

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

2/87

وزارة التعليم و البحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

lex

DEPARTEMENT : Genie\_mecanique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**SUJET**

**ETUDE DE LA  
RESISTANCE  
A LA FATIGUE**

Proposé Par :

ELEOD

Etudié par :

CHAOUCHI

Dirigé par :

ELEOD

PROMOTION : Fevrier 87



## Remerciements .

Mes vifs remerciements vont à l'encontre de  
M<sup>rs</sup> : ELEOD enseignant à l'école nationale polytechnique,  
PAVLOV enseignant à l'école nationale polytechnique,  
Enseignants et techniciens, ayant apporté leur aide  
à l'élaboration de ce projet, et principalement  
M<sup>rs</sup> : BELHADEF, KIZZI, AZIZ .

Ministère de l'enseignement supérieur

وزارة التعليم العالي

Ecole nationale polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Departement : Genie - mécanique

دائرة : الميكانيك

Promoteur : ELEOD

الموجه : إليود

Eleve ingénieur : CHAOUCHI Boualem

الطالب المهندس شاوشى بوعلام

موضوع : دراسة مقاومة الكلال .

ملخص : يتمثل هذا المشروع ، في إصلاح وتشغيل آلة تجريب الكلال ، بالنسبة  
للثني الدوار ، وهي من طراز (SCHENK) بالإضافة إلى تعيين حدود الكلال بالنسبة  
لنوعين من الصلب الكربوني في حالتين ، قبل التصليد ، ثم بعد التصليد في وسط  
مائي ضمن مجال 850 - 900 °م .

Sujet : Etude de la résistance à la fatigue .

Résumé : Ce projet consiste , à réparer et mettre en marche , une machine "SCHENK"  
d'essai de fatigue en flexion rotative , ainsi que la détermination des limites  
d'endurance de deux aciers au carbone , d'une part à l'état brut , et d'autre  
part trempé à l'eau à 850 - 900 °C .

Subject : fatigue strength study .

Abstract : This project consists , in repairing and restarting , a rotative flexion  
fatigue "SCHENK" test machine , and in determining endurance limits , of two carbone  
steel , in raw state in one hand , and tempered in water at a temperature  
between 850 - 900 °C in another hand .



# TABLE DES MATIERES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

## INTRODUCTION.

I - PHENOMENE DE LA FATIGUE .....	1
I-1 - Historique, généralités .....	1
I-2 - Théories mécaniques du phénomène de fatigue .....	2
I-2-1 - Théorie des efforts secondaires .....	3
I-2-2 - Théorie de l'hystérésis des déformations pseudo-élastiques .....	4
I-2-3 - Théorie du glissement moléculaire .....	5
I-2-4 - Théorie de l'écroutissage .....	7
I-2-5 - Théorie de la propagation des fissures .....	8
I-2-6 - Théorie de l'amortissement interne .....	9
I-3 - Théories physiques .....	11
II - LES ESSAIS DE FATIGUE .....	13
II-1 - Classification générale des sollicitations dans les essais de fatigue .....	13
II-1-1 - Essais sous amplitude constante .....	13
-a - sollicitations alternées .....	13
-b - sollicitations répétées .....	14
-c - sollicitations ondulées .....	14

II-1-2 - Essais sous amplitude variable -- -- -- 16

II-2 - Méthode de détermination de la limite d'endurance --- 16

II-2-1 - Méthode statistique de longue durée -

    - Détermination de la courbe de Wöhler - - - - - 16

II-2-2 - Méthodes rapides directes - - - - - 20

    - Méthode de Locati - - - - - 20

II-3 - Machines d'essais de fatigue - - - - - 22

    a - Machines d'essais de fatigue aux efforts axiaux -- 22

    b - Machines d'essais de fatigue par flexion plane -- 23

    c - Machines d'essais de fatigue par torsion cyclique 23

    d - Machines d'essais de fatigue par chocs répétés 23

II-4 - Essais de fatigue par flexion rotative - - - - - 24

    a - Principe des essais par flexion rotative - - - - - 24

    b - Présentation de la machine - - - - - 25

    c - Eprouvette - - - - - 27

III - APPLICATION - - - - - 31

    III-1 - But - - - - - 31

    III-2 - Réparation, mise en marche, fabrication des  
         éprouvettes - - - - - 31

        a - Réparation et mise en marche - - - - - 31

        b - Fabrication des éprouvettes - - - - - 32

III\_3- Caractéristiques du matériau de base - - - - - 33  
III\_4- Détermination des paramètres physiques des essais - - 33  
    a- variation du moment de flexion le long de l'éprouvette. 33  
    b- contraintes maximales le long de la partie utile - - - 33

IV. RESULTATS - - - - - 40  
    a- Essai de fatigue en flexion rotative n°1 - - - 40  
    b- Essai de fatigue en flexion rotative n°2 - - - 46

V CONCLUSION - - - - - 48

BIBLIOGRAPHIE - - - - - 49



## INTRODUCTION.

Parmi les causes qui abrègent la durée de vie des pièces et des machines, la fatigue est incontestablement la plus dangereuse, dans la mesure où elle présente un caractère de généralité rendant très rares les domaines d'emploi des matériaux métalliques où elle ne puisse pas être redoutée.

La limite d'endurance des matériaux est difficile à calculer relativement aux autres propriétés mécaniques (Limite d'élasticité, limite de rupture, ...) car la naissance et la propagation d'une fissure présente un caractère aléatoire qui apparaît comme une conséquence de l'hétérogénéité des matériaux.

Il est absolument nécessaire de doter l'école nationale polytechnique d'une machine d'essais de fatigue, et d'élaborer une méthode de détermination des limites d'endurance des matériaux de base. Parmi les nombreuses méthodes de calcul, on distingue la méthode rapide développée par L. LOCATI dans laquelle on utilise qu'une seule éprouvette.

Afin d'effectuer les essais indispensables à la détermination des limites d'endurance, des aciers étirés à l'état recuit et à



l'état trempé, on a procédé à la réparation de la machine "SCHENK"  
d'essais de fatigue en flexion rotation du Laboratoire, sans  
document du constructeur, ni matériel spécifique; ceci a  
engendré une perte de temps considérable.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# I - PHENOMENE DE LA FATIGUE

## I-1. Historique, Généralités .

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

On a appelé "fatigue" la cause de cette défaillance des métaux, sous l'action des efforts variables.

On s'est préoccupé, dès l'origine même de la construction mécanique de connaître la manière dont se comportent, du point de vue de leur résistance et de leur durée, les pièces qui ont à supporter de tels efforts .

En Allemagne, Wöhler [1], ingénieur des chemins de fer bavarois, entreprit de nombreux essais en vue de déterminer les causes des ruptures d'essieux. Il poursuivit ses expériences de 1852 à 1869, créa les premières machines d'essais répétés, de flexion rotative notamment et formula les lois fondamentales

de la fatigue :

« le fer et l'acier peuvent se rompre sous un efforts unitaire inférieur non seulement à la charge de rupture statique, mais aussi à la limite élastique, lorsque l'effort est répété un nombre suffisant de fois ».

« La rupture n'a pas lieu quel que soit le nombre de sollicitations, si l'écart extrême, entre l'effort maximal et l'effort minimal, est inférieur à une certaine valeur limite ».

« Cette valeur limite a été appelée par Wöhler : résistance en service, par d'autres : charge naturelle de rupture et limite élastique naturelle ».

Ces diverses dénominations correspondent à ce que l'on appelle aujourd'hui : la limite d'endurance à la fatigue.

## I-2 THEORIES MECANQUES DU PHENOMENE DE FATIGUE

On a formulé un certain nombre de théories "mécaniques" qui ont pour base la discussion des trois principes fondamentaux de la résistance des matériaux, à savoir :

- a) l'homogénéité de la matière ;
- b) la régularité de distribution des efforts ;
- c) l'exactitude de la loi de Hook.

A la discussion des deux premiers principes se rattachent un



ensemble de propositions, qui ont été groupées sous le titre de théorie des efforts secondaires.

La discussion de la loi de Hook conduit à la théorie de l'hystérésis des déformations "pseudo-élastiques"

Quand aux autres théories "mécaniques", certaines reposent sur la considération du glissement moléculaire, de l'écroutissage et de l'amortissement internes, tandis que d'autres considèrent la loi de la propagation de la fissure comme déterminante du point de vue de la résistance à la fatigue.

### I\_2\_1 Théorie des efforts secondaires.

Griffith [2] a établi une théorie de la rupture des métaux, dite "théorie des efforts secondaires". Il a attiré l'attention sur la grande différence existante entre la résistance effective des corps solides et la résistance qu'ils devraient avoir eu égard aux forces de cohésion moléculaire.

Il a émis l'hypothèse que dans les corps solides réelles, les défauts et les microfissures qui existent à la surface ou à l'intérieur des cristaux créent des concentrations de contrainte. D'après Thomas [3] les irrégularités de surface que produit l'usage jouent un rôle analogue.

D'autre part, les métaux peuvent être le siège de contraintes résiduelles



consécutives à certains traitements mécaniques (écrouissage) ou thermiques (trempe). Ces contraintes dépassent parfois la charge de rupture.

Ainsi donc par suite de l'hétérogénéité physique, chimique ou structurale, et de l'existence de contraintes résiduelles, les métaux sont soumis à des efforts secondaires, non négligeable qui se traduisent par des pointes de contrainte. Les vibrations elles-mêmes peuvent, ainsi que l'a fait remarquer de Fréminville [4], provoquer localement de grands efforts par suite de phénomènes d'interférences. La résultante de ces diverses actions peut dépasser localement la résistance de cohésion du métal. Une crique microscopique en résulte, et c'est l'origine de la rupture par fatigue; cette crique, une fois amorcée, se propage au sein du métal d'autant plus rapidement que les efforts sont plus importants et plus nombreux.

