

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
—oOo—

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

15/87

AEX

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : MINES ET MÉTALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### SUJET

ETUDE ET REALISATION D'UN  
DISPOSITIF D'ESSAI DE FATIGUE  
ET DE CHOC THERMIQUES

Proposé par :

Mr. K. ABADLI

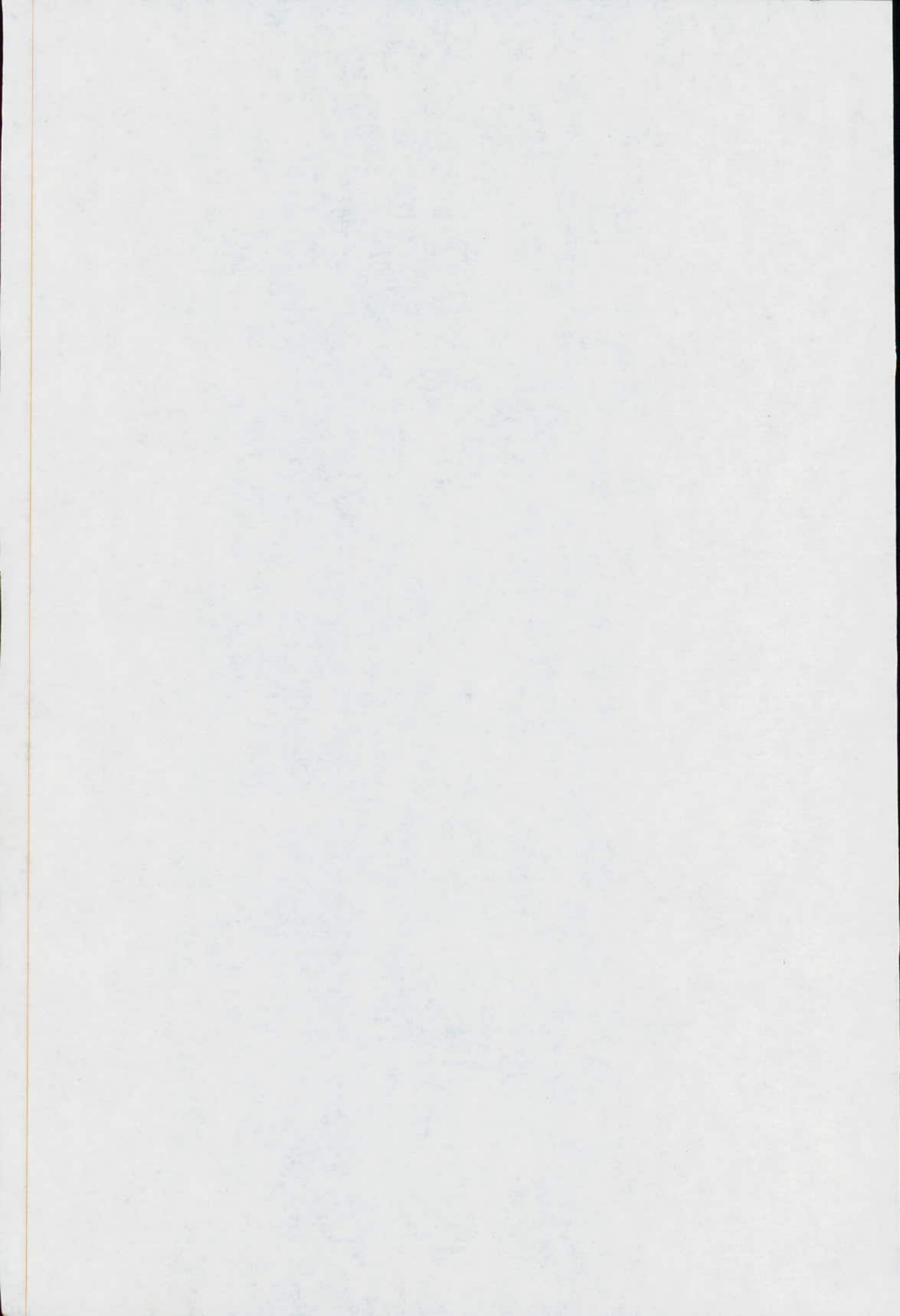
Etudié par :

Mr. A. DAHOUN

Dirigé par :

Mr. K. ABADLI

PROMOTION : Juin 1987



~ Dedicaces ~

A mes chers parents

A toute ma famille

A mes chers amis.

Je dedie ce modeste travail en guise

de respect et de reconnaissance.

Abdesselam Dahroum.

## ~ Remerciements ~

Je tiens avant tout à exprimer ma profonde reconnaissance à M<sup>r</sup> K. ABADLI pour sa précieuse aide et la bonne ambiance dans laquelle a été accompli ce travail.

Je tiens également à remercier :

- Les enseignants et le personnel du département Mines et Métallurgie.

- Les membres du jury qui m'honorent de juger ce modeste travail.

- Tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

- S O M M A I R E -

INTRODUCTION

CHAPITRE 1 : LES SOLLICITATIONS D'ORIGINE THERMIQUE

1-1	Définitions .....	1
1-2	Mécanismes Fondamentaux de la fatigue et du choc Thermiques .....	2
1-3	Facteurs de fatigue et de choc Thermiques .....	6
1-4	Endommagement par fatigue et choc thermique .....	11

CHAPITRE 2 : CONCEPTION ET REALISATION D'UNE MACHINE D'ESSAIS  
DE FATIGUE ET DE CHOC THERMIQUES

2-1	Objectif du dispositif d'essai .....	13
2-2	Principe de fonctionnement .....	13
2-3	Possibilités et limites de la machine .....	14
2-4	Methode expérimentale .....	15

CHAPITRE 3 : MATERIAUX ETUDIES ET TECHNIQUE EXPERIMENTALES

3-1	Elaboration .....	16
3-2	Techniques expérimentales .....	19

CHAPITRE 4 : ETUDE DU COMPORTEMENT SOUS SOLLICITATIONS THERMIQUES  
DE LA FONTE GS

4-1	Etude du comportement en choc thermique .....	23
4-2	Etude du comportement en fatigue thermique .....	24

CHAPITRE 5 : INTERPRETATIONS GENERALES ET CONCLUSIONS

5-1	Interprétations des résultats .....	27
5-2	Conclusion .....	29

Dans beaucoup d'applications industrielles, les métaux et alliages sont soumis à des fluctuations cycliques de température. Nous citons à titre d'exemple les générateurs de vapeur, les turbines à gaz, les moteurs, les lingotières, les cylindres de laminoirs.

Le cyclage thermique engendre des contraintes dites thermiques qui seront responsables de l'endommagement des pièces et de la réduction de leurs durées de vie si la valeur de ces contraintes est inférieure à la limite élastique du matériau.

La résistance à l'endommagement d'un matériau dépend de plusieurs facteurs, certains liés à la nature et aux caractéristiques du matériau et d'autres aux conditions du cyclage thermique, les transformations provoquées dans le matériau et de l'environnement pour l'étude du comportement sous sollicitations thermiques des métaux et alliages beaucoup de dispositifs et de machine d'essai de fatigue et de choc thermique ont été proposés.

La conception d'un dispositif est inhérente aux conditions fixées et aux problèmes abordés ainsi, D. ROUSSEAU et COLL ( 6 ) ont mis au point un dispositif fonctionnement avec un chauffage à induction qui a l'avantage d'obtenir des vitesses de variation de température élevées ; LEROY ( 7 ) a amélioré ce système par l'introduction du facteur corrosion.

Pour notre part, nous nous intéressons à un dispositif fonctionnant avec un chauffage par effet joule à température fixée.

L'éprouvette se déplace, guidée par un mécanisme électromagnétique verticalement de façon oscillatoire avec un cycle contrôlé par un système électromécanique.

Dans ce mémoire, nous consacrons le chapitre 1 à l'étude bibliographique sur la fatigue et le choc thermique.

Dans le chapitre 2, nous présentons le dispositif mis au point.

L'application de ce dispositif à l'étude du comportement de la fonte G.S. en fatigue et en choc thermiques est étudiée dans les chapitres 3 et 4.

Enfin, nous présentons au chapitre 5, l'interprétation générale des résultats et la conclusion.

## Les Sollicitations d'origine Thermiques

### 1-1 - DEFINITION

Lorsqu'un matériau est soumis à des variations de température il est le siège de contraintes et de déformations-.

Ces sollicitations d'origine thermiques existent sous deux formes: La fatigue thermique et Le choc thermique -.

#### 1-1-1 LA FATIGUE THERMIQUE

A Cause de l'étendue du problème, de la complexité des mécanismes et du nombre élevé des phénomènes qui se produisent en cours de la fatigue thermique, il est assez difficile de définir la fatigue de façon correcte-. C'est pourquoi plusieurs définitions ont été proposées pour décrire ce phénomène -.

Pour D.A. SPERA [ 1 ] " La fatigue thermique, est la détérioration progressive et éventuellement la fissuration des matériaux par l'alternance de l'échauffement et du refroidissement avec une dilatation thermique entièrement ou partiellement empêchée -.

Une autre définition est donnée par MIANNAY [ 2 ] :  
"La fatigue thermique, désigne le problème de fissuration progressive des matériaux soumis à des variations cycliques de la température : La fissuration se produit sous l'effet de la déformation et des contraintes d'origine thermiques "

#### 1-1-2 LE CHOC THERMIQUE

Les problèmes rencontrés pour la définition de la fatigue thermique se retrouvent aussi pour le choc thermique. MIANNAY [ 2 ] considère que : "Lorsque la fissuration apparaît au cours du premier cycle de fatigue thermique celle-ci est alors appelée choc thermique "

Selon MANSON [ 3 ] " La différence entre la fatigue et le choc thermique, est du fait que lors du choc thermique, toute la pièce est portée à une température uniforme (non existence de gradient thermique entre les différents points de la pièce ), puis elle est immergée brutalement dans un milieu à plus basse température -.  
Lors de la fatigue thermique, il existe toujours un gradient de température entre la surface et les autres couches internes de la pièce cela est dû à un temps de maintien à haute température relativement court "

D'après les définitions citées ci-dessus, la fatigue thermique apparaît comme une caractéristique des matériaux ductils et le choc thermique une caractéristique des matériaux fragiles -.

## 1-2 LES MÉCANISMES FONDAMENTAUX DE LA FATIGUE ET CHOC THERMIQUES-

Les variations de températures provoquent le développement de contraintes dans le matériau-. La nature et l'intensité de ces contraintes dépendent du signe des variations et du gradient de température du matériau et du milieu -.

### 1-2-1 CONTRAINTES D'ORIGINE THERMIQUE

La dilatation relative dans une pièce, due aux variations de température, ne concerne en fait que quelques couches superficielles car le cœur de la pièce est soit plus froid, soit plus chaud et se déforme donc dans le sens à empêcher la déformation (traction ou compression) des couches superficielles, ceci provoque la naissance et le développement de contraintes au sein de la pièce -.

Les contraintes et les déformations associées à une pièce plane sont :

$$\varepsilon = \alpha \Delta T$$

$$\sigma = E \varepsilon = E \alpha \Delta T$$

Pour une pièce de géométrie complexe on a :

$$\sigma = \frac{E \alpha \Delta T S}{1 - \nu}$$

S : Etant le facteur de forme .

$\nu$  Le coefficient de poisson, E le module de Young .

Lors d'un échauffement, puis un refroidissement rapides, la surface d'une pièce métallique se dilate, puis se contracte-. Au cours d'un tel cycle, la température de la surface ( $T_s$ ) varie beaucoup plus rapidement que la température moyenne ( $T_{moy}$ ) de la pièce -.

La différence entre ces deux températures ( $T_s - T_{moy}$ ) augmente puis diminue, sa valeur maximale peut entraîner des contraintes thermiques suffisantes pour causer la fissuration -.

La distribution instantanée de la température, permet de déterminer les déformations et les contraintes dans une pièce soumise à un cyclage thermique-.



Lors d'un chauffage rapide, la température de la surface ( $T_s$ ) monte rapidement par rapport à la température moyenne ( $T_{moy}$ ) de la pièce -. Au contraire, pendant, un refroidissement rapide  $T_s$  diminue plus rapidement que  $T_{moy}$ -. A chaque instant la différence ( $T_s - T_{moy}$ ) mesure le gradient thermique expérimental -. (Fig ; a ; b )

Au cours d'une variation rapide de la température d'une pièce métallique, le coefficient de transfert de chaleur  $h$  (Quantité de chaleur transmise par unité de temps, par unité de surface et par unité de différence de température entre la paroi et le milieu) la diffusivité thermique et les différences de dilatation thermique des couches respectives de la masse influencent sur le gradient thermique qui engendre un gradient de contraintes thermiques à travers la section de la pièce -.

Si une pièce soumise à une température ( $T_1$ ) puis plongée dans un milieu à une température ( $T_2$ ), les échanges thermiques entre la pièce et le milieu sont fonction de :

1- Coefficient de transfert  $h$ , définie par la loi de NEWTON

$$h = \frac{Q}{S (T_1 - T_2)}$$

ou  $\frac{Q}{S}$  Représente le flux de chaleur

2- La diffusivité thermique qui traduit la diffusion thermique au sein du matériau et qui est définie par

$$a = \frac{K}{\rho C_p t}$$

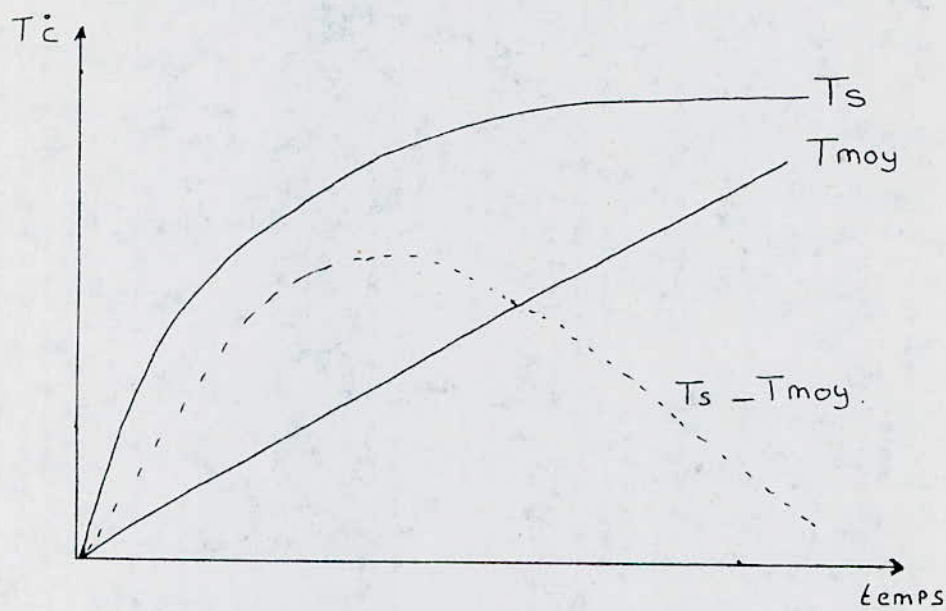
La contrainte thermique s'exprime par rapport à la température moyenne ( $T_{moy}$ )

$$\sigma_1 = \frac{E (T - T_{moy})}{1 - \mu}$$

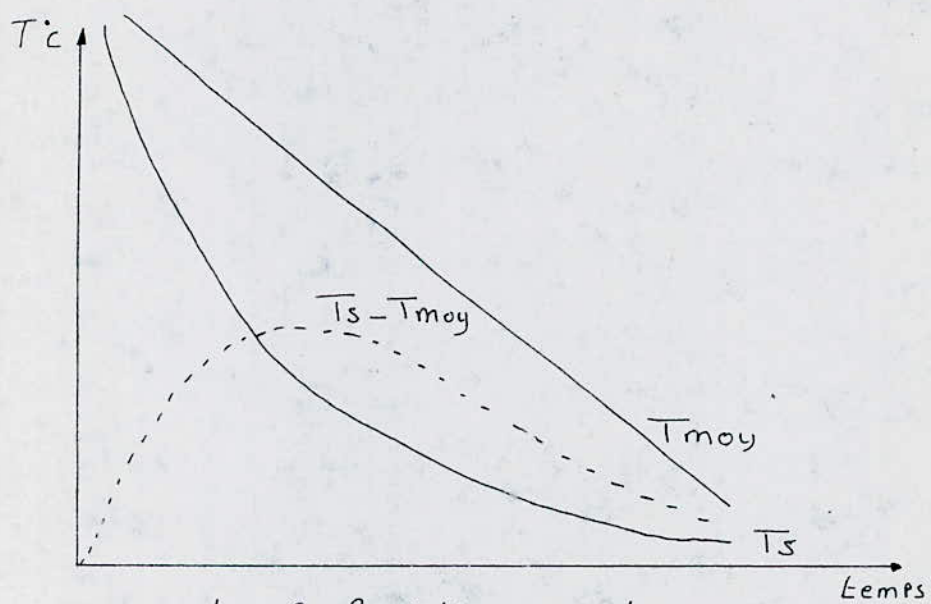
La contrainte due à la variation de température de ( $T_1$ ) à ( $T_2$ )

$$\sigma_2 = \frac{-E \alpha (T_1 - T_2)}{1 - \mu}$$

.../...



