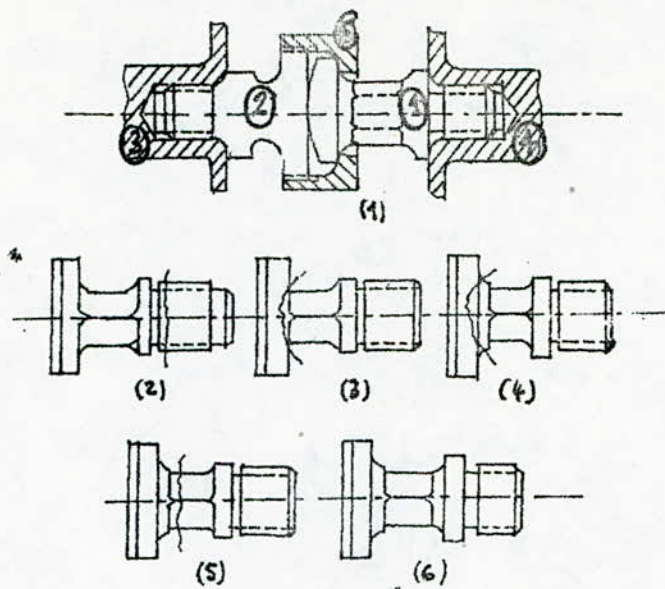


fig (3.3.1): Vis d'accouplement.

Les pièces (3) et (4) sont montées dans une construction en alliage d'aluminium. Les pièces (1) et (2) sont deux vis en acier allié (40NCD16) et traité ( $\sigma_D = 141-157 \text{ daN/mm}^2$ ). Le manchon d'assemblage (5) est exécuté en acier (40CD4) avec  $\sigma_D = 126 \div 141 \text{ Kgf/mm}^2$ .

La pièce (1) supporte dans sa plus faible section des contraintes de tension d'environ  $111,5 \text{ daN/mm}^2$  avec un coefficient de sécurité de 38%. Au cours des essais de fatigues la pièce (1) s'est rompue après 1400 cycles sous des charges alternées d'amplitude  $74,6 \text{ daN/mm}^2$ . La rupture s'est produite dans le premier filet (fig 3.3.1.2). Comme première modification on a diminué la longueur du filetage, les contraintes ont atteint  $83 \text{ daN/mm}^2$ , la longévité du vis ne s'est pas améliorée mais la rupture s'est déplacée vers la tête (fig 3.3.1.3). Afin de diminuer la concentration de contraintes, on a procédé à un changement de la forme de la tête par addition d'un bossage, la rupture s'est produite toujours dans la tête mais après 1800 cycles (fig 3.3.1.4). Une augmentation du diamètre du bossage de 3,1 mm a permis une longévité de 9800 cycles (fig 3.3.1.5). Enfin, le galetage du bossage a conduit à un résultat satisf.

- aisant avec une durée de vie de 20900 cycles.

## Chapitre VII CONCLUSIONS

Cette étude m'a permis surtout d'émietir mes connaissances qui étaient très limitées en ce qui concerne le phénomène de la fatigue des métaux.

Ce projet de fin d'études a été consacré surtout à l'étude de l'influence de la structure, des formes des pièces et des procédés technologiques de fabrication sur la germination et la propagation des fissures de fatigue qui conduisent généralement à des ruptures soient fragiles dans le cas des métaux résistants, soient ductiles dans le cas des métaux plastiques. souvent, les concentrations de contraintes dues aux formes des organes (trous, rainures, arêtes, entailles, etc...), les grandes tensions internes provoqués par certains traitements thermiques (trempes) ou mécaniques (écrouissage) ajoutés aux conditions de travail des pièces (charges alternées, milieux corrosifs, frottement, ...) constituent l'origine de toute rupture par fatigue.

On a vu également qu'il est très possible d'améliorer considérablement la limite d'endurance des organes de machines par une simple modification de l'allure de ces derniers qui doit permettre une meilleure répartition des contraintes ou par certains traitements mécaniques (galéage, grenailloge...) ou thermiques (chauffage superficiel haute fréquence) qui permettent d'augmenter la résistance à la germination des fissures de fatigue par suite d'une provocation de contraintes de compression. (fig 69).

Sachant que dans la plupart des cas les fissures de fatigue naissent à la surface des pièces qui doivent être par conséquent usinées soigneusement et traitées de manière à év.

élopper superficiellement des contraintes de compression.

Dans ce travail on a également procédé à examiner la machine d'essai de flexion rotative du type "schenck" qui existe dans le laboratoire de métallurgie au sein du département de Génie-Mécanique et à présenter sa coupe transversale à l'aide du dessin technique.