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

L'élasticité, définie comme la propriété qui permet à un métal de reprendre sa longueur initiale lorsque l'effort n'agit plus, n'est pas rigoureuse car un matériau déformé élastiquement revient lentement à ses dimensions initiales (viscosité). En outre, on constate, en enregistrant les phénomènes, que la courbe des efforts décroissants ne coïncide pas avec la courbe des efforts croissants; il y a hystérésis

dans les déformations qui peuvent être appelées pour cette raison : pseudo-élastiques.

Bairstow [5] a effectué des cycles d'efforts alternés sur le fer et l'acier doux, et mesuré avec précision les efforts et les déformations. Il a observé, qu'il existe une limite supérieure des efforts alternés pour laquelle le diagramme reste apparemment une droite quel que soit le nombre de cycles (fig. I-1).

On peut penser que cette limite, qui est la vraie limite d'élasticité aux efforts alternés, s'identifie avec la limite d'endurance.

Bauschinger [6] avant les expériences de Bairstow, a eu l'intuition de cette identité en appelant la limite d'endurance "limite élastique naturelle".

### I.2.3 Théorie du glissement moléculaire.

Ewing et Humfrey [7] ont observé la formation de bandes de glissement dont le nombre augmente avec le nombre des cycles. Lorsque ces bandes couvrent la surface totale des cristaux, la rupture s'ensuit ; pour un effort inférieur à la limite d'endurance, il ne se produit que des bandes isolées qui ne s'étendent pas.

Ces auteurs ont fait l'hypothèse qu'il se produisait une usure des surfaces glissantes et Mesnager a suggéré qu'il se formait une couche de débris entre les deux surfaces. Enfin Beilby a admis



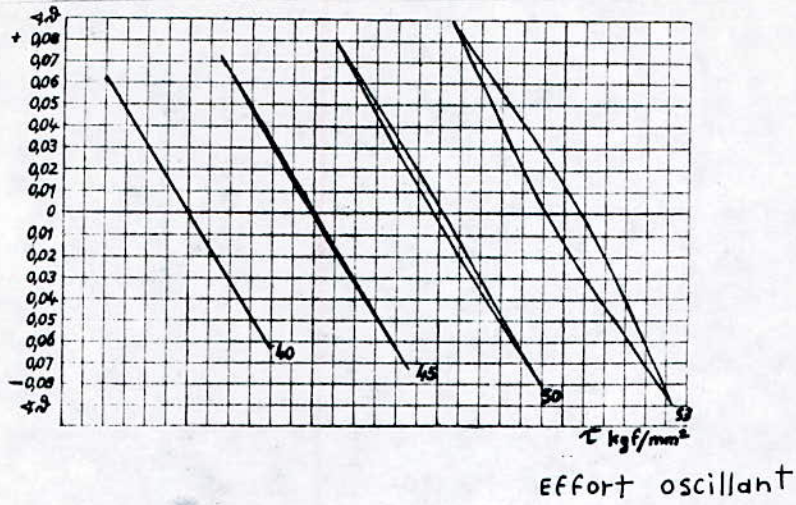


fig.I-1 - cycles d'hystérésis en torsions alternées relevés sur machine SCHENK pour un acier au nickel-chrome et différentes valeurs de l'effort alterné (Bairstow [5]).

l'existence d'une couche amorphe séparant les deux surfaces de glissement : couche amorphe plus dure et plus fragile que la phase cristalline. La rupture survient alors quand la phase amorphe ayant envahi progressivement tout le métal, celui-ci ne peut plus supporter la déformation imposée.

Mais la théorie déduite de ces observations n'est pas justifiée par les faits de l'expérience.

#### I-2-4 Théorie de l'érouissage :

À la suite d'expériences sur des métaux purs, Gough et Hanson [8] ont proposé la théorie de l'érouissage. Constatant que les métaux ductiles pouvaient se déformer plastiquement sous l'effet de charges alternées, Gough et Hanson admettent que cette déformation décroît régulièrement du fait de l'érouissage progressive. Si l'amplitude de l'effort est inférieure à la limite élastique, la déformation s'arrête et on n'observe pas de rupture. Sinon, le durcissement atteint une limite correspondant à la capacité d'érouissage maximale du matériau et une fissure se forme.

Gough [9] montre que la déformation plastique se fait par glissements et que la fissure se propage dans les zones où la densité des glissements est élevée. Les mesures de dureté indiquent bien que certaines régions seulement des cristaux atteignent le durci-



- ssement maximale, et Gough en conclut que la fissure qui se forme est la conséquence d'un glissement et d'un écrouissage excessifs en des points particuliers.

Cette théorie indique que la limite d'endurance dépend de la capacité d'écroutissage du métal et explique son accroissement par effet de sous- charges (understressing) .

Orowan [10, 11] a fait l'hypothèse que le métal contient des hétérogénéités structurales disséminées dans la matrice élastique et ayant un comportement élastoplastique. Sa théorie exprime quantitativement l'écroutissage progressive dû à la déformation plastique qui apparaît à chaque cycle.

### I-2-5 Théorie de la propagation des fissures.

Cet important problème fait l'objet de travaux peu nombreux. La première tentative d'étude quantitative est due à Griffith [2].

Cette théorie repose sur l'hypothèse que l'énergie nécessaire à l'extension d'une fissure est proportionnelle à la surface de cette dernière.

D'autre part cette extension entraîne une diminution de l'énergie de déformation du matériau au voisinage de la fissure.

Il y a propagation si la diminution d'énergie de déformation excède l'augmentation de l'énergie de surface.

Cette théorie n'est plus valable lorsque le milieu se déforme

plastiquement.

Contrairement à celle de Griffith, La théorie de Head [12,13] tient compte de la déformation plastique apparaissant à l'extrémité de la fissure sous l'influence de contraintes élevées.

Conformément à la théorie d'Orowan, il admet que cette zone plastifiée durcit progressivement par écrouissage.

Cette théorie conduit à distinguer trois phases dans l'évolution de la fatigue. Dans le premier stade, une déformation se produit dans tout le volume du métal jusqu'à ce que le durcissement corresponde au niveau de l'effort appliqué. Pendant le second stade, des régions isolées sont le siège de déformations lentement croissantes, et dans ces régions, une fissure apparaît dont le développement constitue le troisième stade. Ceci ne se produit que si la limite d'élasticité est localement dépassée.

Toutes ces théories ne permettent de préciser ni le mécanisme de la fissuration par fatigue ni les paramètres qui gouvernent sa propagation.

#### I-2-6 Théorie de l'amortissement interne.

On admet dans cette théorie que chaque métal n'est capable de dissiper qu'une certaine quantité d'énergie par amortissement interne et que si cette quantité d'énergie est dépassée, la rupture par fatigue s'ensuit.



Lorsqu'un métal a été mis en vibration, on constate que l'amplitude des vibrations diminue constamment en fonction du temps, et cela malgré toutes les précautions qui peuvent être prises pour éliminer la résistance de l'air et les frottements sur les supports.

La capacité d'amortissement est la propriété du métal qui provoque la disparition des vibrations. Elle correspond à une dissipation en chaleur de l'énergie du système vibrant. On peut exprimer la capacité d'amortissement par l'énergie dissipée par unité de volume et par cycle.

Cet amortissement est dû à l'existence d'un frottement intérieur. Celui-ci est aussi à l'origine du retard de la déformation sur la contrainte qui se manifeste par l'hystérésis mécanique. Ainsi donc : amortissement, frottement interne, hystérésis sont les manifestations d'un même phénomène.

Föppel [14] a prouvé expérimentalement que les métaux se comportent très différemment à la fatigue selon leur capacité d'amortissement, mais la capacité de dissipation d'énergie sous forme de chaleur est illimitée.

L'amortissement paraît donc n'avoir pas de rapport direct avec la rupture par fatigue, mais par l'intermédiaire de celui-ci, l'étude de l'énergie absorbée au cours des sollicitations cycliques permet d'analyser les mécanismes de déformation.

### I.3 THEORIES PHYSIQUES

Les théories à caractère physiques, abordent le problème de la propagation des fissures à l'aide des mécanismes fondés sur la théorie des dislocations.

Les déplacements des dislocations dans le cristal, suivant les plans de glissement de celui-ci [Fig I-2], sont bloqués par des éléments d'alliages ou des impuretés aux joints des cristaux. Ces blocages provoquent un durcissement du métal suivi par la formation d'une fissure.