a. Chauffage



b. Refroidissement.

fig: 1

La contrainte réduite ( $T$ ), introduite par MANSON [ 3 ], pour avoir une approche plus globale des mécanismes s'exprime par :

$$T^* = \frac{T_1}{T_2} = \frac{T - T_{moy}}{T_1 - T_2}$$

La contrainte réduite peut s'exprimer à l'aide de deux variables  $B$  et  $\theta$  respectivement :

$$\beta = \frac{a h}{K} \quad \text{Variable réduite de transfert ou nombre de Biot}$$

$$\theta = \frac{k t}{\rho a^2 C_p} \quad \text{Temps réduit}$$

$a$  étant l'épaisseur de la plaque,  $\rho$  la densité et  $C_p$  la chaleur spécifique du matériau

### 1-2-2 MECANISME DE LA FATIGUE THERMIQUE

Le diagramme de NORTHCOTT et BARON ( Fig 2 ) permet de mettre en évidence le mécanisme de la fatigue thermique -.

Si une pièce, sans contraintes internes (points 0), subit un chauffage, la température superficielle augmente rapidement, les couches superficielles tendent à se dilater, mais le cœur de la pièce plus froid, empêche cette dilatation et exerce donc des contraintes de compression-. Les déformations sont d'abord élastiques (branche OA) puis deviennent plastiques (Branches AB) lorsque le gradient de température entre la surface et le cœur devient suffisant-. A ce niveau les contraintes auront dépassées la limite élastique et peuvent provoquer le fluage -.

Au cours du refroidissement, les couches superficielles tendent à se contracter, mais à cause des déformations plastiques de compression développées au cours de la phase du chauffage, limitent le retour

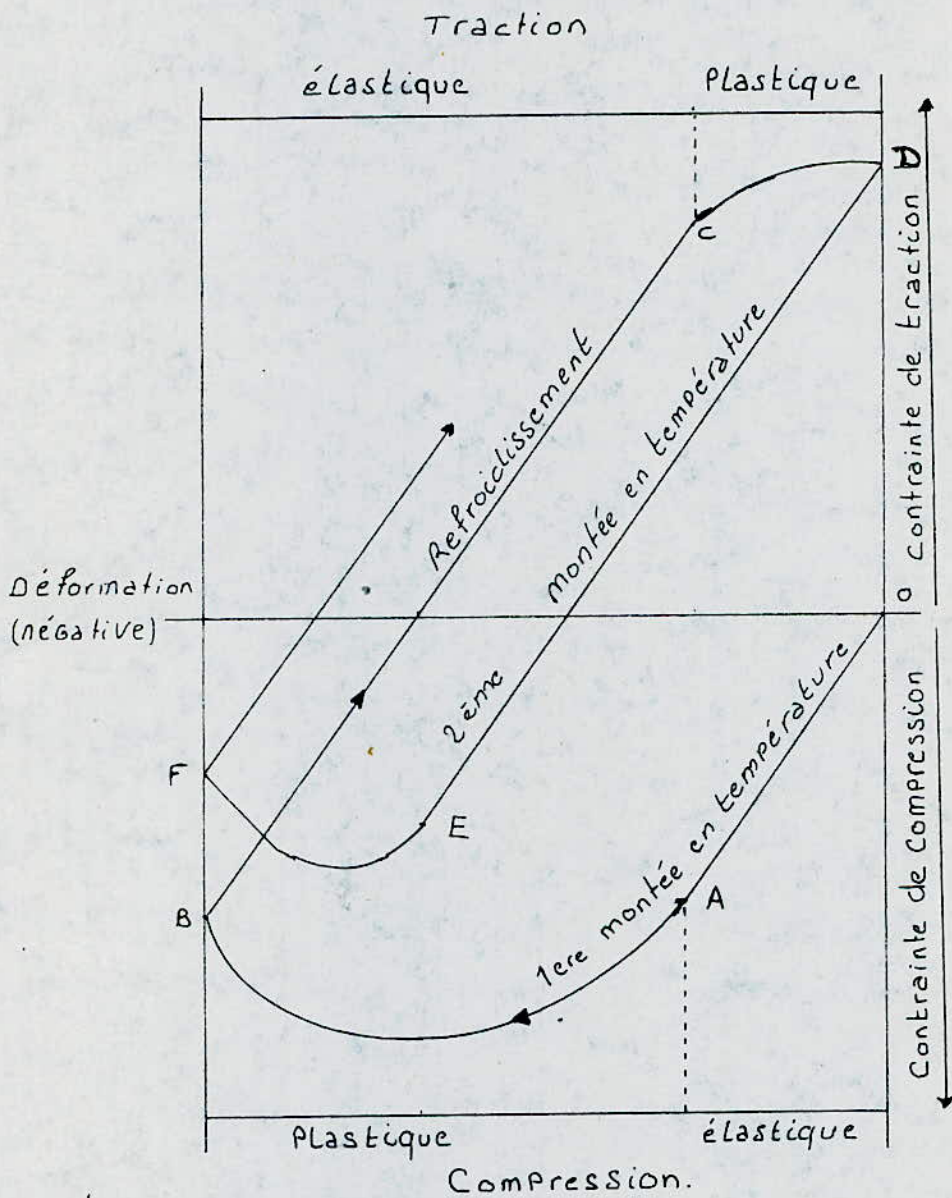


Fig : 2 . Mécanisme de Fatigue Thermique . Diagramme de NORTHCOTT et BARON

ce qui engendre des contraintes de traction d'abord élastiques (Branches Bc) puis plastiques (Branches c D) -.

Lorsque la pièce retrouve sa température initiale, la déformation disparaît - ( Point D) mais une contrainte de traction résiduelle subsiste ( $\sigma_D$ ).

Au cours des cycles suivants, le processus se répète et après un certain nombre de cycles la courbe se stabilise sous la forme d'une boucle -.

La contrainte résiduelle ( $\sigma_D$ ) sera responsable dans l'amorçage des fissures dans le matériau -.

Lors d'un maintien à chaud dans un état de contraintes de compression élevées, les déformations élastiques se transforment en déformations plastiques, à cause des phénomènes de fluage et de relaxation, le niveau des contraintes sera abaissé-. Le point figuratif sur la courbe se déplace de (B) vers (B') (Fig 3 )

1-2-3 MECANISME DE CHOC THERMIQUE

Pour le choc thermique, les variations de température sont plus importantes que celles provoquant la fatigue thermique -.

Lorsque la pièce subit un maintien à chaud, les contraintes de compressions sont très importantes, elles dépassent de loin la limite élastique et provoquent la plastification totale des couches superficielles -.

Lors d'un refroidissement brutal (trempe), le gradient de température est maximal et les contraintes de traction développées sont très élevées d'où la fissuration rapide du matériau -.

C'est pendant la phase de refroidissement que se produit l'endommagement par fissuration du matériau -.

Ceci est dû au fait que les contraintes thermiques de traction agissent sur les couches superficielles plastifiées et de caractéristiques mécaniques affaiblies au cours de la phase de chauffage précédente -.

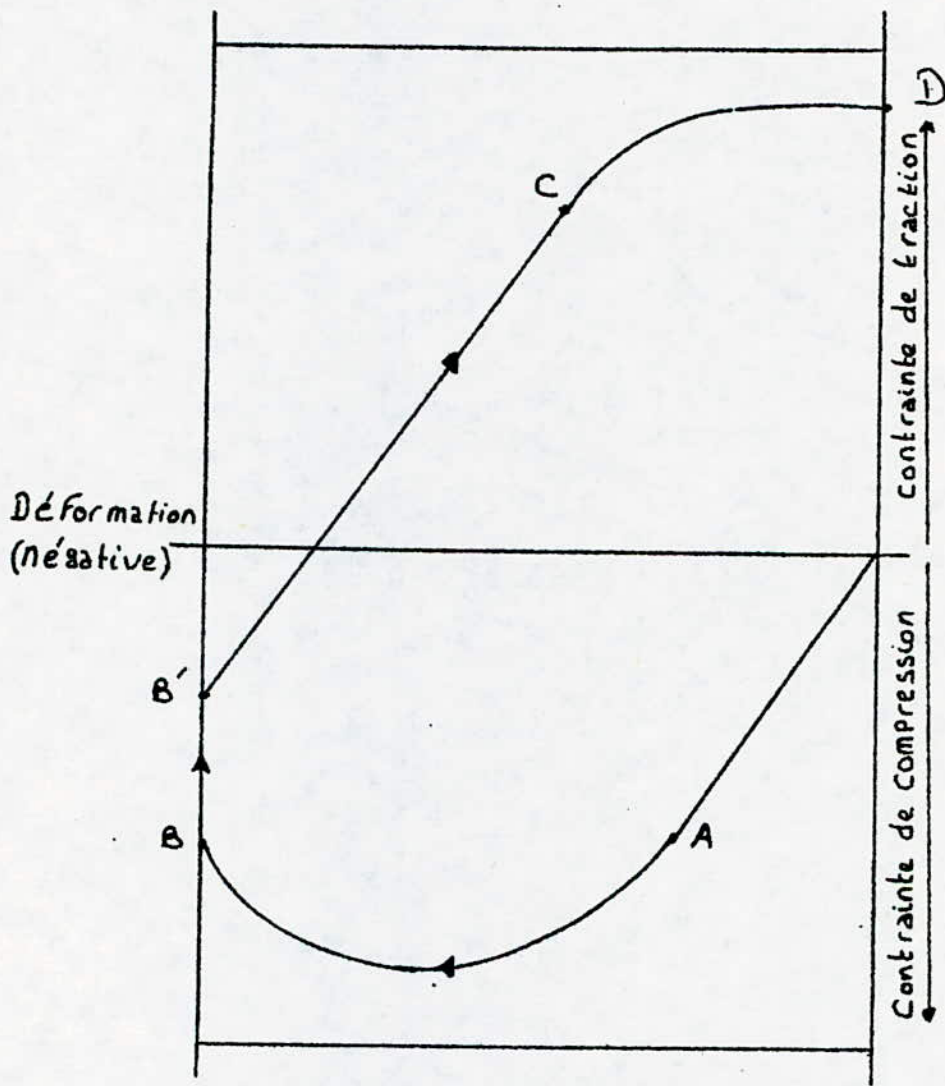


Fig : 3 Mécanisme de Fatigue  
Thermique influence du Fluage

## 1-3- FACTEURS DE FATIGUE ET CHOC THERMIQUES

### 1-3-1- INFLUENCE DES TEMPERATURES DU CYCLAGE THERMIQUE

LES PARAMETRES D'UN CYCLAGE THERMIQUE SONT :

- La température maximale (  $T_{max}$  )
- La température minimale (  $T_{min}$  )
- La température moyenne (  $T_{moy} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$  )

Ces paramètres peuvent, par analogie, être assimilés aux paramètres du cyclage en fatigue mécanique ( $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$ ,  $\sigma_{moy}$  et  $\Delta \sigma$ ). Les variations de ces paramètres déterminent le spectre de la sollicitation thermique -.

#### 1-3-1-1- LA TEMPERATURE MAXIMALE ( $T_{max}$ )

Considérons que la température minimale est constante et que la température maximale du cyclage augmente, (ce qui entraîne automatiquement l'augmentation de ( $T_{moy}$ ) et ( $DT$ ) (Fig 4 ). Comme les contraintes thermiques étant engendrées, principalement, par la différence de température ( $DT$ ), subissent aussi donc une augmentation. D'autre part, l'augmentation de la température moyenne ( $T_{moy}$ ) aura pour effet l'abaissement des caractéristiques mécaniques du matériau

Ainsi, une élévation de ( $T_{max}$ ) provoque un endommagement rapide du matériau et réduit sa durée de vie. De même la sévérité du cyclage thermique fait apparaître une transition fatigue thermique-choc thermique (ruine progressive - ruine brutale )

#### 1-3-1-2 LA TEMPERATURE MINIMALE ( $T_{min}$ )

Pour une température maximale donnée, une augmentation de la température minimale provoque :

- Une diminution du gradient thermique ( $DT$ ) donc engendre des contraintes thermiques plus faibles, ce qui augmente la durée de vie de la pièce -.
- Une augmentation de la température moyenne, ce qui altère les propriétés mécaniques du matériau, mais cet effet (de second ordre par rapport à la diminution du gradient thermique ) peut être éliminé par .../...

une diminution de la température maximale (Fig 5 )

### 1-3-1-3 LE GRADIENT THERMIQUE ET LA TEMPERATURE MOYENNE

Une augmentation du gradient thermique, avec une température moyenne constante, a une influence toujours négative, car la contrainte thermique augmente et la dégradation des propriétés mécaniques, provoquée par une température moyenne plus importante (Fig 6 ) -.

L'influence de l'augmentation de la température moyenne (DT Constant) est négative car les propriétés mécaniques du matériau diminuent -.

Donc une augmentation du différentiel thermique ou la température moyenne provoque une diminution de la durée de vie de la pièce -.