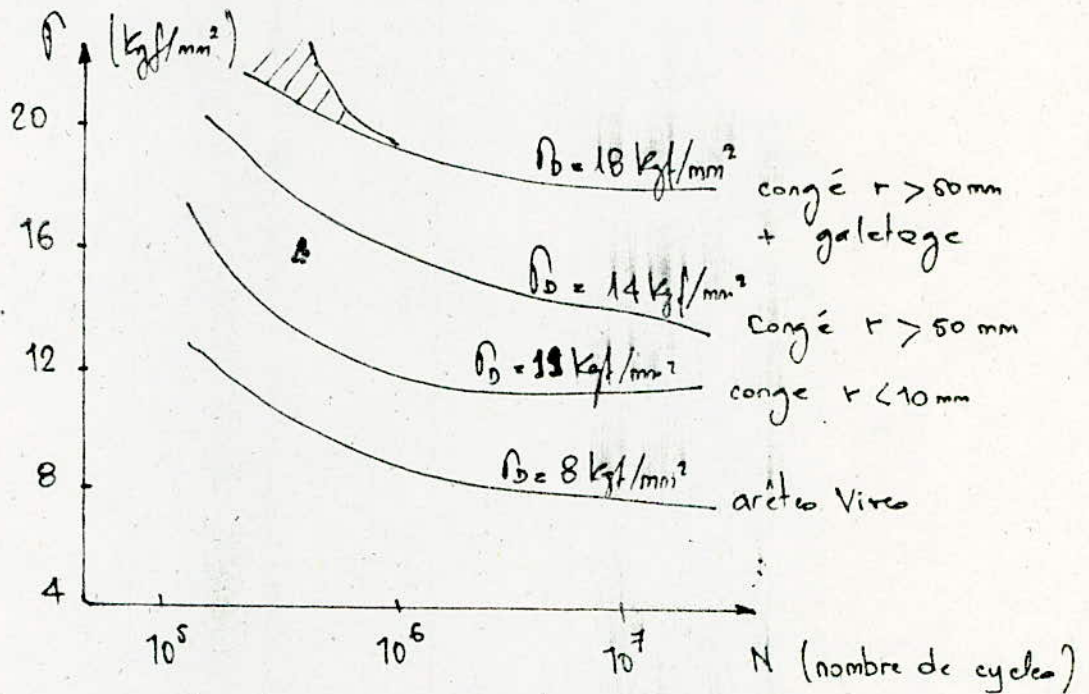


fig 69: amélioration de la limite d'endurance par divers procédés d'un arbre avec changement de section.

## . ANNEXE .

Du fait qu'on a pas pu faire les essais prévus sur la machine "Scheneck" de flexion rotative à cause d'une panne due essentiellement au manque de documentations nécessaires sur l'ensemble des organes qui la constituent. on a pensé en dernier lieu à proposer une formule empirique liant la limite d'endurance des aciers les plus utilisables en construction mécaniques à la dureté dont l'installation d'essai est présente en bon état dans le département.

Pour cela on a choisi l'échantillon suivant.

Acier	HB	$\sigma_b$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )
XC 12	140	23
XC 35	205	27
XC 48	235	30

on approche donc par la méthode des moindres carrés la valeur de  $\sigma_b$  pour les aciers ordinaires dont la dureté brinelle est comprise entre 140 et 235 par un polynôme du second degré en dureté brinelle.

Les calculs nécessaires ont conduit au résultat suivant.

$$\sigma_b = 26 - 0,078 (HB) + 4 \cdot 10^{-4} (HB)^2$$

$$[\sigma_b]: \text{Kgf/mm}^2$$

$$(HB) \in [140, 235]$$

## BIBLIOGRAPHIE

- R. CAZAUD. La fatigue des métaux DUNOD  
C. BATHIAS, J.P. BAILLON  
La fatigue des matériaux  
et structures MALOINE  
techniques de l'ingénieur DUNOD
- [1] J.Y. MANN. L'effet des concentrations des contraintes sur la résistance à la fatigue du duralumin. *J. of the Royal Aeronautical Society*; p. 681. oct 1965
- [2] MOOR. recherche sur la fatigue des aciers.
- [3] THUM ET OSCHATZ. Augmentation de la limite d'endurance pour des arbres ronds percés d'un trou en travers. *V.D.I* 6 février 1932
- [4] J. BAUCHINGER. changement de la limite élastique sous l'effet de variations cycliques de l'effort, *Mitt. Mech. Technischen Laboratorium München*, Vol 13
- [5] H.J. GOUGH et D. HANSSON. La tenue des efforts sous des efforts répétés. *Proc. Roy. Soc. A*, V. 104, p 530; 1923
- [6] H.J. GOUGH. La structure cristalline en relation avec la rupture des cristaux. *Proc. A.S.T.M.*, 1933
- [7] M.A. MINER. Cumulative damage in fatigue. *J Appl. Mech.*, 12, p. A 159 à A 164; 1945
- [8] M. HEMPEL. observations métallographiques sur la fatigue des aciers, International conference on fatigue of metals, Londres, 1956, *Inst. of Mech. Eng. Éditeurs*.
- [9] A. Shrier. Fatigue studies of metal crystals, *Acta Metallurgica*, VII, 7, p. 691 à 701. 1963.



- [10] J. Pomey. "Precontraintes et durcissement superficiel des pièces d'aciers. revue de métallurgie, t. 46, n°1 p. 46. janvier 1949 et n°2, p. 108. février 1949.
- [11] H. BÜHLER. et H. BUCHHOLTZ. L'influence des tensions propres sur la résistance à la fatigue. Stahl und Eisen, 21 décembre 1933.
- [12] T. SIMNAD et U.R. EVANS. Mécanique de la fatigue corrosion des métaux, 8<sup>e</sup> colloque de métallurgie spéciale, p. 95 à 110, C.E.A. 1965.
- [13] H. BUCHHOLTZ et K. KREKLER. moyens de combattre les ruptures de fatigue sous corrosion. Stahl und Eisen. 29 juin 1933.
- [14] A. CADILLAC. Journal de la S.T.A., p. 121. mars 1957.
- [15] A. Fremont. résistance à la fatigue des vilebrequins coulés Proc. Inst. of Mech. Eng. III, 1948-1949.