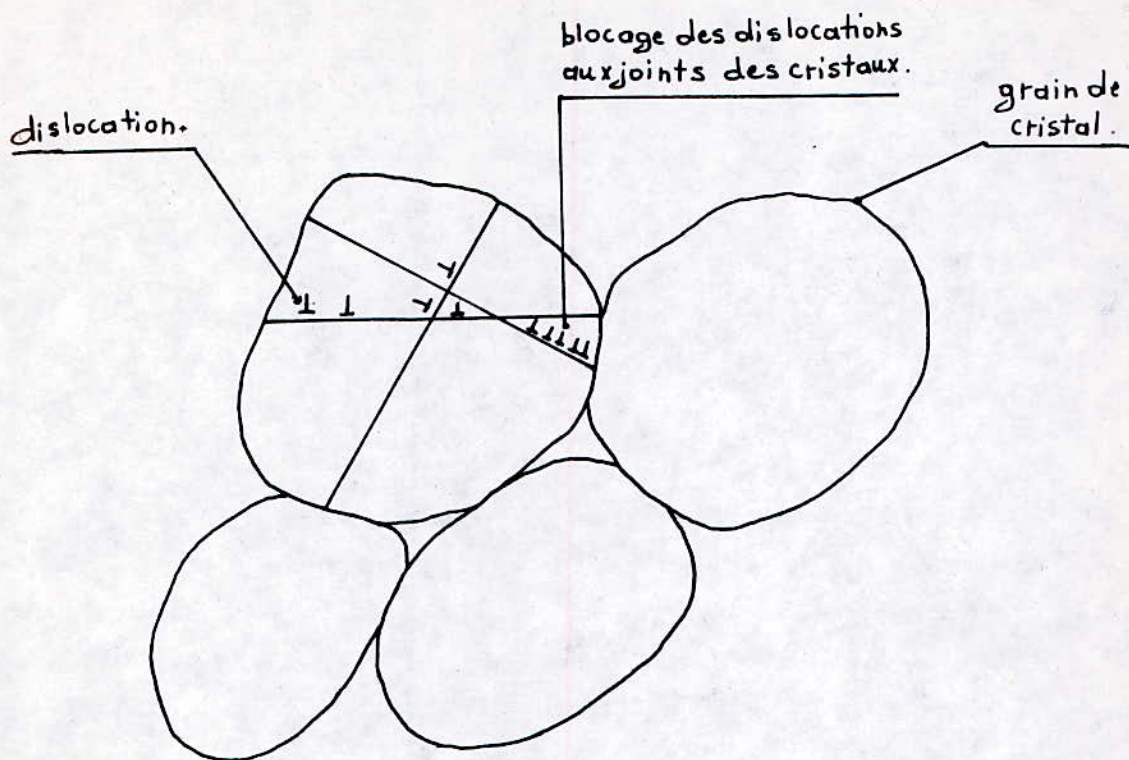


fig. I-2 - blocage des dislocations aux joints des cristaux.

## II - LES ESSAIS DE FATIGUE

Les recherches poursuivies sur la fatigue ont montré depuis longtemps l'insuffisance des essais ordinaires des métaux par traction, dureté, choc ....

Il est donc apparu indispensable de faire sur des éprouvettes et sur les pièces elles-mêmes des essais dans les conditions aussi voisines que possibles des conditions d'utilisation.

De tels essais sont les essais d'endurance ou de fatigue.

### II\_1 CLASSIFICATION GÉNÉRALE DES SOLLICITATIONS DANS LES ESSAIS DE FATIGUE.

#### II\_1\_1 Essais sous amplitude constante.

On peut considérer quelque soit la nature des efforts agissants (traction, flexion, torsion), trois sortes de sollicitations en fonction du temps: alternées, répétées, ondulées.

##### a/ Sollicitations alternées:

les efforts changent de sens alternativement ; Si les valeurs extrêmes sont égales et de signe contraire  $-\sigma$  et  $+\sigma$ , la sollicitation est dite alternée pure ou alternée symétrique.

b/ sollicitations répétées:

Les efforts sont toujours de même sens et varient de zéro à une valeur maximum soit positive soit négative.

c/ sollicitations ondulées:

La variation des efforts a lieu de part et d'autre d'une certaine valeur moyenne non nulle, soit positive soit négative; la valeur minimale demeure différente de zéro.

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

$\sigma_{max}$  = contrainte maximale algébrique.

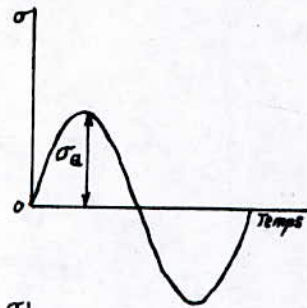
$\sigma_{min}$  = contrainte minimale algébrique.

$\sigma_m$  = contrainte moyenne algébrique.

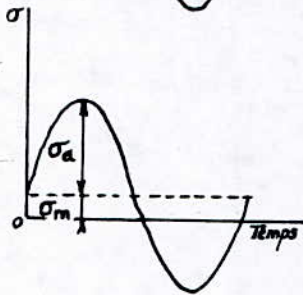
- si  $\sigma_m < \sigma_a$  : les efforts sont alternés (si  $\sigma_m = 0$  les efforts sont purement alternés ou symétriques).
- si  $\sigma_m = \sigma_a$  : les efforts sont répétés.
- si  $\sigma_m > \sigma_a$  : les efforts sont ondulés.

Si on admet pour simplifier, une variation sinusoïdale de la contrainte en fonction du temps, la figure II-1 traduit chacun des cas possibles.

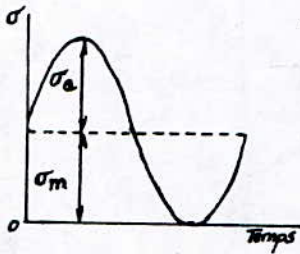




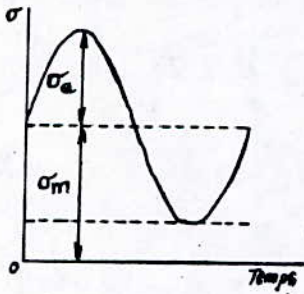
a\_ contraintes alternées pures ou symétriques.



b\_ contraintes alternées dissymétriques.



c\_ contraintes répétées.



d\_ contraintes ondulées.

Fig. II. 1. - Représentation des différents cas de sollicitation effort-temps.

## II - 1-2 Essais sous amplitude variable.

Pour se rapprocher des conditions de la pratique, on a cherché à effectuer des essais sous amplitude variable. Des expérimentateurs ont imaginé des essais avec modulation de l'amplitude sinusoïdale ou non [Fig II-2]

## II - 2 METHODES DE DETERMINATION DE LA LIMITE D'ENDURANCE.

Il existe plusieurs méthodes de détermination de la limite d'endurance d'un acier, On exposera seulement deux, la première méthode est basée sur le tracé de la courbe de WÖHLER tandis que la seconde repose sur l'hypothèse de MINER [15]

### II - 2-1 Méthode statistique de longue durée - Détermination de la courbe de Wöhler.

Si on soumet à des essais de fatigue une série d'éprouvettes identiques d'un même matériau, en faisant varier d'une éprouvette à l'autre la contrainte  $\sigma_{max}$ , tout en maintenant constant le paramètre  $R_s = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$  appelé rapport de contrainte les éprouvettes se rompent chacune après un nombre de cycles différent  $N$ , qui est leur durée de vie en fatigue. sur un diagramme portant en abscisse la durée de vie  $N$  et en

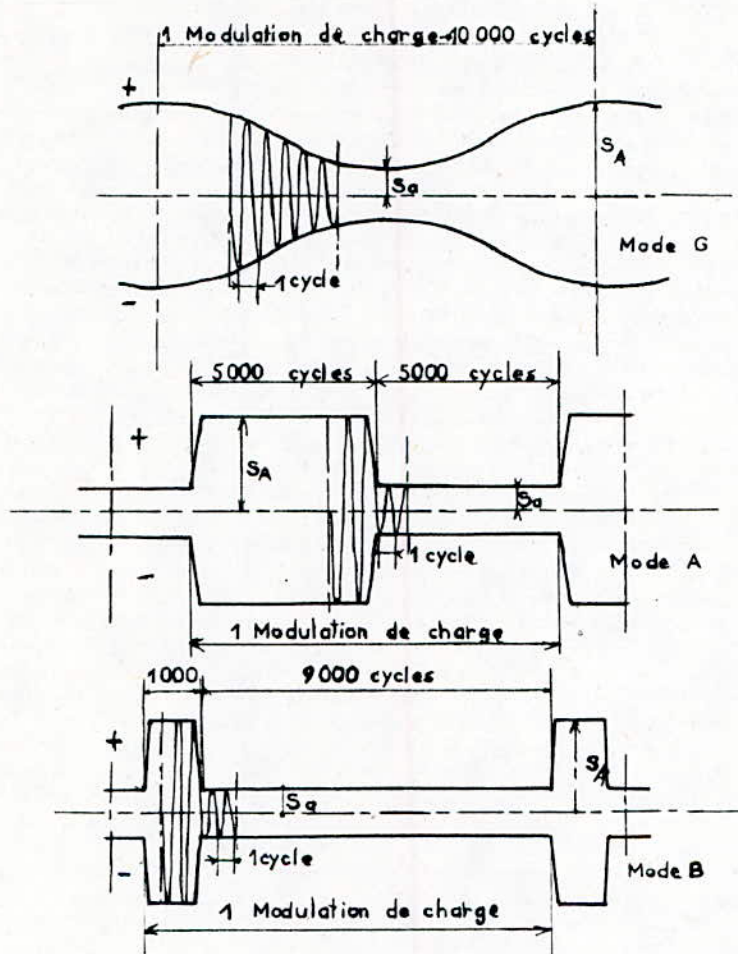


fig. II-2. - schémas des variations d'amplitude des contraintes dans les essais de flexion rotative.



ordonné la contrainte  $\bar{\sigma}_{\max}$ , les points correspondants aux résultats d'essais de WÖHLER. Pour certains matériaux, tels que les aciers, cette courbe tend asymptotiquement vers une horizontale,  $\bar{\sigma}_{\max} = \bar{\sigma}_D$  ( Fig II - 3 ); Pour d'autres matériaux, tels que le cuivre et les alliages d'aluminium, cette courbe est monotonement décroissante et ne semble pas présenter d'asymptote horizontale.