Les paramètres (DT) et (Tmoy) suffisent à caractériser un cyclage thermique -. Le premier indique la sévérité du cyclage et le deuxième indique le niveau auquel le cyclage est stationnaire -.

Les paramètres (Tmax) et (Tmin), ne définissent pas directement la sévérité d'un cyclage thermique -. L'action d'un (Tmax) sévère peut être affaiblie, ou même supprimée par l'action d'un (Tmin) élevée est toujours négative et leur diminution est toujours positive -.

### 1-3-2 INFLUENCE DE LA VITESSE DE VARIATION DE LA TEMPERATURE .

Des refroidissements et des échauffements brutaux, provoquent des gradients thermiques assez importants, qui entraînent la ruine finale de la pièce, notamment pour des matériaux fragiles -. Une faible vitesse de refroidissement, peut également jouer un rôle nocif en provoquant des modifications structurales et agit donc sur les caractéristiques du matériau -.

### 1-3-3 INFLUENCE DES PARAMETRES THERMIQUES

#### 1-3-3-1 LA CONDUCTIVITE THERMIQUE K

Le gradient thermique est inversement proportionnel à la conductivité thermique, plus cette dernière est grande, plus les contraintes thermiques sont faibles

.../...



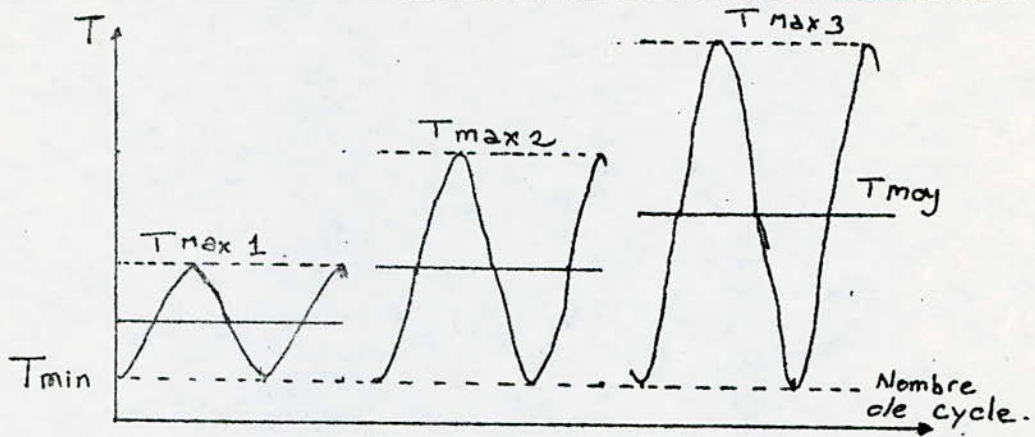


Fig: 4. Facteurs de fatigue et choc thermiques  
Influence de La Température Maximale  $T_{max}$

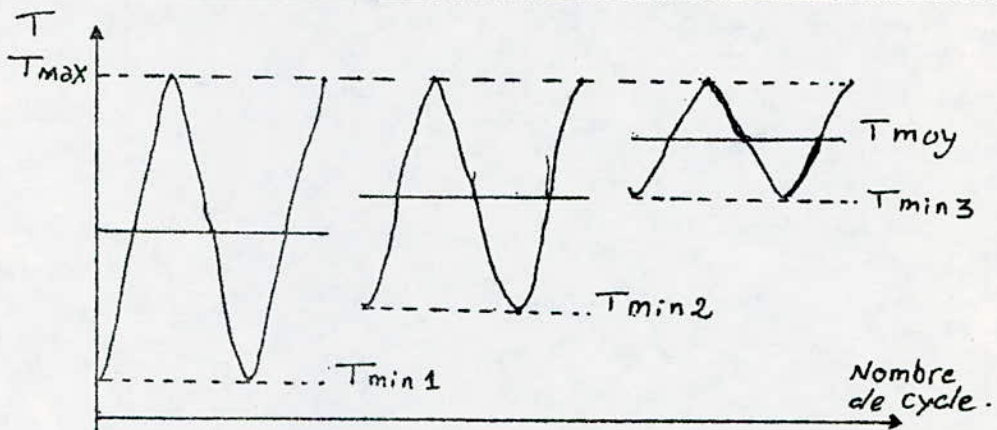


Fig: 5. Facteurs de fatigue et choc thermiques  
Influence de La Température minimale  $T_{min}$

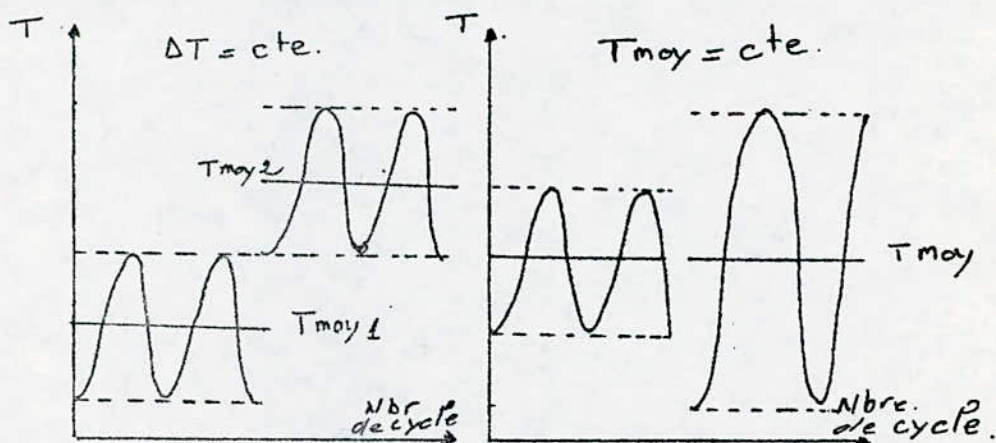


Fig: 6. Facteurs de fatigue et choc thermiques  
Influence du Gradient thermique et de  $T_{moy}$

La conductivité thermique est influencée par la nature du matériau donc on a intérêt à ce que ce dernier soit un bon conducteur de la chaleur -.

#### 1-3-3-2 DIFFUSIVITE THERMIQUE

Si la conductivité thermique contrôle l'amplitude des gradients thermiques, la diffusivité thermique contrôle la vitesse de développement de ces gradients -.

#### 1-3-3-3 COEFFICIENT DE DILATATION THERMIQUE

Les contraintes thermiques sont proportionnelles au coefficient de la dilatation  $\alpha$  car ce dernier est proportionnel à la déformation selon les relations suivantes :

$$\varepsilon = \alpha \Delta T \quad ; \quad \sigma = E \varepsilon.$$

Donc un coefficient de dilatation élevé engendre la réduction de la durée de vie des pièces -.

#### 1-3-3-4 COEFFICIENT DE TRANSFERT DE CHALEUR

Plus le coefficient de transfert de chaleur  $h$  est important, plus les contraintes amorcées sont élevées: donc une durée de vie plus faible -.

#### 1-3-4 FACTEURS GEOMETRIQUES ET ETAT DE SURFACE

Une taille importante des pièces entraîne des gradients thermiques élevés donc une réduction de la durée de vie -. De même, les formes complexes et la présence d'entailles ou d'angles vifs, provoquent la concentration de contraintes dans ces régions et réduisent fortement la durée de vie du matériau -.

##### - ETAT DE SURFACE

Les irrégularités superficielles, affectent fortement la résistance à la fatigue thermique, en créant une concentration de contraintes au fond des rayures -. D'autre part elles favorisent et accélèrent les phénomènes de corrosion et d'oxydation -.

Enfin, le mode d'usinage peut jouer un rôle important dans le comportement des pièces en fatigue et choc thermiques -.

.../...

En effet, pour des rectifications douces, la durée de vie est plus importante -, ce qui confirme les travaux de FLAVENOT et SCALLI [ 4 ] et ceux de FLUZINZ [ 5 ] -.

### 1-3-5 FACTEURS METALLURGIQUES

Il est certain que la nature du matériau, sa structure et ses propriétés physiques et mécaniques jouent un rôle prépondérant dans la tenue en fatigue et en choc thermique -.

La nature du matériau est déterminée par sa composition chimique et sa constitution microstructurale -. Les propriétés physiques sont celles liées au paramètre de température et donc déterminées par les facteurs thermiques déjà étudiées dans le paragraphe 1.3.3.

#### 1-3-5-1 NATURE DES ALLIAGES

La composition chimique et la présence de certains éléments, ont une influence capitale sur la tenue de l'alliage en fatigue et en choc thermique -.

En effet, la présence du silicium et du magnésium, font que la fonte grise à graphite sphéroïdal se comporte différemment que la fonte blanche ou la fonte grise lamellaire. La présence des éléments carburigènes dans les alliages ferreux, conditionne le comportement en fatigue et en choc thermiques-.

La nature des phases, leurs proportions et leurs distributions sont également des facteurs à prendre en considération -.

#### 1-3-5-2 CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Les caractéristiques mécaniques sont affectés aux températures élevée. Une bonne résistance au fluage et une limite élastique élevée sont donc souhaitables

Une ductilité élevée, favorise une bonne résistance au choc thermi-\* que par contre une bonne résistance à la fatigue thermique exige une bonne tenacité, ceci impose donc un compromis, car en générale une bonne résistance à la fatigue thermique n'est pas synonyme à une bonne résistance au choc thermique -.

.../...

### 1-3-5-3 OXYDATION ET CORROSION

Les travaux de ROUSSEAU et COLL [ 6 ] ont montré que l'oxydation agit sur la résistance à la fatigue, au choc thermique, en favorisant l'ammorçage des fissures, dans les aciers. Par contre, ils ont constaté que cette oxydation n'affecte pas la propagation des fissures. Ils déduisent que l'ammorçage des fissures, est favorisé par la fragmentation cellulaire de la couche superficielle d'oxyde à cause de la différence du coefficient de dilatation entre cette couche d'oxyde et le matériau -.

Lorsque les conditions de formation de pile électrochimique existent (cathode, anode et électrolyte) la corrosion humide intervient pour accélérer le phénomène **d'endommagement du matériau** .

Dans le cas de laminage à chaud, où le cylindre du laminoir et le produit à laminer constituent les électrodes et le lubrifiant l'électrolyte -.

Le couplage galvanique provoque le phénomène de corrosion humide qui s'associe aux phénomènes de fatigue thermique et d'usure pour accentuer l'endommagement des cylindres, ce que confirment les travaux de LEROY [ 7 ] et de FLUZIN [ 5 ] -.

## 1-4 ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE ET CHOC THERMIQUE

### 1-4-1 AMORCAGE DE LA FISSURATION

#### 1-4-1-1 AMORCAGE SOUS CONTRAINTE THERMIQUE

Une pièce métallique, soumise à un cyclage de chauffage et de refroidissement, subit à la surface un cyclage du type "compression-traction" dû à la nature cyclique des contraintes thermiques, qui peuvent être voisines ou supérieures à la limite élastique -. Après un certain nombre de cycles, des bandes de glissement se manifestent comme des irrégularités sur la surface sollicitée Fig ( 7a). En plus, il y a l'effet du milieu et de la chaleur -. Une température superficielle élevée, peut favoriser l'oxydation de la surface des irrégularités formées par les contraintes thermiques. Les extrusions, sont écrasées et ne se développent plus -. Les intrusions peuvent être des lors qu'elles existent, considérées comme des microfissures -. Elles sont des sites préférentiels d'une part, pour l'action du milieu corrosif et d'autre part, par la concentration de contraintes thermiques (Fig 7b)

#### 1-4-1-2 AMORCAGE PAR LA FRAGMENTATION CELLULAIRE DE LA COUCHE D'OXYDE

Il est essentiellement basé sur la différence entre les propriétés mécaniques de la couche d'oxyde et le matériau sous-jacent -. La couche d'oxyde se fissure sous l'effet des contraintes thermiques et favorise par corrosion locale l'initiation de la fissure de fatigue thermique dans le métal même. ( Fig 8) -.

#### 1-4-1-3 LES INCLUSIONS SUPERFICIELLES -

Souvent plus fragiles que la matrice, elles sont des sites préférentiels pour l'amorçage des fissures car elles supportent mal les déformations (cassure par clivage) et l'interface inclusion-matrice peut subir une séparation qui est une source supplémentaire pour l'amorçage de fissures -.

#### 1-4-1-4 LES CONTRAINTES RESIDUELLES

Leurs importance dans les couches superficielles peut, suivant la sévérité d'usinage, faciliter l'amorçage des fissures de fatigue et choc thermique -.

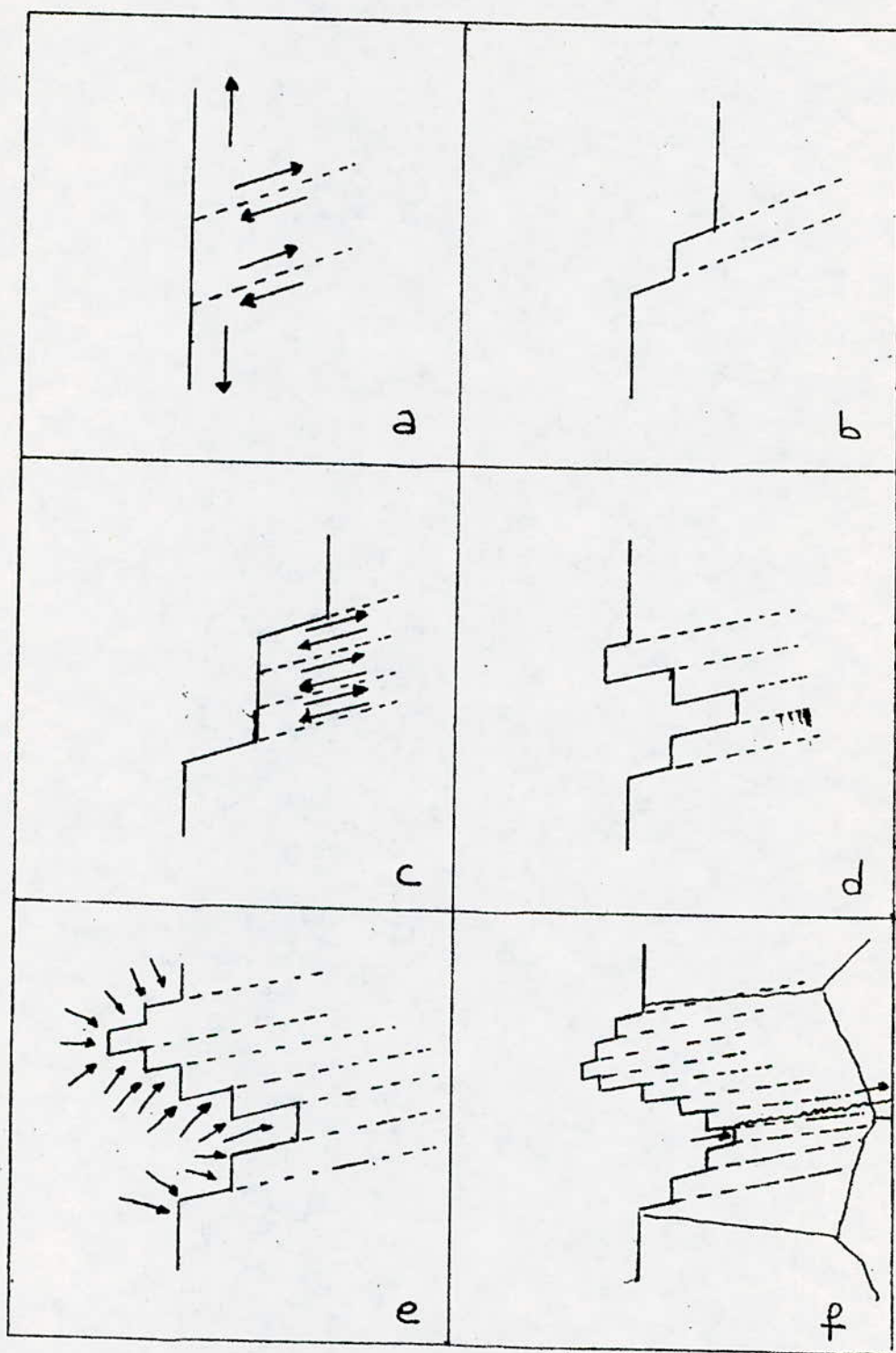


Fig 7 : Amorçage des Fissures sous Contraintes Thermiques Cycliques et action du milieu Corrosif