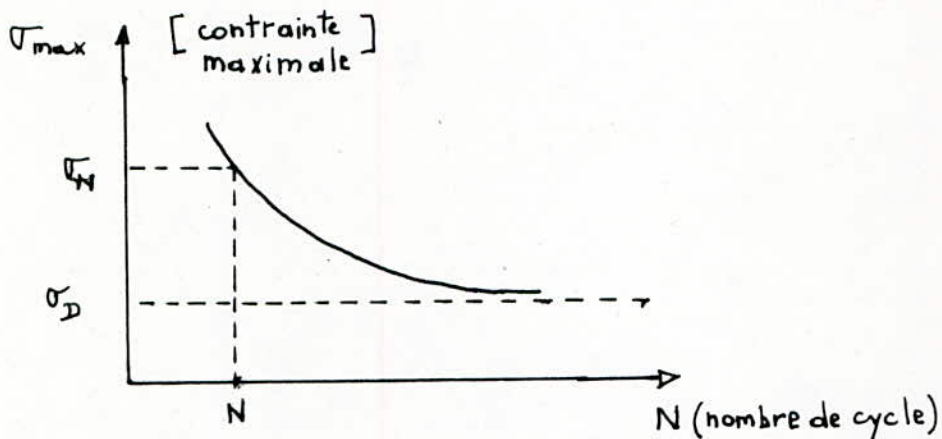


Fig II - 3 - courbe de Wöhler.

La résistance à la fatigue  $\bar{\sigma}_N$  est la valeur de la contrainte  $\bar{\sigma}_{\max}$  pour laquelle l'éprouvette présente une durée de vie de  $N$  cycles. A chaque valeur de  $R_s$  correspond une valeur de la résistance à la fatigue  $\bar{\sigma}_N$ . La limite d'endurance  $\bar{\sigma}_D$ , pour les matériaux qui en ont une, est la plus grande valeur de  $\bar{\sigma}_{\max}$  pour laquelle l'éprouvette présente une durée de vie infinie. Pour chaque valeur de  $R_s$ , la limite d'endurance  $\bar{\sigma}_D$  est la limite de la résistance à la fatigue  $\bar{\sigma}_D$ , quand  $N$  tend vers l'infini.

le tracé de la courbe de wöhler et de la limite d'endurance montre que les points figuratifs sont plus ou moins dispersés par rapport à la courbe présumée: Les causes de la dispersion sont multiples et dues entre autres:

- aux tolérances d'usinages et de montages des éprouvettes
- aux défauts de centrage des éprouvettes par rapport à l'axe de sollicitation;
- à l'état de surface et, notamment, aux rayures d'usinage, à la présentation de contraintes superficielles résiduelles dues à l'usinage ou à des traitements thermiques ou mécaniques antérieurs;
- aux variations des paramètres pendant l'essai: température de l'éprouvette, échauffement local par suite des efforts appliqués, corrosion atmosphérique.
- à la dispersion des caractéristiques mécaniques, d'un point à l'autre du métal due au manque d'homogénéité et à la présence de défauts (inclusions)

la durée de vie, sur la courbe de wöHLER, pour une contrainte donnée  $\sigma$ , ne peut être représentée par un point mais par une distribution du nombre de cycles  $N$ . La courbe est remplacée par une famille de lignes d'équiprobabilité [Fig II-4] le point de coordonnées  $(\sigma_p, N_p)$  indique que la pièce,

sollicité par la contrainte  $\sigma_p$ , a la probabilité  $p$  de rompre au bout de  $N_p$  cycles. La courbe moyenne d'endurance est celle pour laquelle 50% des éprouvettes sont rompues (Fig II-5). On remarquera que la détermination de la courbe de WÖHLER par la méthode statistique nécessite un grand nombre d'éprouvettes, il est apparu indispensable de rechercher d'autres méthodes plus rapides.

### II-2-2 MÉTHODES RAPIDES DIRECTES.

Diverses méthodes ont été recherchées afin de déterminer rapidement la limite d'endurance, c'est à dire à partir d'un petit nombre d'essais de fatigue.

On peut citer principalement :

- la méthode de charge progressive : méthode PROT [16].
- la méthode des paliers successifs : méthode de LOCATI

#### — Méthode de LOCATI.

Cette méthode n'utilise qu'une éprouvette, ou qu'une pièce, et repose sur l'hypothèse de MINER :

L'application de  $n_i$  cycles au niveau de contrainte  $\sigma_i$ , auquel le nombre moyen de cycles à la rupture est  $N_i$ , entraîne un accroissement du dommage égale à  $\frac{n_i}{N_i}$  et la rupture intervient quand  $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$  (voir IV ) exemple de calcul.



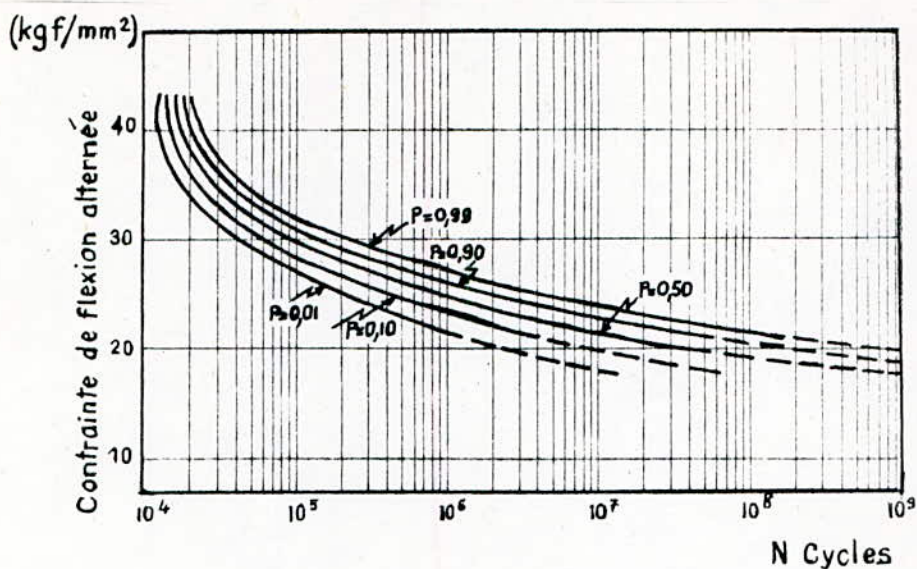


Fig. II-4. - COURBES  $\sigma$ -N pour différentes probabilités de rupture P, pour un alliage d'aluminium.

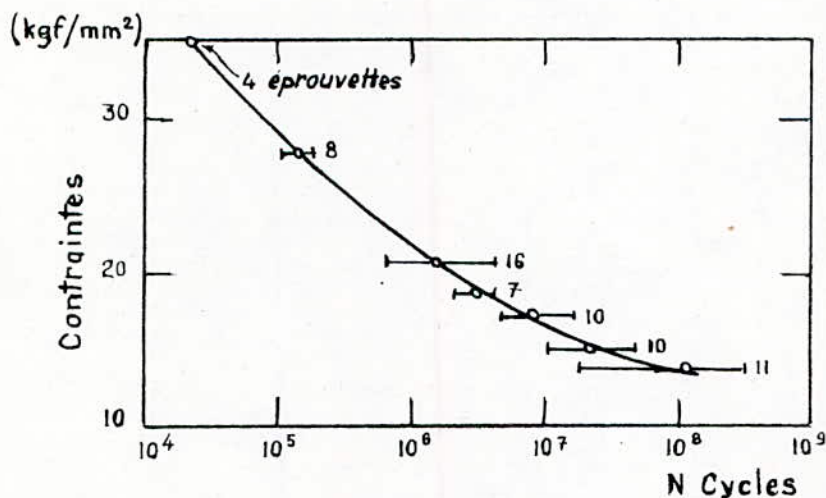


Fig. II-5. - Résistance à la fatigue en flexion rotative d'un alliage de duralumin superfini. (W. Weibel)  
(les chiffres indiquent le nombre d'essais à chaque niveau de contrainte)

## II\_3 MACHINES D'ESSAIS DE FATIGUE.

Dans ce qui suit, on citera seulement les caractéristiques mécaniques de certaines machines élaborées par les constructeurs les plus connues.

### a/ Machines d'essais de fatigue aux efforts axiaux.

- Machine à pulsateur hydraulique ou oleopneumatique :

le pulsateur AMSTER est construit en plusieurs modèles permettant d'atteindre des charges de 1000 KN pour une fréquence des pulsations de 4,1 à 8,2 Hz.

Les machines LOSENHAUSEN construites pour différentes forces de 10KN à 2000 KN, la fréquence est de 60 Hz pour les machines d'une puissance allant jusqu'à 60KN et de 20 Hz au delà.

Les pulsateurs MOHR et FEDERHAFF permettent d'obtenir des fréquences de 33 Hz pour les pulsateurs d'une puissance inférieure à  $\pm 40$  KN et 17 Hz pour les puissances allant jusqu'à  $\pm 500$  KN

- Machines à pulsateur mécanique

Ces pulsateurs ont des puissances allant de 20 à 200KN, et leur fréquence varie de 10 à 100 Hz

- Machines à pulsateur électromagnétique.

Dans ces machines les efforts appliqués sont entre 10 kN et 225 kN, et la fréquence entre 50 et 200 Hz.

- b/ Machines d'essais de fatigue par flexion plane.

SCHENK a construit plusieurs modèles dont le moment de flexion varie entre 80 et 800 mN, La fréquence est de 25 à 50 Hz.

- c/ Machines d'essais de fatigue par torsion cyclique.

SCHENK a construit une machine dite "TORSATOR" en quatre grandeurs pour des couples alternés de 300 mN, 10 000 mN, 20 000 mN et 30 000 mN.

- d/ Machines d'essais de fatigue par chocs répétés :

Une machine construite par AMSLER pour des essais de choc répétés en compression, flexion ou traction.

Dans cette machine, une masse de percussion est mise en mouvement par deux boutons de manivelle opposés solidaires d'un arbre en rotation, cette masse porte sur sa face inférieure un poinçon qui, dans les essais de compression ou de flexion, vient frapper le barreau à essayer, la



Fréquence est de 600 coups à la minute; l'énergie de la masse est réglable par l'excentricité des boutons de manivelle.

Il existe aussi des machines pour les essais de fatigue, aux efforts combinés alternatifs de nature différentes, pour les pièces et les ensemble mécaniques, ainsi que des machines à charge programmable pour différents types d'essais.

#### II-4 ESSAIS DE FATIGUE PAR FLEXION ROTATIVE.

- a/ Principe des essais par flexion rotative.

Dans les essais de flexion rotative, toutes les fibres consécutives, 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 est montée sur deux appuis; l'effort est appliqué en deux points, le moment de flexion est alors constant le long de la partie utile de l'éprouvette.

Dans chaque essai, l'éprouvette tourne à une certaine vitesse constante, et supporte l'effort (donné par une masse se déplaçant le long d'une tige fileté selon le système vis-écrou) par le moyen d'une chape montée

sur des roulements à double rangées de billes orientables, on obtient alors en dépit de la flexion de l'éprouvette un axe d'application de l'effort rigoureusement verticale (fig II-6). Les contraintes agissant sur chaque fibre, varient ainsi en fonction du temps suivant une loi sinusoïdale avec une valeur moyenne nulle (flexion alternée pure ou symétrique); chaque révolution correspond à une période ou un cycle. (fig II-7).

. b/ Présentation de la machine .

On a utilisé dans ce projet, une machine SCHENK de flexion rotative à moment constant (fig II-8), ayant les caractéristiques suivantes :

$n = 2760 \text{ t/min}$  = vitesse de rotation de l'éprouvette

$F = 30 \text{ daN}$  = charge maximale .

$f = 46 \text{ Hz}$  = fréquence mécanique .

- Montage de l'éprouvette .

On tire légèrement, afin de dégager les serrages des cônes, les deux chargeurs coniques ④ et ⑧ respectivement vers la gauche et vers la droite. On introduit l'éprouvette dans le chargeur conique ④, puis on pousse ce dernier dans

l'arbre porte-éprouvette (5), ainsi l'éprouvette pénètre dans le chargeur conique (8) qu'on repousse vers la gauche à l'intérieur de l'arbre porte-éprouvette (7).

Les chargeurs coniques (4) et (8), sont fixés à l'aide de deux clavettes et de deux écrous (2) et (3).

- Démontage de l'éprouvette.

On tire (4) vers la gauche à l'aide de (10), après avoir dévisser (9).

- Mise en marche.

La mise en marche s'effectue à l'aide d'un interrupteur, qui actionne un moteur électrique ayant les caractéristiques suivantes :

$$p = 0,32 \text{ kW}.$$

$$n = 2760 \text{ t/min.}$$

La charge est alors appliquée, à l'aide d'une came actionnée par un levier.

- Compteur digitale.

Le compteur digitale (13) lié au moteur électrique (12), indique le nombre de tours effectué par l'éprouvette avec un pas  $p = 100$  tours.



-c/ Eprouvette.

Dans la figure II-9, on donne les dimensions de l'éprouvette normalisée, avec les tolérances dimensionnelles, et la qualité d'usinage de l'état de surface.

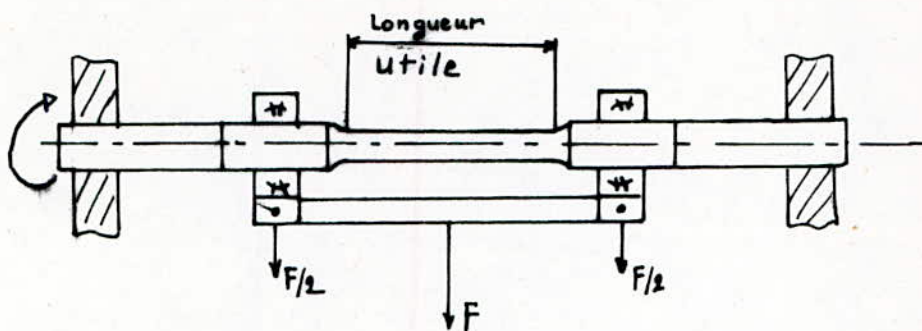


fig II - 6. - Flexion rotative sur deux appuis avec application de l'effort en deux points : moment constant.

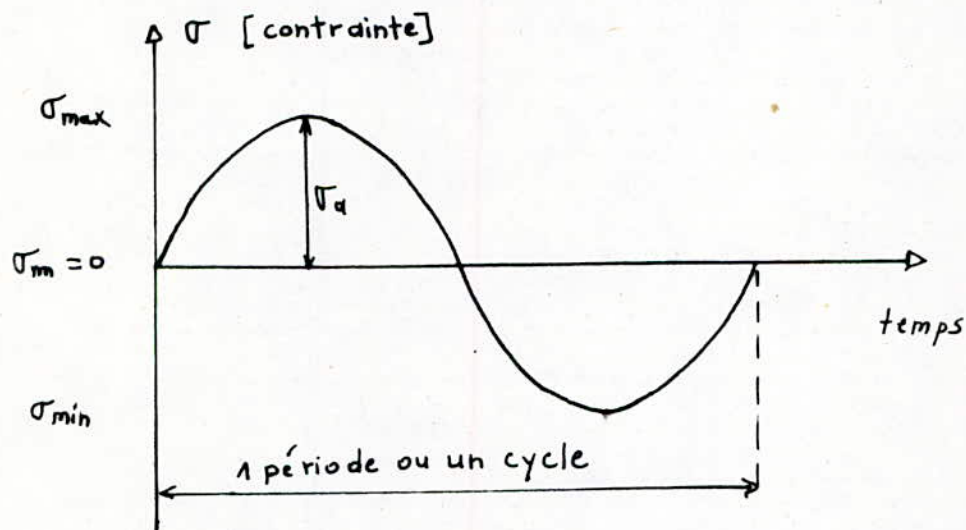
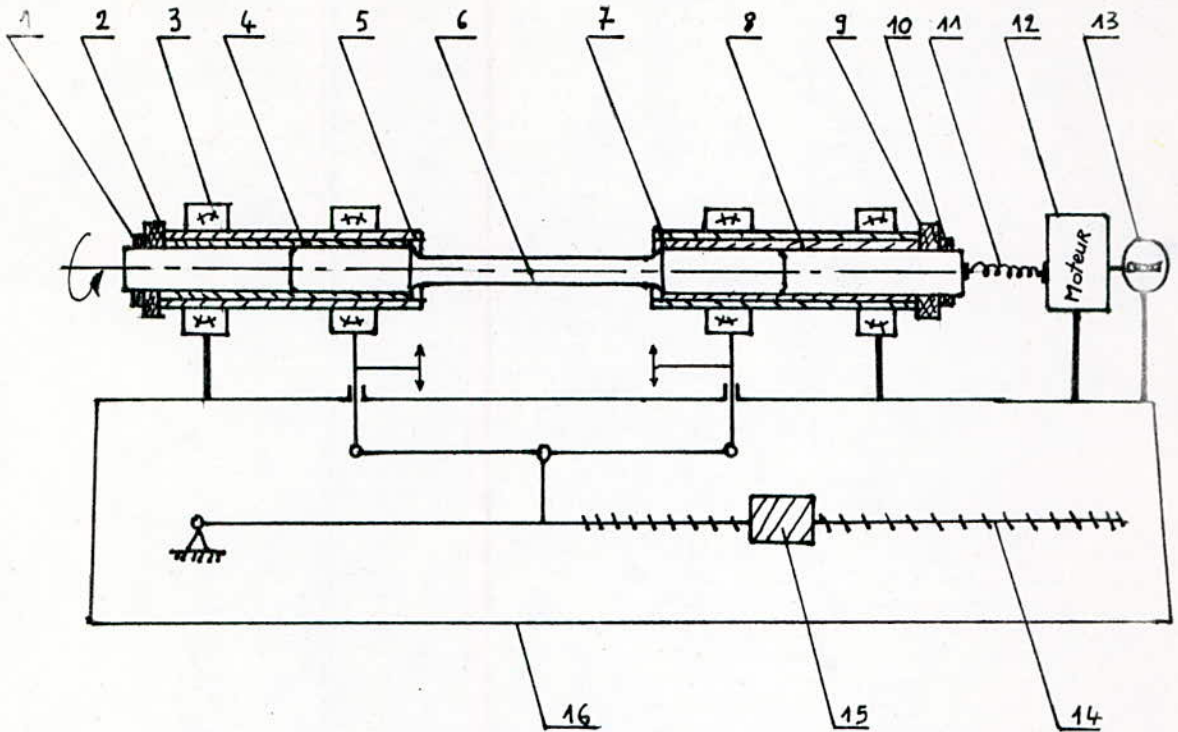


fig II - 7. - variation sinusoïdale de la contrainte en fonction du temps.

Fig. 8. Schéma de la machine SCHENK de flexion rotative



- 1 - ECROU MOLETÉ (MONTAGE - DEMONTAGE).
- 2 - ECROU MOLETÉ DE SERRAGE.
- 3 - ROULEMENT à DOUBLE RANGÉES DE BILLES INCLINABLE.
- 4 - CHARGEUR CÔNIQUE.
- 5 - ARBRE PORTE-ÉPROUVETTE.
- 6 - ÉPROUVETTE.
- 7 - ARBRE PORTE-ÉPROUVETTE.
- 8 - CHARGEUR - CÔNIQUE.
- 9 - ECROU MOLETÉ DE SERRAGE.
- 10 - ECROU MOLETÉ (MONTAGE - DEMONTAGE).
- 11 - ARBRE FLEXIBLE.
- 12 - MOTEUR ELECTRIQUE.
- 13 - COMPTEUR DIGITALE.
- 14 - TIGE FILETE.
- 15 - MASSE.
- 16 - BATI.