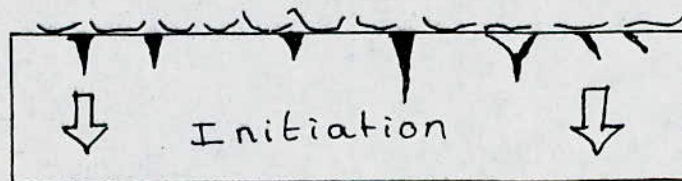
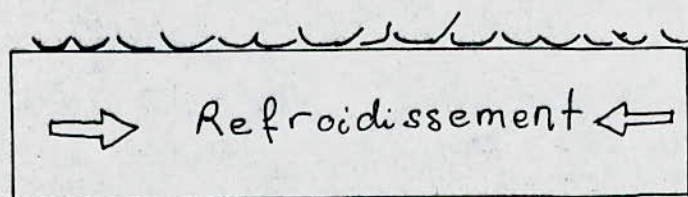
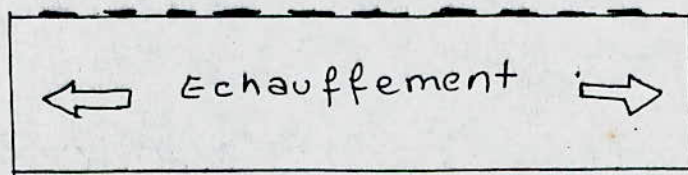


Fig 8 : Amorçage par la fragmentation cellulaire de l'oxyde

#### 1-4-2 LA PROPAGATION DES FISSURES

Au cours de la propagation, la durée de vie est très réduite par la corrosion et par les produits qui en résultent -.

Les produits solides de corrosion peuvent jouer les rôles suivants:

- Créer, par suite de l'existence d'une fissure, un chemin facile pour la pénétration du milieu corrosif jusqu'au fond de la fissure -.
- Empêcher la fermeture des lèvres des fissures pendant la phase de compression -.

Le mode de propagation, peut être intergranulaire ou transgranulaire suivant la nature du cyclage thermique et celle du matériau étudié-. Dans les deux cas, les fissures d'origine thermique privilègient la propagation à travers les phases durcissantes-. Comme ces dernières s'agglomèrent aux joints de grain, on a la prépondérance de l'aspect intergranulaire, ce qui n'explique pas l'absence du caractère transgranulaire car les fissures peuvent subir plusieurs transitions en mode transgranulaire -. La combinaison des deux modes donne naissance à un troisième mode de propagation en cyclage thermique-.

C'est le mode mixte ou "inter-transgranulaire" -



## CHAPITRE 2 : CONCEPTION ET REALISATION D'UNE MACHINE D'ESSAI DE CHOC ET DE FATIGUE THERMIQUE

Pour l'étude du comportement des matériaux sous sollicitations thermiques, nous avons étudié et conçu une machine d'essais qui se distingue par sa simplicité, par sa fiabilité et surtout par sa facilité d'utilisation -.

### 2-1 OBJECTIFS DE LA MACHINE D'ESSAI

La machine a été conçue pour répondre aux objectifs suivants :

- Permettre d'obtenir les conditions de cyclage voulues (Températures maximales et minimales, temps de maintien à ces températures) -.
- Permettre de subir des essais à des éprouvettes, normalisées, de traction, de résilience, ... Afin de pouvoir étudier l'évolution des caractéristiques mécaniques au cours du cyclage thermique -.
- Possibilité d'étudier l'évolution structurale et de l'endommagement au cours du cyclage thermique

### 2-2 PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE D'ESSAI

#### 2-2-1 PRINCIPE

LA MACHINE EST COMPOSEE : ( Fig 9 )

- D'un four tubulaire ① marque ADAMEL , type T.5 qui peut chauffer jusqu'à 1050°C
- D'un bain d'eau ③ situé en dessous du four
- d'un système électromécanique de bielle-manivelle permettant d'obtenir un mouvement oscillatoire verticale - ⑨ ⑩ ⑪
- D'un temporisateur électronique ⑥ Fig ( 10 ) conçu à l'aide de :
  - 1- Circuit intégré NE 555
  - 1- Transistor 2 N 1711
  - 1- Diode 1 N 4004
  - 1- Résistance de 1 K
  - 2- Potentiomètres 100 K Linéaire
  - 2- Capacités de 100 F / 25 V

.../...

Ce temporisateur permet d'avoir un signal carré en fonction du temps à sa sortie ( Fig 10 ) -.

A la sortie du temporisateur, un interrupteur électromagnétique est branché-. Alors lorsque le temporisateur délivre une tension, l'interrupteur est fermé ce qui permet de mettre en fonctionnement le moteur du dispositif électromécanique -.

Lorsque le temporisateur est à l'arrêt, c'est à dire que l'interrupteur électromagnétique est ouvert, un système électrique, fixé sur l'axe du moteur, permet de garder le moteur sous tension jusqu'à fin de course ( Fig ) -.

- Une tige, fixée par sa partie supérieure au système oscillatoire est introduite dans le four et sa partie inférieure est fixée soit un porte échantillon ②, soit un porte éprouvettes-.

Lorsque le moteur ⑨, du système électromécanique fonctionne, la tige se déplace verticalement avec un mouvement oscillatoire à une fréquence constante, qui dépend de la tension fournie au moteur par l'autotransformateur ⑦ /.

- Un compteur détermine le nombre de cycles en fonction du temps ⑧ et enfin la température du four est contrôlée par un thermocouple en chromel-Alumel ⑤ qui relié à une table potentiométrique ④ qui donne courbe  $T = F(t)$  -.

### 2-2-2 FONCTIONNEMENT

Les échantillons (ou les éprouvettes) sont placés dans le porte échantillon, (ou le porte éprouvette), fixé dans la partie inférieure de la tige, sont introduits dans le four dont la température de chauffage est réglée et fixée -.

En réglant la tension d'alimentation du moteur et du système de temporisation, on obtient des mouvements oscillatoires verticaux avec un cyclage déterminé-. Dans ces conditions, les échantillons ou les éprouvettes sont maintenues pendant un temps  $t_1$  à la température maximale (dans le four) puis trempés dans le bain d'eau (température minimale) pendant un temps  $t_2$ , selon la courbe (fig 11) -.

### 2-3- POSSIBILITEES ET LIMITES DE LA MACHINE D'ESSAI

...../....

### 2-3 POSSIBILITEES ET LIMITES DE LA MACHINE D'ESSAI

Ce dispositif permet de varier certains paramètres et de travailler donc dans des conditions différentes -. Ainsi nous pouvons agir sur les paramètres suivants :

- Température du four ( $T_{max}$ ) de 0 à 1200 °C
- Nature du bain liquide ou du milieu de refroidissement (eau - lubrifiant, huile, eau ... )
- Fréquence des oscillations
- Température minimale
- Nature du cyclage (choix de  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  )

### 2-4 CONDITIONS EXPERIMENTALES

Nous avons procédé à l'utilisation de la machine pour étudier le comportement en choc et en fatigue thermique de la fonte grise à graphite sphéroïdal -.

Les Conditions expérimentales adoptées sont :

#### -1- Choc thermique

- Température du four : 700 ° C
- Température du bain d'eau : 20 ° C
- Durée de maintien à haute température ( dans le four ) 10 minutes
- Durée de maintien à basse température (dans le bain d'eau ) environ 5 Secondes -
- Durée d'un cycle : 10 Minutes et 5 Secondes environ

#### -2- Fatigue Thermique

- Température du four : 700 ° C
- Température du bain : 20 ° C
- Durée de maintien dans le four: 68 s
- Durée de maintien dans le bain: 2 s
- Durée d'un cycle : 70 s

Pour déterminer la température de la surface de l'échantillon , un thermocouple en Chromel- Alumel a été soudé à la surface d'un échantillon et a été fixé avec la tige. De cette manière le thermocouple effectue le même mouvement que la tige et permet d'avoir des courbes de chauffage et du refroidissement de la surface de l'échantillon Fig ( 12 . 13 ) -.

Fig 9

machine d'essai  
de fatigue et choc.  
Thermiques.

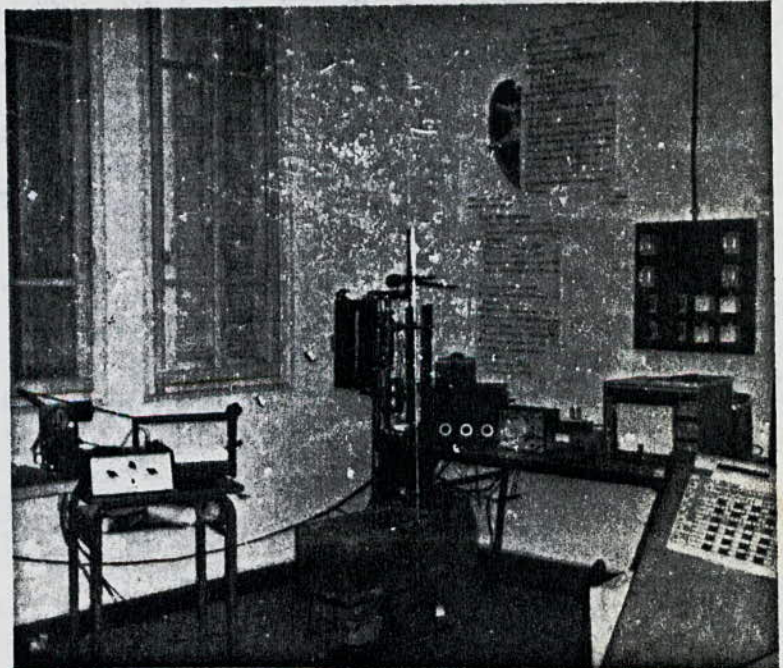
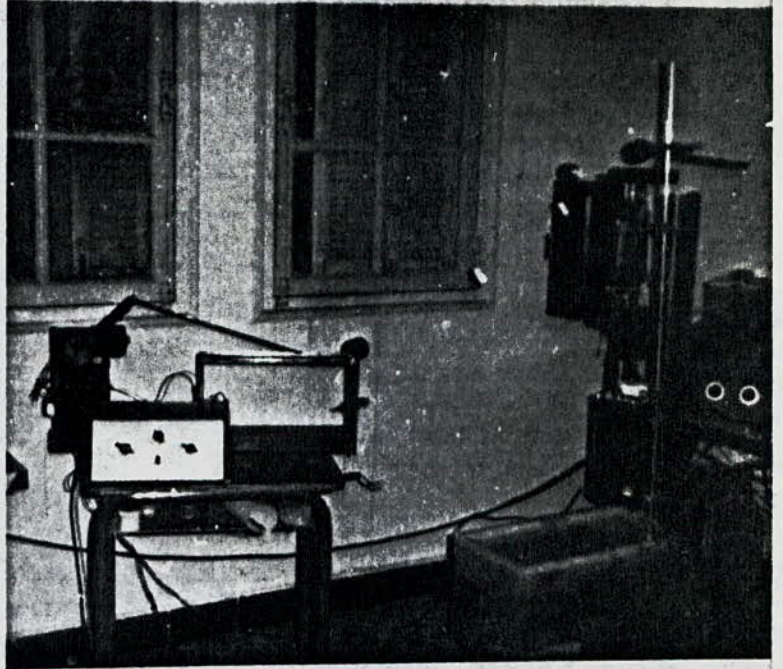
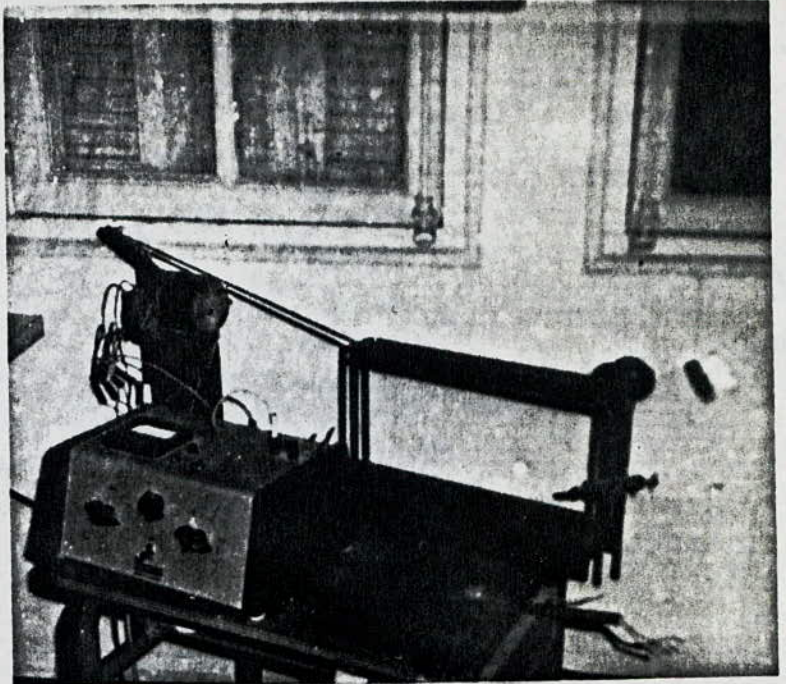