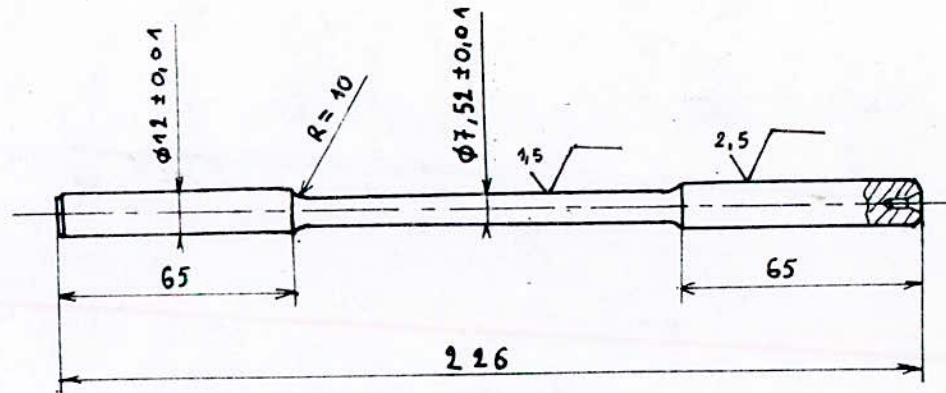


fig II\_9\_ EPROUVETTE DE FLEXION ROTATIVE TYPE SCHENK

### III - APPLICATION.

#### III-1- BUT.

A travers ce projet, on voulait atteindre les objectifs suivants:

- La réparation et la mise en marche de la machine SCHENK de flexion rotative.
- La détermination de la limite d'endurance, des aciers à l'état recuit, puis à l'état trempé.

#### III-2 - Réparation, mise EN MARCHE, Fabrication des épreuves.

##### a/ Réparation, Mise en marche.

La machine SCHENK de flexion rotative du Laboratoire de métallurgie, n'a pas fonctionné depuis 1976; le système électrique était défectueux, les effets de la corrosion ont bloqué les roulements, la masse coulissante etc.....

L'opération de démontage total de la machine afin de faire le nettoyage et le graissage s'est avéré nécessaire. Etant donné la spécificité de l'assemblage des pièces, le démontage demandait un matériel adéquat, ce dernier n'existait pas au niveau de l'atelier du département Mécanique,

On a été alors dans l'obligation, de faire ce travail à l'aide du rare outillage mis à notre disposition.

Lors de la première tentative de mise en marche, l'arbre flexible assurant la transmission du mouvement de rotation entre le moteur électrique et l'ensemble tournant s'est rompu.

Cette pièce importante de la machine possède des caractéristiques précises.

On a effectué plusieurs tentatives de réparation, on a réussi comme même à fabriquer un arbre flexible qui ne répond pas exactement aux critères exigés mais qui représente une solution provisoire.

#### - b/ Fabrication des éprouvettes.

La fabrication des éprouvettes s'est effectuée au tour parallèle, avec l'acier disponible au magasin du département mécanique; La difficulté d'usinage s'est localisée principalement dans la réalisation des deux congés reliant les diamètres  $d = 7,52 \pm 0,01$  et  $d = 12 \pm 0,01$ , pour ce faire un outil de forme a été fabriqué et utilisé.



### III-3 - Caractéristique du matériau de base .

Les essais de fatigue ont été effectués avec l'acier étiré de construction disponible au magasin de l'atelier du département mécanique, au premier abord, on avait aucune information sur cette acier.

A l'aide de l'observation micrographique de la structure, à travers deux échantillons prélevés sur le métal de base, on a pu déterminer approximativement la nuance et quelques propriétés mécaniques de cet acier. [17]

nuance : XC18 .

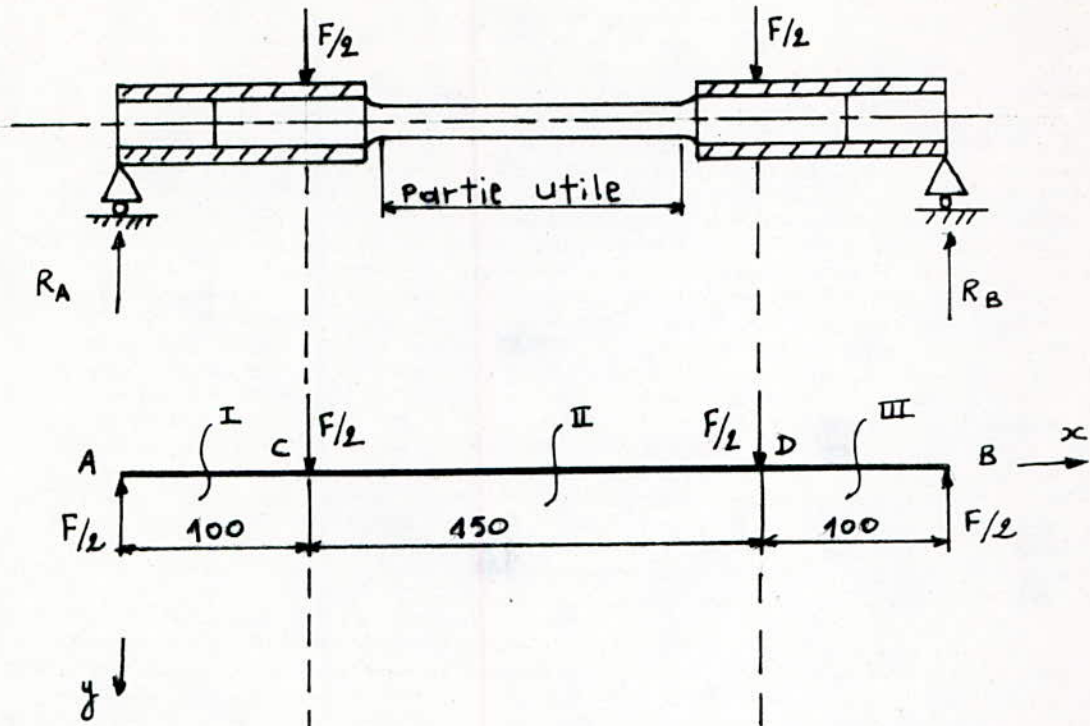
$R_{eH} = 270 \text{ MPa}$  .

$\sigma_D \simeq 230 \text{ MPa}$  .

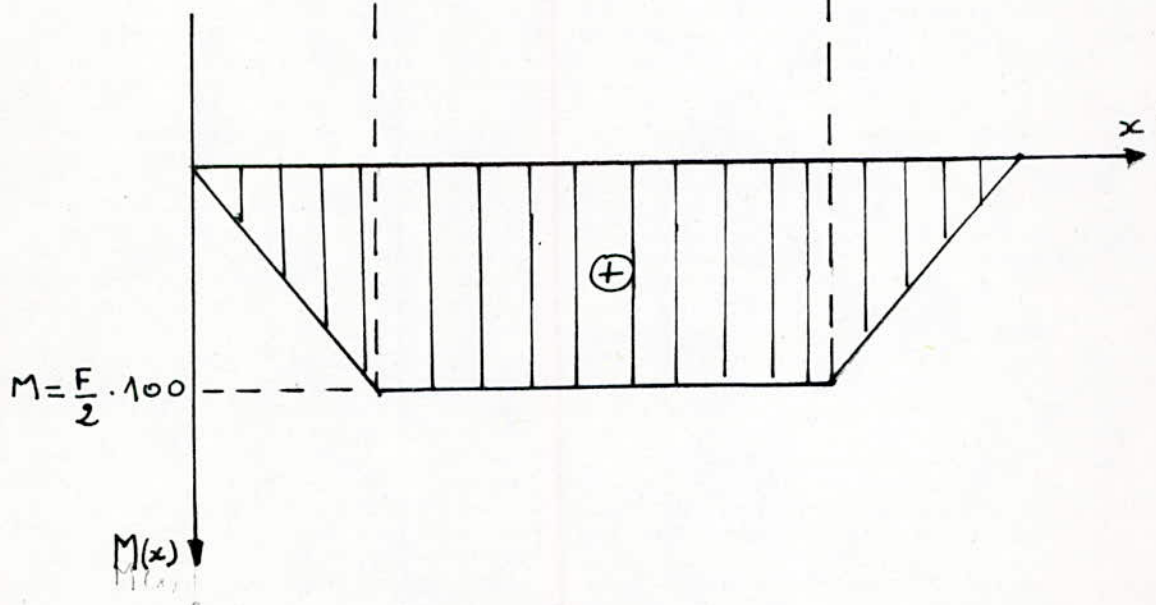
utilisation : constructions navales, pièces de forge, boulons...

### III-4 - Détermination des paramètres physiques des essais.

- a/ Variation du moment de flexion le long de l'éprouvette .



- Diagramme des moments flechissants:

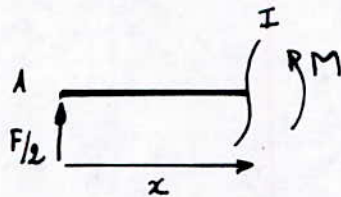


- Calcul des réactions aux appuis simples A et B :

$$R_A = R_B = F/2 \text{ pour raison de symétrie.}$$

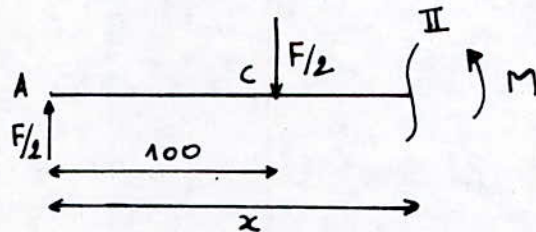
- Calcul du diagramme des moments flechissants.

\* section I :  $x \in [0, 100]$



$$\sum M/I = 0 \Leftrightarrow M - \frac{F}{2} \cdot x = 0; \text{ d'où: } M = \frac{1}{2} \cdot F \cdot x.$$

\* section II :  $x \in [100, 250]$



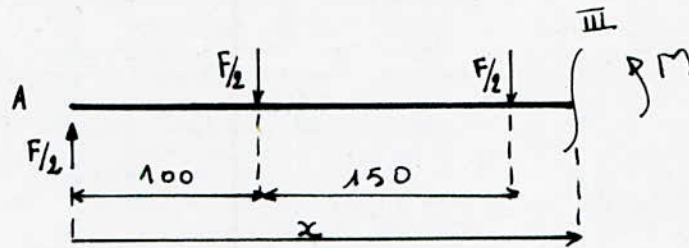
$$\sum M/II = 0 \Leftrightarrow M - \frac{F}{2} \cdot x + \frac{F}{2} \cdot (x - 100) = 0.$$

$$\text{d'où: } M = \frac{F}{2} \cdot 100$$

$$M = \text{constante}$$



\* section III :  $x \in [250, 350]$ .



$$\sum M_{/III} = 0 \Leftrightarrow M - \frac{F}{2} \cdot x + \frac{F}{2} (x - 100) + \frac{F}{2} (x - 250) = 0.$$

$$\text{d'où : } M = \frac{F}{2} \cdot 350 - \frac{F}{2} \cdot x.$$

$$M = \frac{F}{2} (350 - x).$$

- unités :

$$F \rightarrow [N].$$

$$x \rightarrow [mm]$$

$$M \rightarrow [N \cdot mm]$$

On constate, que le moment flechissant est constant sur toute la longueur utile de l'éprouvette, pour une force donnée :  $M = \frac{F}{2} \cdot 100$ .

La graduation de la machine, présente une variation de la force  $F$  résultante entre 0 et 30 daN.

Au cours de nos deux essais de fatigue (afin d'obtenir des charges échelonnées en croissant; voir IV), la force  $F$  appliquée à l'éprouvette évolue entre 1 et 10 daN avec un pas de 1 daN, puis entre 10 et 30 daN avec un pas de 2 daN

Tableau de variation du moment flechissant le long de la partie utile, en fonction de la force résultante appliquée.

$F$ [N]	$F/2$ [N]	$M$ [N.mm]	$F$ [N]	$F/2$ [N]	$M$ [N.mm]
10	5	500	120	60	6000
20	10	1000	140	70	6500
30	15	1500	160	80	8000
40	20	2000	180	90	9000
50	25	2500	200	100	10.000
60	30	3000	220	110	11000
70	35	3500	240	120	12000
80	40	4000	260	130	13000
90	45	4500	280	140	14000
100	50	5000	300	150	15000

b/ Contraintes maximales le long de la partie utile

Pour les fibres externes de la partie utile qui sont les plus sollicitées, l'amplitude de la variation de l'effort est maximale; c'est cette amplitude qui intervient dans le calcul de la contrainte.

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

$$\sigma = \frac{M}{I/v}$$

M: moment fléchissant par rapport à la section considérée

$$M = \frac{F}{2} \cdot 100;$$

F: charge appliquée;

I: moment d'inertie de la section considérée par rapport

à l'axe neutre  $I = \frac{\pi d^4}{64}$

v: distance de la fibre neutre à la fibre externe  $v = \frac{d}{2}$

d: diamètre de la section considérée  $d = 7,5 \text{ mm}$

$$\sigma = \frac{1}{2} F \cdot \frac{3200}{\pi (7,5)^3} = \left(\frac{1}{2} F\right) \cdot 2,4$$

unités:  $F \rightarrow [N]$

$\sigma \rightarrow [N/mm^2]$  ou  $[MPa]$

$$\sigma = 2,4 \cdot \frac{1}{2} F$$



Tableau de variation de la contrainte maximale en fonction de la force résultante appliquée.

F [N]	F/2 [N]	$\sigma$ [MPa]	F [N]	F/2 [N]	$\sigma$ [MPa]
10	5	12	120	60	144
20	10	24	140	70	168
30	15	36	160	80	192
40	20	48	180	90	216
50	25	60	200	100	240
60	30	72	220	110	264
70	35	84	240	120	288
80	40	96	260	130	312
90	45	108	280	140	336
100	50	120	300	150	360

## IV RESULTATS

a/ Essai de fatigue en flexion rotative  $n \approx 1$ .

Eprouvette : voir II - 4 -

Matériau : acier étiré recuit.

vitesse de rotation : 2760 tours/minute

fréquence : 46 Hz

$\sigma$ [MPa]	nombre de tours initial	nombre de tours final	$\sigma$ [MPa]	nombre de tours initiale	nombre de tours final
0	373523	374523	144	384523	385523
12	374523	375523	168	385523	386523
24	375523	376523	192	386523	387523
36	376523	377523	216	387523	388523
48	377523	378523	240	388523	389523
60	378523	379523	264	389523	390523
72	379523	380523	288	390523	390827 rupture
84	380523	381523	312		
96	381523	382523	336		
108	382523	383523	360		
120	383523	384523			

Conformément à la méthode des paliers successifs de LOCATI, l'éprouvette est soumise à des paliers de charge échelonnés en croissant; chaque palier correspond à un nombre de cycles constant  $n = 10^5$  cycles.

Le palier initial devrait se situer légèrement en dessous de la limite d'endurance présumée, mais à priori on ne connaissait pas cette dernière d'où le tableau précédent.

On représente sur le diagramme de Wöhler les branches horizontales de deux courbes hypothétiques dont le coude est situé vers  $3 \cdot 10^6$ , ordre de grandeur généralement admis pour les aciers étirés [18]

On représente en outre les branches inclinées des deux courbes avec une pente d'autant plus grande que la limite d'endurance est élevée (fig IV-1).

Pour la commodité de la représentation, on utilise des abscisses logarithmiques; les courbes d'endurance présentent alors une partie droite inclinée tant que la limite d'endurance n'est pas atteinte et une partie parallèle à l'axe des abscisses lorsque cette limite est atteinte.



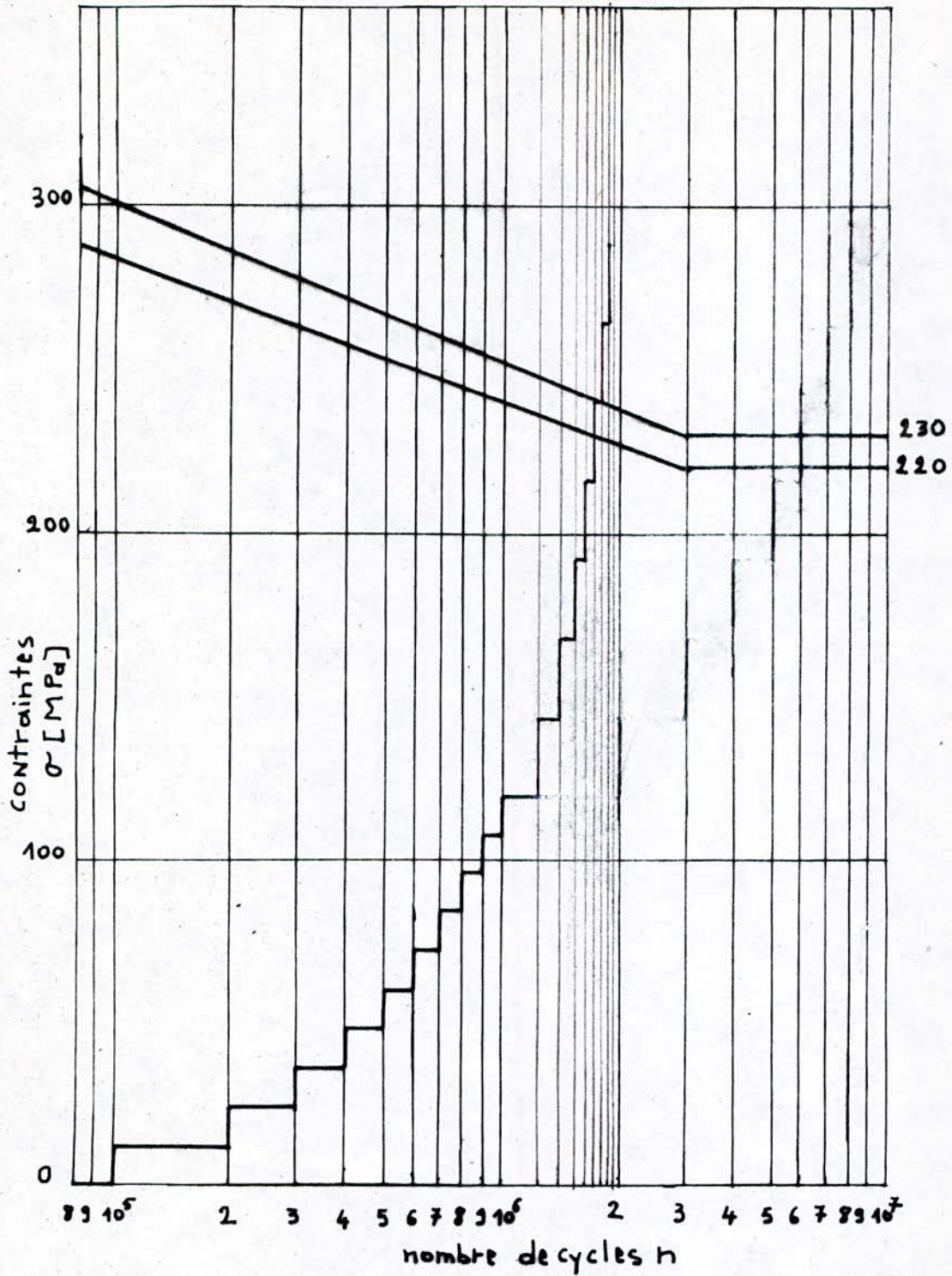


fig IV - 1 - Paliers de charges échelonnés et courbes  $\sigma$ -n supposés

On calcule ensuite, pour chacune des deux courbes de Wöhler hypothétiques, les dommages partiels  $n/N$  correspondant aux différents niveaux de contrainte,  $N$  étant le nombre de cycles à rupture au niveau de contrainte et pour la courbe de Wöhler considérée.