Fig 10 : Schéma électronique du temporisateur

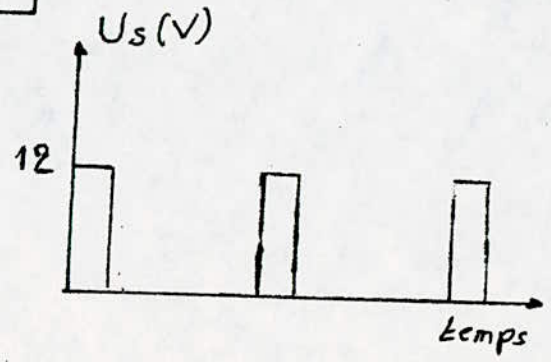
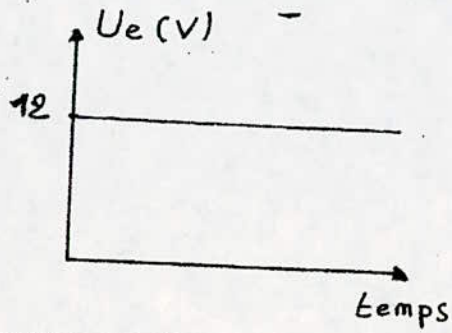
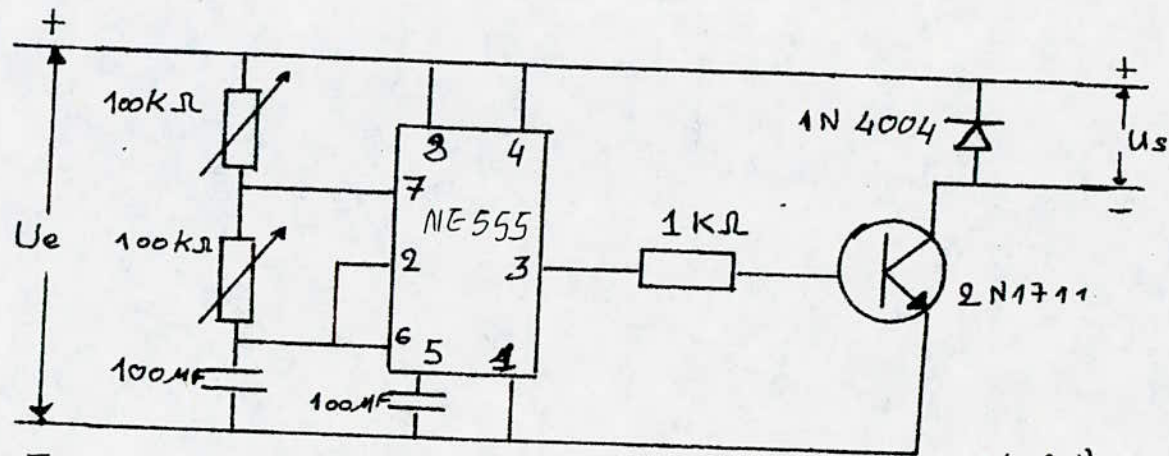
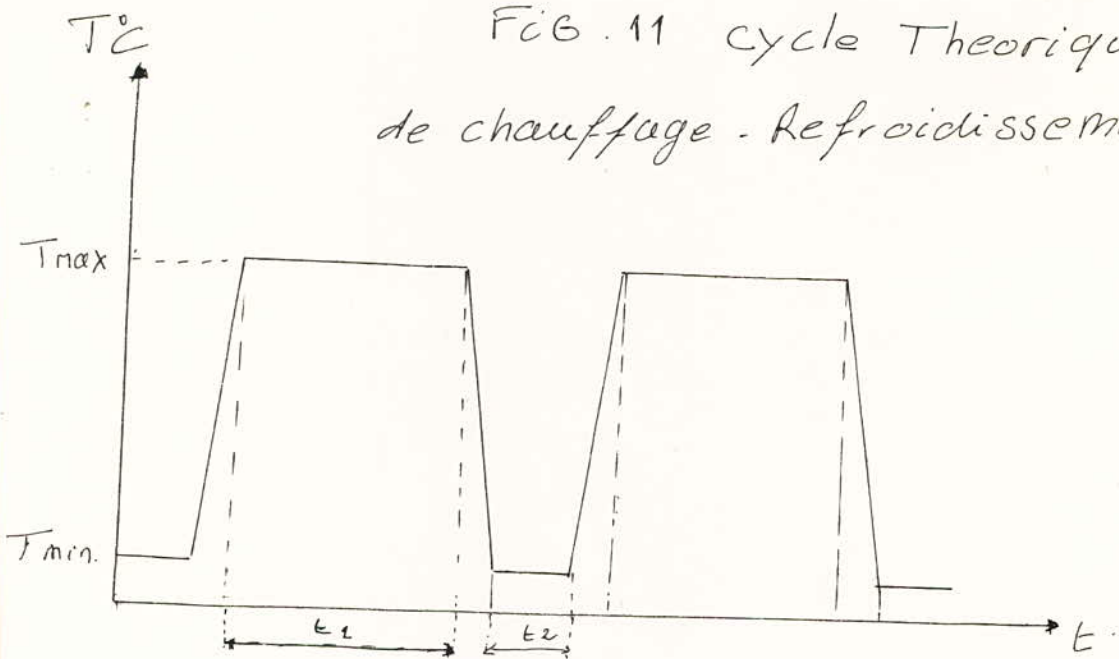


FIG. 11 cycle Theorique.  
de chauffage - Refroidissement



Thermocouple Chromel-Alumel

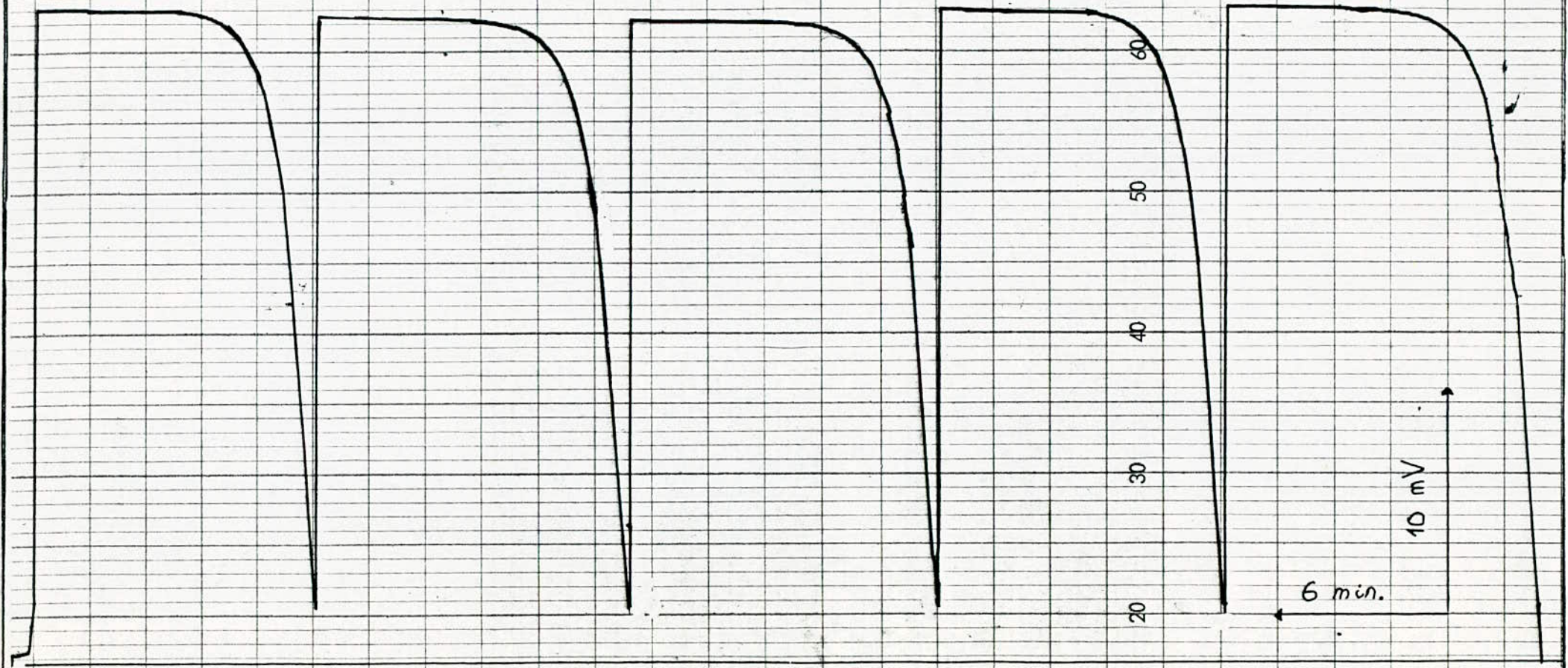
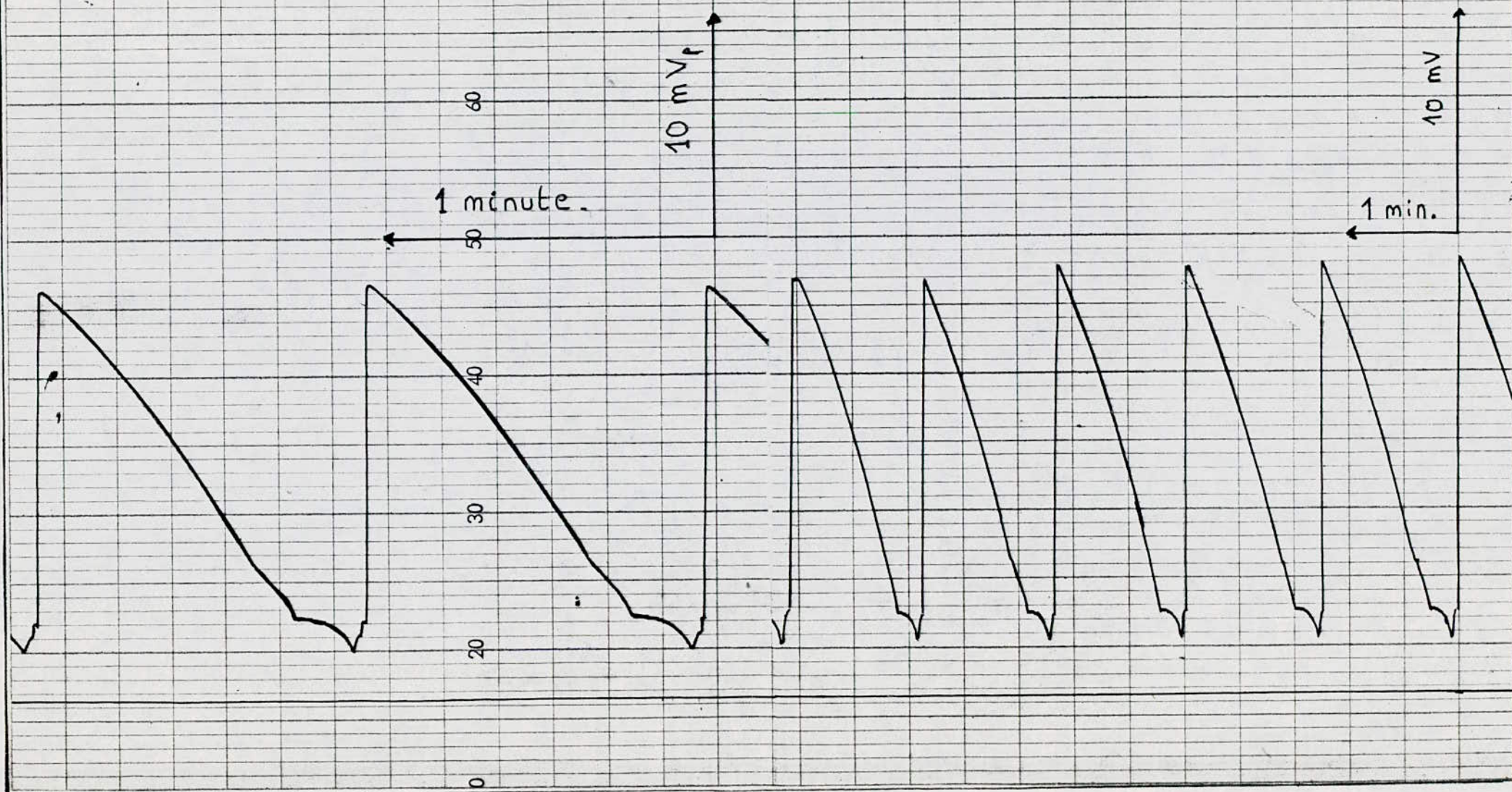


Fig 12 : Courbes Chauffage - Refroidissement et Choc thermique.

Fig 13 ; Courbes Chauffage - Refroidissement  
en Cyclage de Fatigue Thermique.





CHAPITRE 3 : ETUDE DU COMPORTEMENT SOUS SOLLICITATIONS  
THERMIQUES DE LA FONTE GRISE A GRAPHITE  
SPHEROIDAL A NON ALLIEE

3-1 MATERIAU ETUDIE

Afin de tester et d'évaluer la fiabilité du dispositif d'essai de fatigue et de choc thermique, nous avons étudié le comportement en fatigue et en choc thermique de la fonte grise à graphite Spheroidal-. Ce matériau a été élaboré à la fonderie de la Société Nationale des Véhicules Industriels de ROUIBA -.

3-1-1 ELABORATION

La fonte GS Fournie par la fonderie de la S.N.V.I. possède à l'état brute une structure ferritoperlitique avec une prédominance de ferrite -.

L'Elaboration de cette fonte a été faite en plusieurs étapes -.

3-1-1-1 PREPARATION DE LA CHARGE

LA COMPOSITION DE LA CHARGE EST :

- 20 % de la fonte neuve
- 65 % de retours de fonderie
- 15 % d'acier doux

La composition chimique de ce matériaux est donnée dans le tableau N° 1 -.

3-1-1-2 FUSION DE LA CHARGE

Les charges sont introduites dans un four à arc contenant un bain résiduel de la précédente coulée -.

Le bain de la fonte obtenue dans le four à arc est versé dans une poche de transfert pour subir un décrassage du laitier formé à la surface-. Le décrassage s'obtient en introduisant à la surface du bain -.

- du S L a x (silice) lorsque le garnissage est acide -.
- de la chaux lorsque le garnissage est basique -.

.../...

La fonte est transférée dans un four de maintien à induction pour le maintien , l'ajustement ou même la correction de la fonte si l'analyse du bain s'écarte de celle visée -.

### 3-1-1-3 TRAITEMENT DE LA FONTE

La fonte liquide, ajustée, est versée dans une poche de traitement contenant dans sa base un " Sandwich " d'alliages - ferro-silicium-magnesium, pour obtenir la sphéroidisation du graphite -.

Après le traitement de sphéroidisation, on procède au traitement d'inoculation en ajoutant un alliage Le ferro-silicium pour amorcer la graphitisation -.

La composition de la fonte ainsi obtenue est donnée par Le tableau N° 2 -.

### 3-1-2 STRUCTURE MICROGRAPHIQUE

La structure obtenue à l'état brut de la coulée est ferrito-perlitique avec prédominance de la ferrite sous forme d'auvéoles autour du graphite due à la formation du graphite et à son développement au dépend de son voisinage immédiat qui s'appauvrit en carbone -.

Le graphite apparaît sous plusieurs formes: Sphéroidal , pseudo-sphéroidal et parfois déchiqueté-. Le taux de sphéroidisation est d'environ 85 % - (Fig 20.21.22) -.

### 3-1-3 CARACTERISTIQUE MECANQUES

Les caractéristiques mécaniques de l'état brut sont groupés dans Le tableau N° 3 -.

### 3-1-4 TRAITEMENTS THERMIQUES

Les structures étudiées sont : ferritique, perlitique et revenue à 500°C (2 heures ) Les traitements correspondant sont :  
- pour la structure ferritique: un chauffage à 875°C , un maintien de 30 Minutes et un refroidissement dans le four -.

.../...

- Pour la structure perlitique, un chauffage pendant 30 Minutes à 875°C et un refroidissement à l'air calme -.
- Pour la structure revenue un chauffage pendant 30 Minutes à 875°C, suivi d'une trempe à l'huile et enfin un revenu pendant (2 heures à 500°C) -.

Les caractéristiques mécaniques des Structures de traitement thermiques figurent dans le tableau N° 4 -.

Tableau N° 1 : Composition chimique des matériaux de la charge

Matériau	% C	% Si	% Mn	% S
Fonte Neuve F <sub>1</sub>	4,3	0,2	0,01	0,015
Retours	3,4	1,3	0,4	0,015
Acier	0,1	0,2	0,5	

Tableau N° 2 : Composition chimique de La de La Fonte GS. obtenue.

% C	% Si	% Mn	% S	% P	% Mg
3,70	2,53	0,276	0,008	0,027	0,055

Tableau N° 3 : Caractéristiques Mécaniques de L'état brut de coulée de La Fonte GS

$R_m$	$R_{0,2}$	A	HB	E	K
daN/mm <sup>2</sup>	daN/mm <sup>2</sup>	%	daN/mm <sup>2</sup>	GPA	daJ/cm <sup>2</sup>
40,5	29,4	14	195	147	1,61

Tableau N° 4 Caractéristiques Mécaniques des Structures de Traitements  
Thermiques de La Fonte G5 (ferritique, Perlitique, Perlitique et Revenue)

Caractéristiques Structures	R <sub>m</sub>	Re	A	K	HV
	daN/mm <sup>2</sup>	daN/mm <sup>2</sup>	%	daJ/cm <sup>2</sup>	
Ferritique	39	28	15	2,64	167
Perlitoferritique	63	44	5	1,31	232
Revenue	79	60	3	0,875	363

3-2-1 ETUDE DU CHOC TECHNIQUE

Pour le choc thermique, les paramètres du cyclage sont:

- Température maximale (dans le four) :  $700^{\circ}\text{C}$
- Température minimale (dans le bain) :  $20^{\circ}\text{C}$
- Durée d'un cycle: 10 Minutes et 5 Secondes (avec un temps de maintien dans le four de 10 Minutes et un temps de maintien dans le bain de 5 secondes) -
- Refroidissement dans l'eau

Les courbes de variations de la température de la surface de l'échantillon en fonction du temps, obtenues grâce à un thermocouple soudé en un point de la surface de l'échantillon, nous ont permis de déterminer les paramètres suivants : (fig 12)

- $T_{\text{max}} = 700^{\circ}\text{C}$  , Température maximale de la surface atteinte au chauffage
- $T_{\text{min}} = 50^{\circ}\text{C}$  , Température minimale de la surface atteinte au refroidissement
- $t_1 = 5\text{mn}$  , Temps nécessaire pour que la surface soit à la température  $T_{\text{max}}$
- $t_2 = 5\text{mn}$  , Temps au cours duquel la surface à une température constante et égale à  $T_{\text{max}}$
- $t_3 = 5\text{Sec}$  : Temps de refroidissement
- $V_1 = 130^{\circ}\text{C}/\text{min}$  , vitesse moyenne de chauffage de la surface
- $V_2 = 130^{\circ}\text{C}/\text{Sec}$  , vitesse de refroidissement de la surface

Les courbes de cyclage thermique, révèlent une variation de la vitesse de chauffage-. En effet, nous constatons un chauffage rapide pendant les deux premières minutes, puis un chauffage plus lent pendant les trois minutes qui suivent -.

3-2-2 ETUDE DE LA FATIGUE THERMIQUE

Les paramètres du cycle de fatigue adoptés sont :

Pour une température du four de  $700^{\circ}\text{C}$  on a : (fig 13)

- $T_{\text{max}} = 500^{\circ}\text{C}$  : Température maximale de la surface atteinte

au chauffage -.

- $T_{\min} = 60^{\circ}\text{C}$  : température minimale de la surface atteinte au refroidissement
- $T_A = 68\text{Sec}$  : temps de chauffage de la surface
- $T_R = 2\text{Sec}$  : temps de refroidissement de la surface
- $V_A = 6,47^{\circ}\text{C/Sec}$  ; vitesse de chauffage
- $V_R = 220^{\circ}\text{C/Sec}$  ; vitesse de refroidissement

### 3-2-3 ESSAIS MECANQUES

Pour l'étude de l'évolution des caractéristiques mécaniques du matériau étudié lors des cyclages de choc et de fatigue thermique on est amené à faire des essais de traction, de résilience et de microdureté -.

#### 3-2-3-1 ESSAIS DE TRACTION

L'essai consiste à soumettre une éprouvette, Fig ( 14 ) conforme aux dispositions de la norme - AFNOR NF A 32-201, à un effort de traction croissant, dirigé suivant son axe -. Un dispositif mécanique enregistre une courbe qui donne à chaque instant la charge totale  $C$  en fonction de l'allongement de l'éprouvette  $A$ . Nous avons utilisé dans notre étude, une machine universelle de traction ( Traction du TYPE V 5 D.R. ( Fig 16 ) -.

Pour étudier les variations des dimensions de l'éprouvette, au cours de l'essai, nous considérons les grandeurs suivantes :

.../...

- $A (\%) = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$  ; avec  $L_0$  et  $L$ , longueur avant et après essai
- $R = C/S_0$  ; La contrainte conventionnelle  
 $C$  : Etant la charge maximale appliquée  
 $S_0$  : La section initiale

### 3-2-3-2 ESSAIS DE RESILIENCE

L'essai de résilience met en évidence la fragilité dynamique du matériau, qui est d'autant plus grande que le travail nécessaire à la rupture de l'éprouvette est faible -.

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mont-pendule, dans des conditions déterminées, une éprouvette entaillée en U et reposant sur deux appuis -. (Fig 15)

Notre essai a été effectué conformément aux dispositions de la norme AFNOR A.30.156 sur une machine de résilience " CHARPY " type Fig ( 17 ) -.

- Poids du pendule : 23,520 KG
- Rayon du pendule : 0,671 m

La résilience (K) est une grandeur qui varie en sens inverse de la fragilité; elle est exprimée par la relation :

$$K = W / S_0 \quad ( \text{daj/cm}^2 )$$

ou " W " est le travail dépensé pour rompre l'éprouvette et "  $S_0$  " désigne l'aire initiale de la section de l'éprouvette au droit de l'entaille -.

### 3-2-3-3 ESSAI DE MICRODURETE

L'essai de microdureté consiste à mesurer l'aptitude de la résistance à la pénétration d'une phase microscopique ; c'est à dire définir les propriétés à l'intérieur des grains de métal soit de la matrice, soit de ses divers constituants -.

Nos essais de microdureté ont été effectués sur un microduremètre de marque " TESTWELL " Fig ( 18 ) qui permet de déterminer la microdureté VIKERS ( HV ) -.



Les paramètres de l'essai sont :

- Pointe pyramidale en diamant
- Angle au sommet de la pointe pyramidale  $172^{\circ} 30'$
- Charge utilisée 50 G

#### 3-2-4 ANALYSE STRUCTURALE

L'étude de la structure micrographique a été faite par microscopie optique-. La confirmation des observations des structures a été faite par l'essai de microdureté -.

Nous avons utilisé pour l'observation de la structure un microscope métallographique de marque OLYMPUS type VANOX et pour les mesures de microdureté un microduremètre - TESTWEL -

(Fig 19)

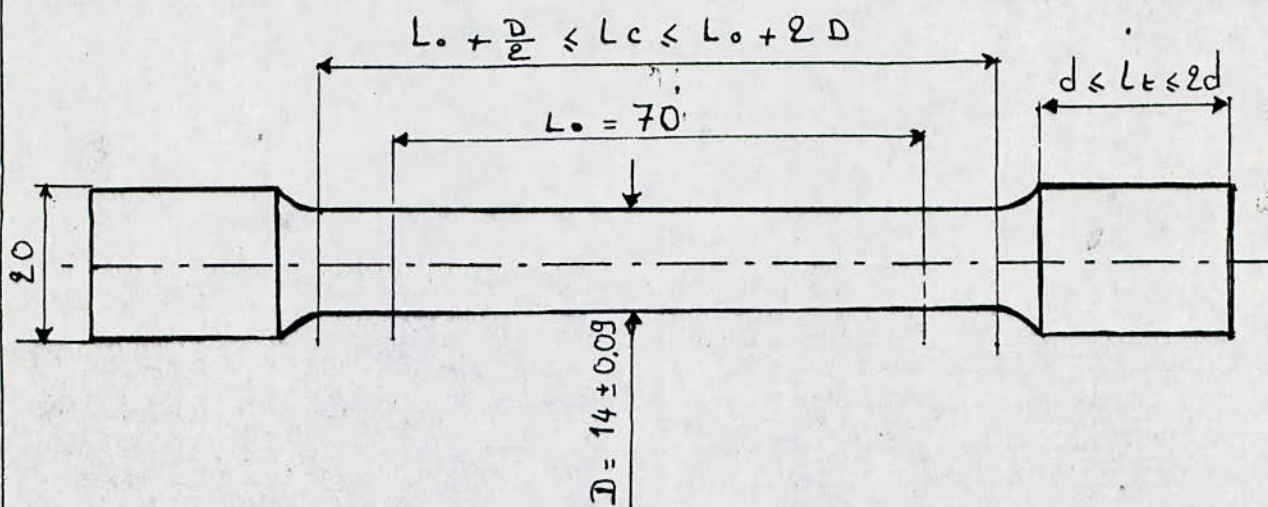


FIG: 14 EPROUVETTE DE TRACTION

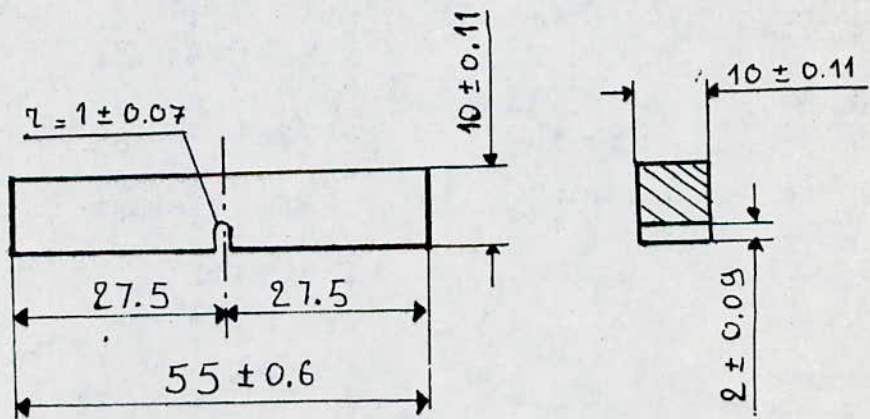


FIG 15 EPROUVETTE DE RESILIENCE

FIG 16 Machine de  
Traction.

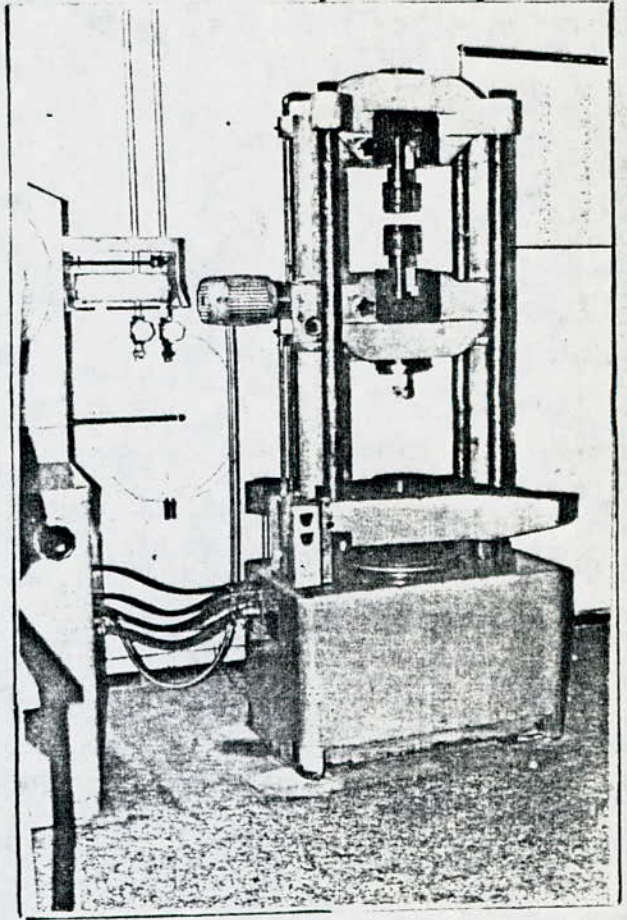


FIG 17 Machine de  
mesure de La  
Résilience.