Tableau représentant le calcul des dommages cumulés pour différents niveaux de contrainte par rapport à 2 courbes d'endurance, ayant respectivement pour limites: 220 et 230 MPa.

contrainte $\sigma$ [MPa]	nombre de cycles $n$	Dommages cumulés			
		courbe $\sigma_D = 220$		courbe $\sigma_D = 230$	
		$N$	$n/N$	$N$	$n/N$
0	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
12	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
24	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
36	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
48	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
60	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
72	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
84	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
96	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
108	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
120	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
144	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
168	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
192	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
216	$10^5$	$\infty$	0	$\infty$	0
240	$10^5$	$10^6$	0,1	$1,8 \cdot 10^6$	0,05
264	$10^5$	$2,8 \cdot 10^5$	0,36	$5,8 \cdot 10^5$	0,17
288	$0,003 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^4$	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^5$	$1,76 \cdot 10^{-3}$
Dommages cumulés		0,46		0,22	



On porte ensuite les valeurs des dommages cumulés calculées pour chacune des deux courbes hypothétiques en fonction des limites d'endurance correspondant à ces deux courbes. La contrainte, obtenue par interpolation, pour laquelle le dommage cumulé est égal à 1 représente la limite d'endurance de l'éprouvette essayée : (fig IV - 2).

$$\sigma_D = 197 \text{ MPa}$$

La valeur de la limite d'endurance pour l'acier étiré essayé  $\sigma_D = 197 \text{ MPa}$ , approche avec un rapport égal à 0,86 la valeur estimée à l'aide de l'observation micrographique  $\sigma_D = 230 \text{ MPa}$  (voir III - 3).

L'écart constaté entre ces deux résultats est justifié par la méthode même utilisée à priori (La méthode micrographique) pour estimer la limite de fatigue.



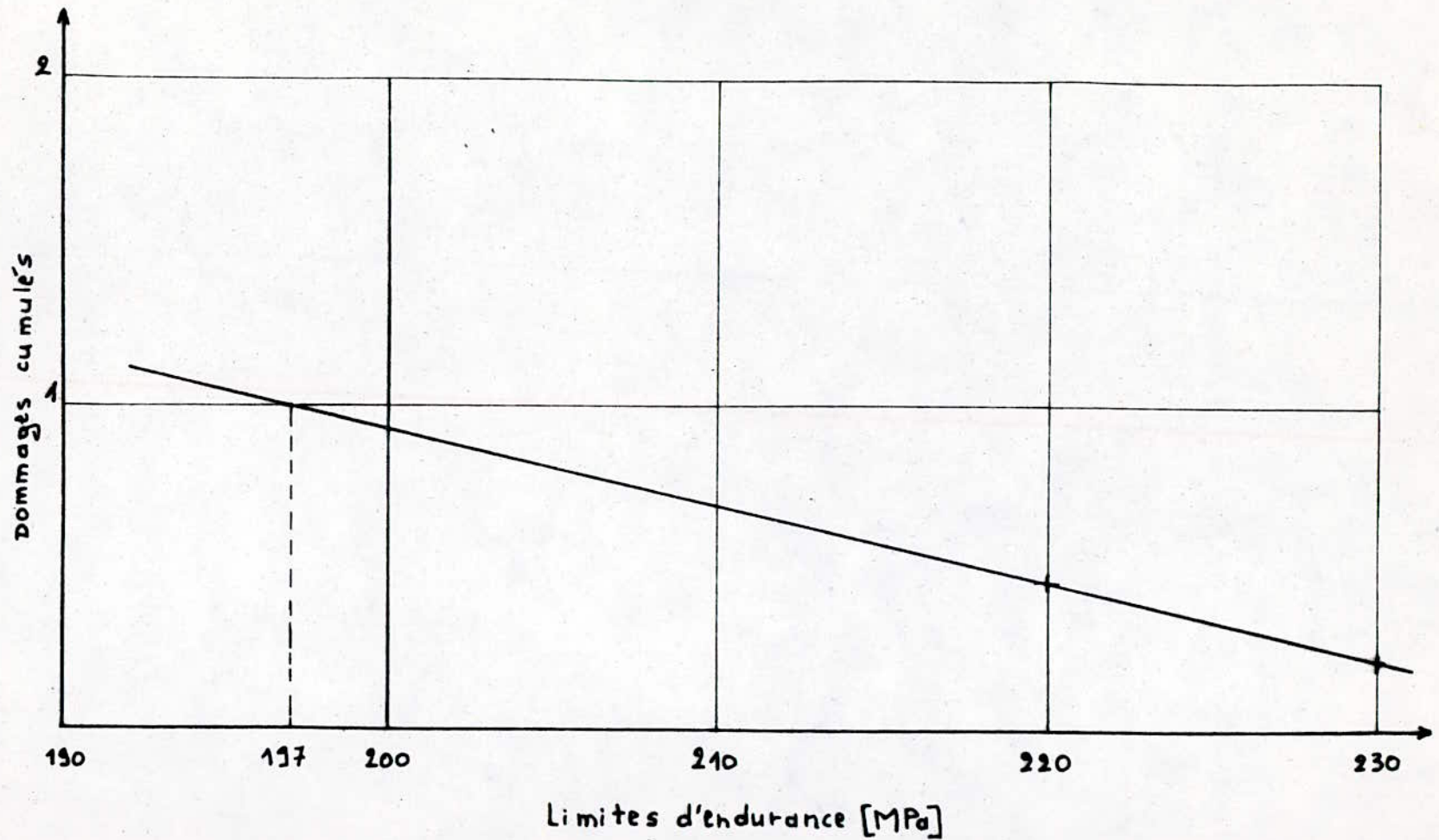


Fig IV.2 - Détermination de la limite d'endurance d'après la méthode de L-LOCATI  
 $\sigma_D = 197 \text{ MPa}$

b/ Essai de fatigue en flexion rotative n°2.

Eprouvette: voir II-4

Matériau: acier étiré trempé à l'eau à 850-900°C

vitesse de rotation: 2760 tours/minute

fréquence: 46 Hz

$\sigma$ [MPa]	nombre de tours initial	nombre de tours final	$\sigma$ [MPa]	nombre de tours initial	nombre de tours final
0	390848	391848	144	401848	402848
12	391848	392848	168	402848	403848
24	392848	393848	192	403848	404848
36	393848	394848	216	404848	405848
48	394848	395848	240	405848	406848
60	395848	396848	264	406848	407848
72	396848	397848	288	407848	408848
84	397848	398848	312	408848	409848
96	398848	399848	336	409848	410848
108	399848	400848	360	410848	411848
120	400848	401848			

Au cours de l'essai de fatigue en flexion rotative de l'éprouvette n°2, la capacité de charge (360 MPa) a été épuisée sans qu'on puisse observer la rupture.

Cet essai nécessite le rajout de la surcharge de la machine, dont on ne connaît, ni la masse, ni son influence sur la graduation ; Ceci est dû d'une part à l'absence d'un catalogue, et d'autre part au manque de temps nécessaire à l'élaboration d'une méthode, pour déterminer la corrélation existante entre la surcharge et les graduations de la machine.



## V. CONCLUSION.

On a réussi à réparer, et mettre en marche la machine SCHENK d'essais de fatigue en flexion rotative.

À l'aide de la charge mobile de la machine, on a déterminé la limite d'endurance de l'éprouvette en acier étiré à l'état recuit, par contre cette charge est insuffisante pour déterminer la limite de fatigue de l'éprouvette en acier étiré à l'état trempé ; on constate donc que les aciers trempés nécessitent l'utilisation de la surcharge.



- [6] J. BAUSCHINGER, Changement de la limite élastique sous l'effet de variations cycliques de l'effort, Mitt. Mech. Technischen Laboratorium München, vol. 13, 1886.
- [7] J.A. EWING et J.C. HUMFREY, Rupture des métaux par efforts répétés, phil. Trans. Royal society, vol. 200, p. 241, 1903.
- [8] H.J. GOUGH et D. HANSSON, La tenue des métaux sous les efforts répétés, Proc. Royal Soc, vol. 104, p. 539, 1923.
- [9] H.J. GOUGH, La relation cristalline en relation avec la rupture des cristaux. Proc. A.S.T.M, 1933.
- [10] E. OROWAN, Théorie of the fatigue of métais, Proc. Royal Society, vol. 171, p. 179, 1939.
- [11] P. FELTHAM, La fatigue des métaux. Considérations sur les théories de DEHLINGER et d'OROWAN, The IRON and Coal trades Review, p. 593, 3 Nov. 1950.
- [12] A.K. HEAD, le développement des fissures de fatigue, The philosophical magazine, p. 925, sept. 1953.
- [13] A.K. HEAD, The propagation of fatigue Cracks, J. Appl. Mech. 23, p. 407 à 410. 1956.
- [14] O. FÖPPEL, L'importance pratique de la capacité d'amortissement des métaux et spécialement des aciers, IRON and Steel Inst. Meeting, sept 1936
- [15] M.A. MINER, Cumulative Damage in fatigue, J. Appl. Mech., 12, p. A.159 à A164. 1945



- [16] M. PROT - l'essai de fatigue sous charge progressive, Revue de métallurgie, n° 12, p. 481, décembre 1948 ; Revue générale de mécanique, n° 49, p. 1, 1953.
- [17] G. LEMASSON - Matériaux de construction mécanique et électrique, p. 19, édition DUNOD.
- [18] .R. CAZAUD, La fatigue des métaux, p. 213 et 214, édition DUNOD, 1969.