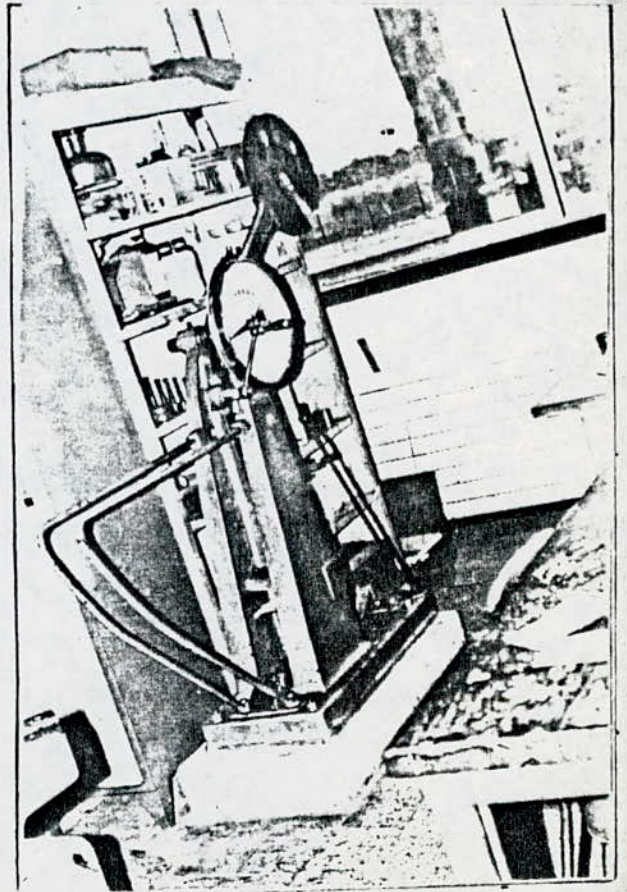


Fig 18  
Microduromètre.  
"TESTWEL"

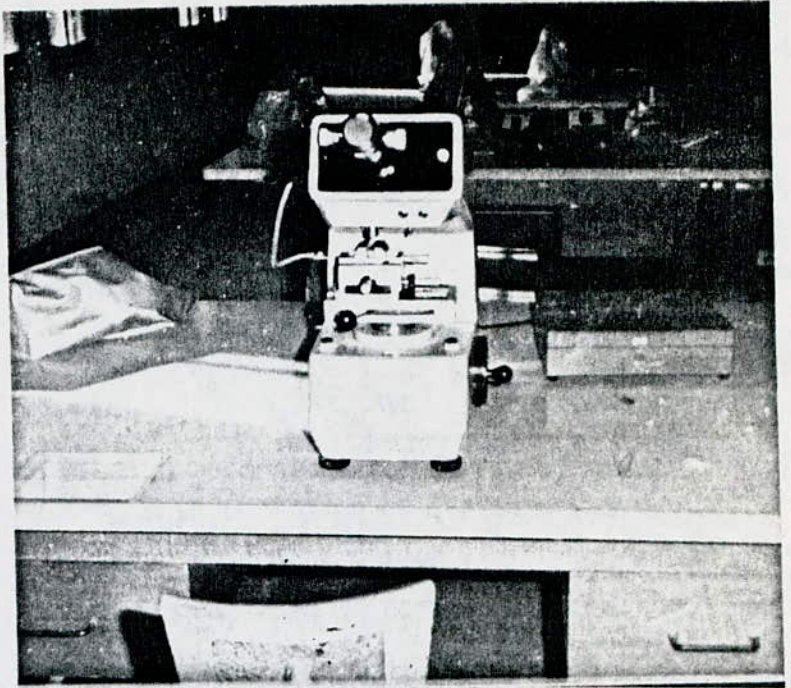
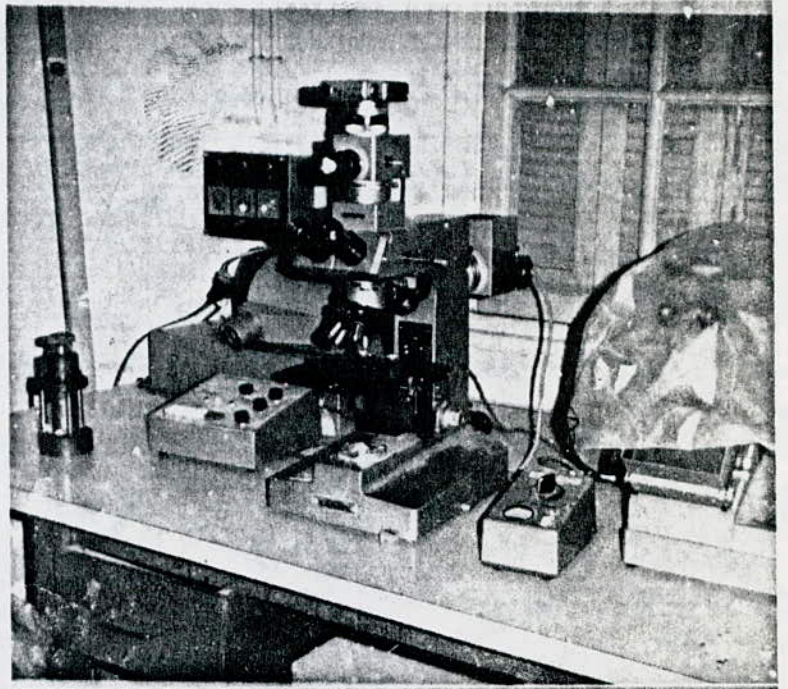


Fig 19  
Microscope  
Métallographique



## CHAPITRE 4 : ETUDE DU COMPORTEMENT SOUS SOLLICITATIONS THERMIQUE DE LA FONTE G.S.

Dans cette étude nous nous intéressons à trois structures de la fonte G.S, il s'agit des structures ferritique ,perlito-ferritique et revenue à 500°C obtenues pour les traitements thermiques définies dans le chapitre 3 -.

### 4-1 ETUDE DU COMPORTEMENT EN CHOC THERMIQUE

#### 4-1-1 EVOLUTION STRUCTURALE

D'une manière générale nous avons constaté une évolution de la structure de la matrice au cours de l'essai de choc dont les conditions sont définies dans le paragraphe 3-2-1 .

#### a- Structure Ferritique :

Au cours des essais de choc une décomposition de la perlite et un processus d'oxydation interne dans les joints de grains et autour du graphite sont observées-. Ces deux phénomènes s'accroissent avec le nombre de cycles -.

La fissuration est très importante, elle se développe au cours du cyclage-. Les fissures connectent les nodules de graphite -.

Leurs tailles peuvent atteindre 100  $\mu$  m -. Nous constatons que lorsque le graphite n'a pas une forme totalement nodulaire et il présente des entailles, il favorise la formation des fissures ( Fig 20 ) -.

#### b-Structure perlitique

On constate qu'au cours du cyclage thermique la perlite se décompose en ferrite et graphite -.

Après 50 Chocs thermiques la structure est quasi ferritique-. Le phénomène d'oxydation interne se développe aux joints de grains de la ferrite -. La fissuration n'a pas été observée ( Fig 21 ) -.

#### c-Structure revenue

L'Analyse des structures montre la décomposition partielle de la cémentite de la structure revenue-. Une oxydation interne dans les fissures le long des joints des grains et autour du graphite est constatée -.

Les fissures qui connectent les nodules de graphite ont une taille plus importante et sont plus larges que celles observées dans la structure ferritique-. Leur taille a été évaluée à 200  $\mu$ m environ. La confirmation de l'existence de la sorbite et des produits de l'oxydation a été faite par des essais de microdureté -. (Fig 22).

#### 4-1-2 EVOLUTION DE LA MICRODURETE

Pour la structure ferritique on constate une légère augmentation de la microdureté au cours des ~~50~~ premiers cycles de choc puis une stabilisation autour d'une valeur moyenne de 271 HV -.

Pour la structure perlitique la microdureté diminue d'abord de façon rapide au cours des ~~15~~ premiers cycles ensuite faiblement au cours des cycles suivants.

La structure revenue se comporte de la même manière que la structure perlitique, après les 25 premiers chocs -. Mais avant les 25 cycles la chute de la microdureté de la structure revenue est plus importante. Si l'on compare les trois structures, on constate que les structures perlitique et revenue subissent une baisse de la microdureté tandis que pour la structure ferritique la microdureté augmente. Le taux de variation de la microdureté est plus élevé pour les 25 premiers cycles pour les trois structures (Fig 23) -.

#### 4-1-4 EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES

L'Etude des courbes des figures ( 24-25 ) montre une chute des caractéristiques mécaniques de résistance (  $R_m$  et  $R_e$  ) des structures perlito-ferritique et revenue -. De même une augmentation de l'allongement de ces deux structures est observée ( Fig 26 ) pour la structure ferritique c'est le comportement inverse qui se produit : une chute de l'allongement et une augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique ( Fig 24-25-26 ). Enfin pour les trois structures la résilience subit un affaiblissement avec approximativement la même vitesse ( Fig 27 ) -.

### 4-2 ETUDE DU COMPORTEMENT EN FATIGUE THERMIQUE

#### 4-2-1 EVOLUTION STRUCTURALE

##### a - Structure Ferritique

Au cours du cyclage de fatigue thermique; la structure devient de plus en plus ferritique -. Après 100 cycles elle est quasi ferritique -. L'oxydation externe se manifeste dès le début de l'essai, elle se

répartie sur toute la surface (Fig 28-a-b) -.

A 500 cycles le phénomène d'oxydation interne est observé cette oxydation se manifeste surtout autour du graphite -. LA fissuration apparaît dans les joints de grains, elle est associée à l'oxydation interne ce phénomène s'accroît au cours des cycles suivants :

A 20 000 Cycles, l'oxydation interne et la fissuration intergranulaire sont très développées ( Fig 28 ) -.

#### b- Structure Perlitique

L'Etude des structures non attaquées et attaquées au nital (4%) montre qu'à 100 cycles la fissuration ne se manifeste pas encore (Fig 29-a) La structure demeure entièrement perlitique (Fig 29-b) .

A 750 Cycles, l'oxydation interne est déjà importante, surtout au niveau du graphite, la fissuration ne se manifeste pas encore ( Fig 29-c )

A 1500 cycles, l'oxydation interne intervient, la perlite se transforme partiellement en ferrite et graphite et la perlite non transformée se localise essentiellement dans les joints de la ferrite (Fig 29-d)

Après 20 000 cycles, la perlite disparaît complètement, l'oxydation interne est précausée autour du graphite et dans les joints de la ferrite la fissuration est importante et est du type intergranulaire (Fig 29-e)

#### c- Structure revenue

La structure de revenue se caractérise par sa faible résistance à l'oxydation puisque on observe le développement important de ce phénomène au cours du cyclage -.

La fissuration est rapide, les fissures ont une taille très grande comparées à celles observées dans les deux structures précédente et elles connectent les nodules de graphite -.

La structure revenue se transforme par la décomposition de la cémentite (Fig 30 )

Sur la Figure ( 30 f . ) on constate un réseau de petites fissures autour du graphite et cela pour 2000 cycles, pour 20000 cycles la structure est totalement ferritique, l'oxydation intergranulaire <sup>est</sup> très intense et les fissures sont observées avec un très faible grossissement (Fig 30 g h).

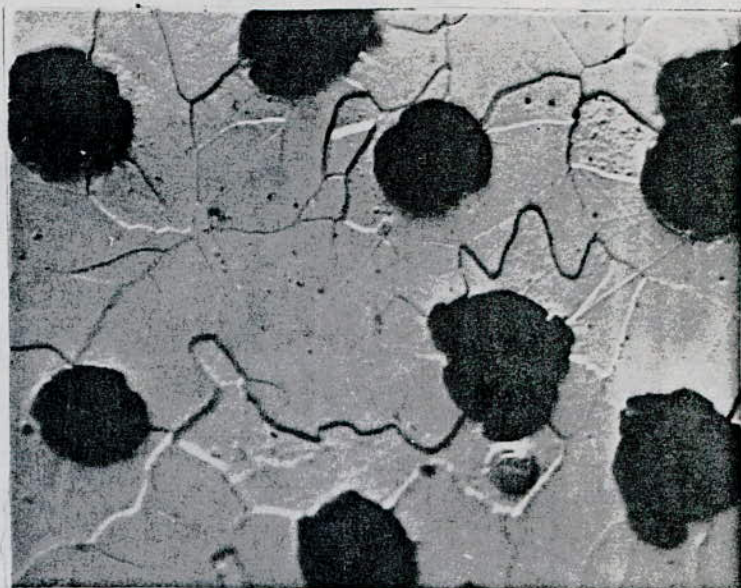
#### 4-2-2 EVOLUTION DE LA MICRODURETE

Pour la structure ferritique la microdureté reste approximativement constante autour d'une valeur moyenne de 160 HV au cours du cyclage thermique. Celle des structures perlitique et revenue subit une augmentation brutale au cours des 250 premiers cycles pour diminuer

a. Sans choc thermique

X 500

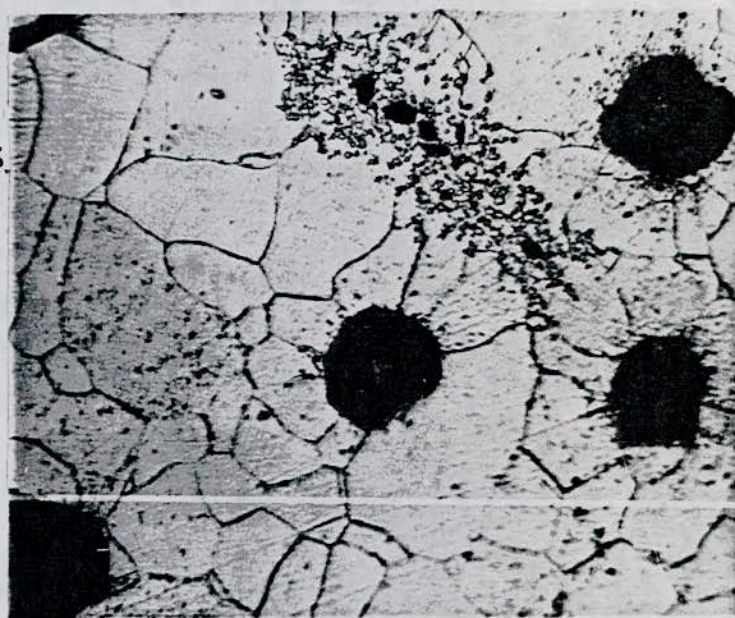
(attaque : Nital 4%)



b. 50 Chocs thermiques

X 500

(attaque : Nital 4%)



c. 100 Chocs Thermiques

X 200

(attaque : Nital 4%)



Fig 20 : Evolution Structurale lors des Chocs Thermiques de La Structure Ferritique de La Fonte G.S.



a. Sans Chocs thermiques.

X 500

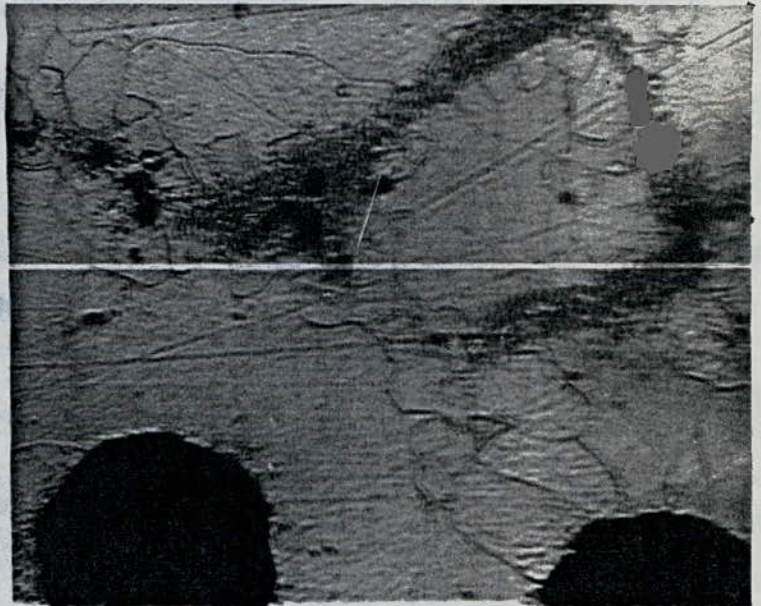
(attaque : Nitral 4%)



b. 50 chocs thermiques

X 500

(attaque : Nitral 4%)



c. 100 chocs thermiques.

X 500

(attaque : Nitral 4%)

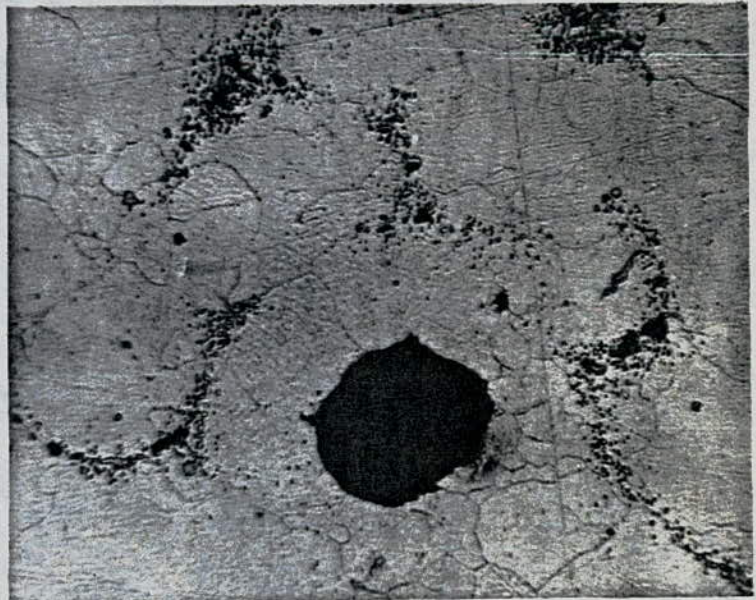
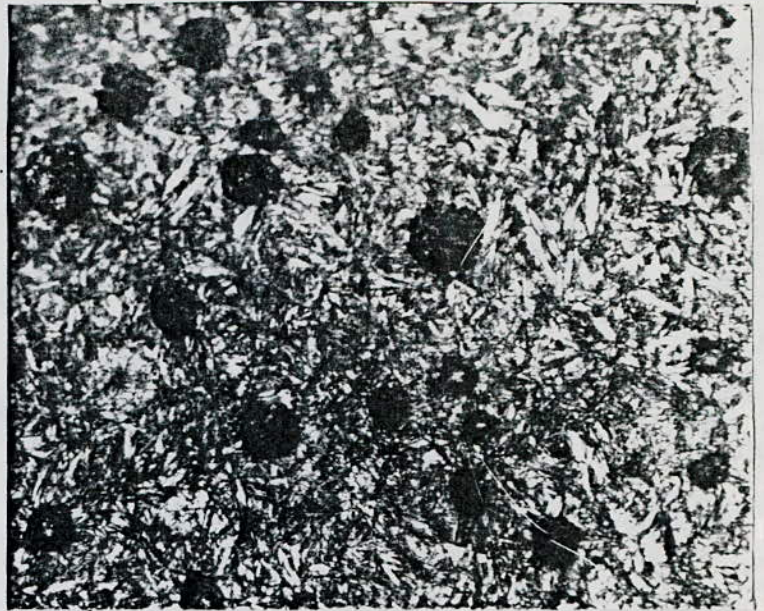


Fig: 2A : Evolution Structurale Lors des chocs Thermiques de La Structure Perlitique de La Fonte G.S.

a. Sans Choc thermique

X 200

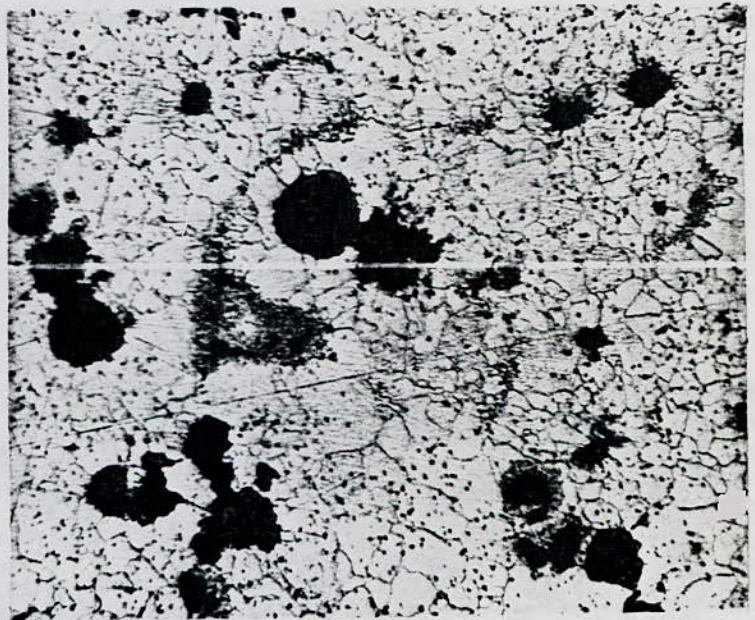
(attaque : Nital 4%)



b. 50 chocs thermiques

X 200

(attaque Nital 4%)



c. 100 chocs thermiques

X 500

(attaque Nital 4%)

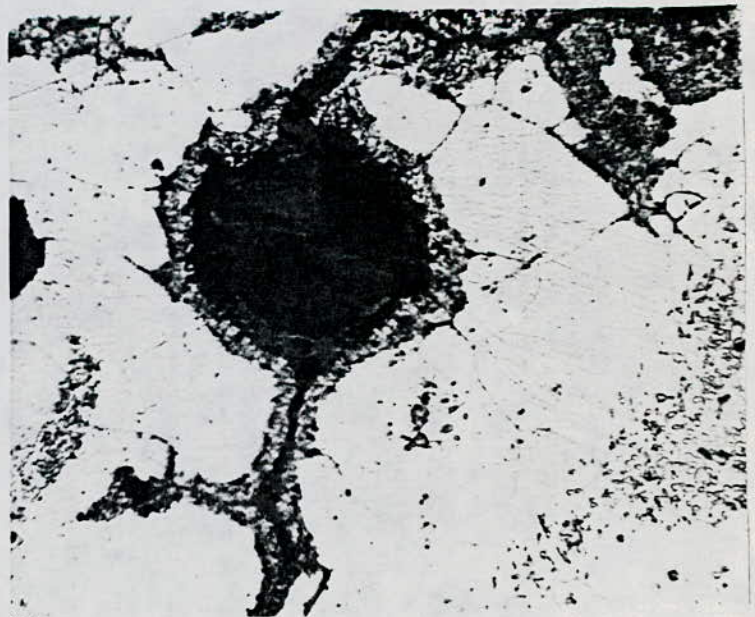


Fig. 99 : Evolution structurale Lors des chocs thermiques de la structure Revenue de la Fonte G.S.

Tableau N° 5 Evolution des Caracteristiques Mécanique de La Fonte Bs Ferritique, Perlitique et Revenu sous choc thermique.

Nombre de choc thermique		0	25	50	75	100
<u>Ferritique</u>	Rm (daN/mm <sup>2</sup> )	39	45	45	41	43
	Re (daN/mm <sup>2</sup> )	28	34	33	29	32
	A (%)	17	26	21	21	20
	K (daJ/cm <sup>2</sup> )	2,64	2,7	2,5	1,95	1,5
	M HV	167	267	272	271	272
<u>Perlitique</u>	Rm (daN/mm <sup>2</sup> )	55	46	45	43	44
	Re (daN/mm <sup>2</sup> )	38	34	34	32	32
	A (%)	5	17	16	16	16
	K (daJ/cm <sup>2</sup> )	1,31	2,37	2,20	1,85	1,675
	M HV	267	249	241	231	230
<u>Revenu</u>	Rm (daN/mm <sup>2</sup> )	79	48	46	46	45
	Re (daN/mm <sup>2</sup> )	60	40	35	35	34
	A (%)	3	7	11	9	8
	K (daJ/cm <sup>2</sup> )	0,875	1,25	0,8	0,75	0,55
	M HV	360	245	232	232	231

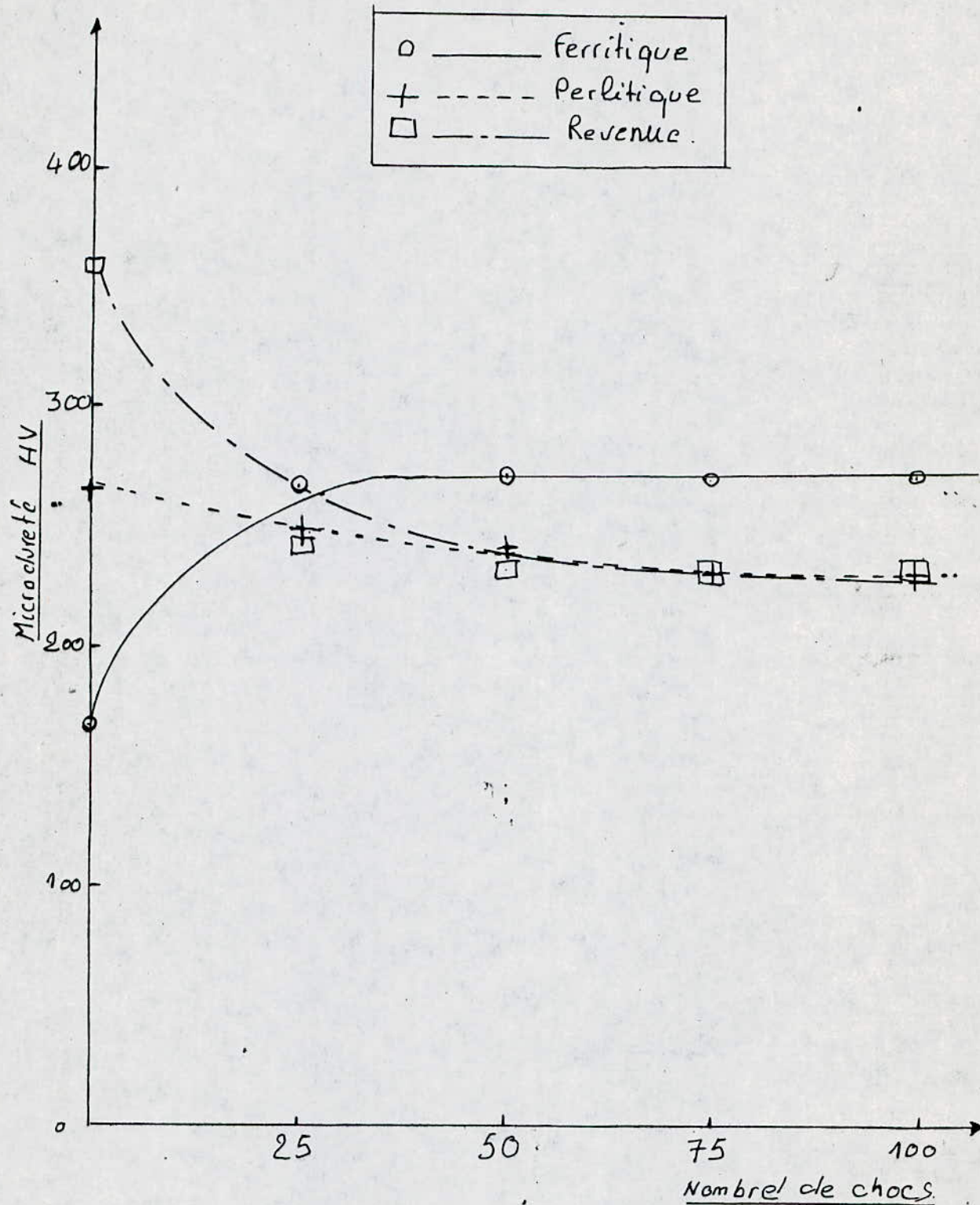


Fig 23 : Evolution de la Microdureté en fonction du nombre de cycles de chocs thermiques des Structures Ferritique, Perlitique et Revenue de la Fonte GS.

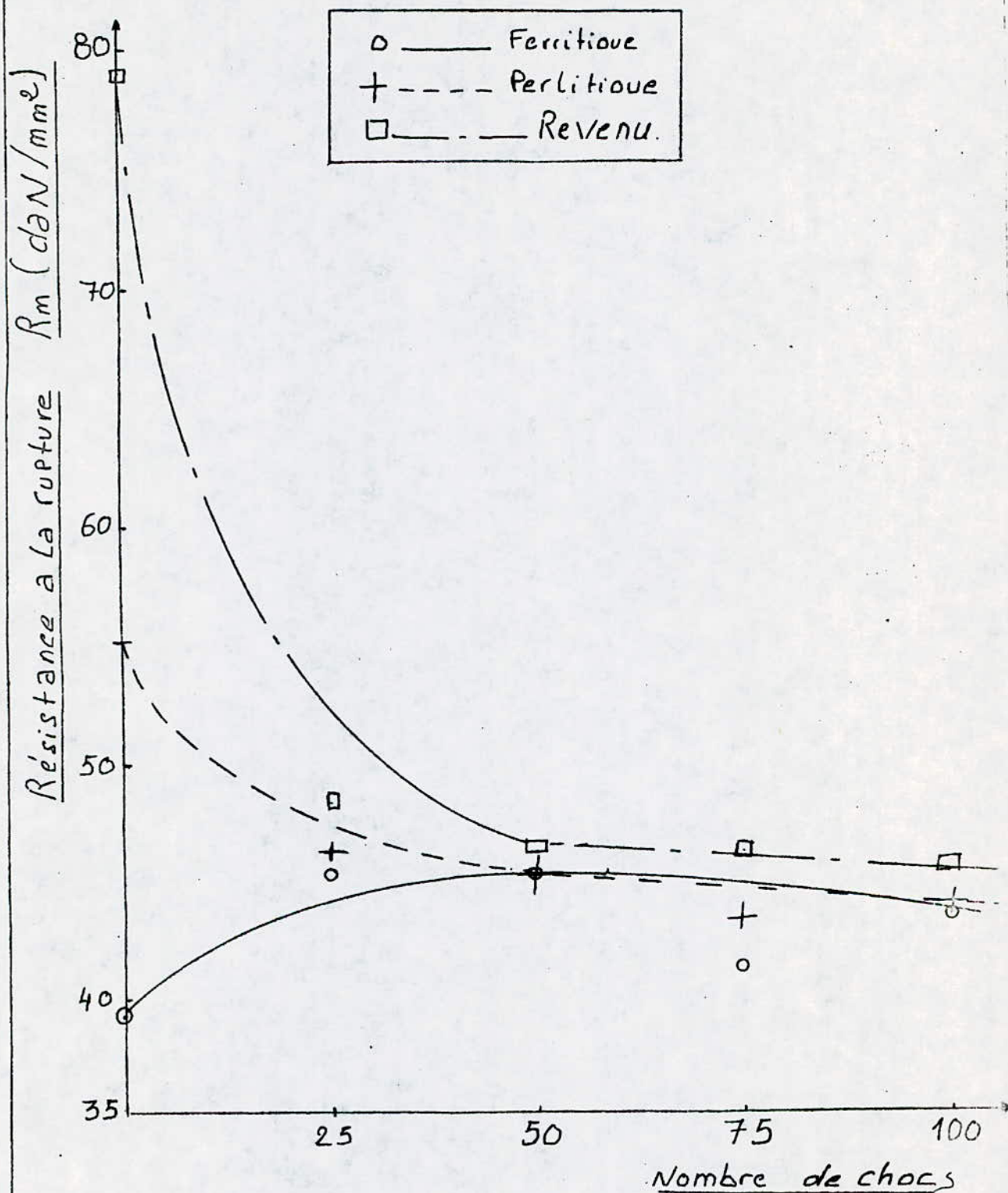


FIG: 94

Evolution de la Résistance à la rupture  
 en fonction du nombre de chocs thermiques  
 pour les structures ferritique, perlitique  
 et Revenu de la Fonte G.S.

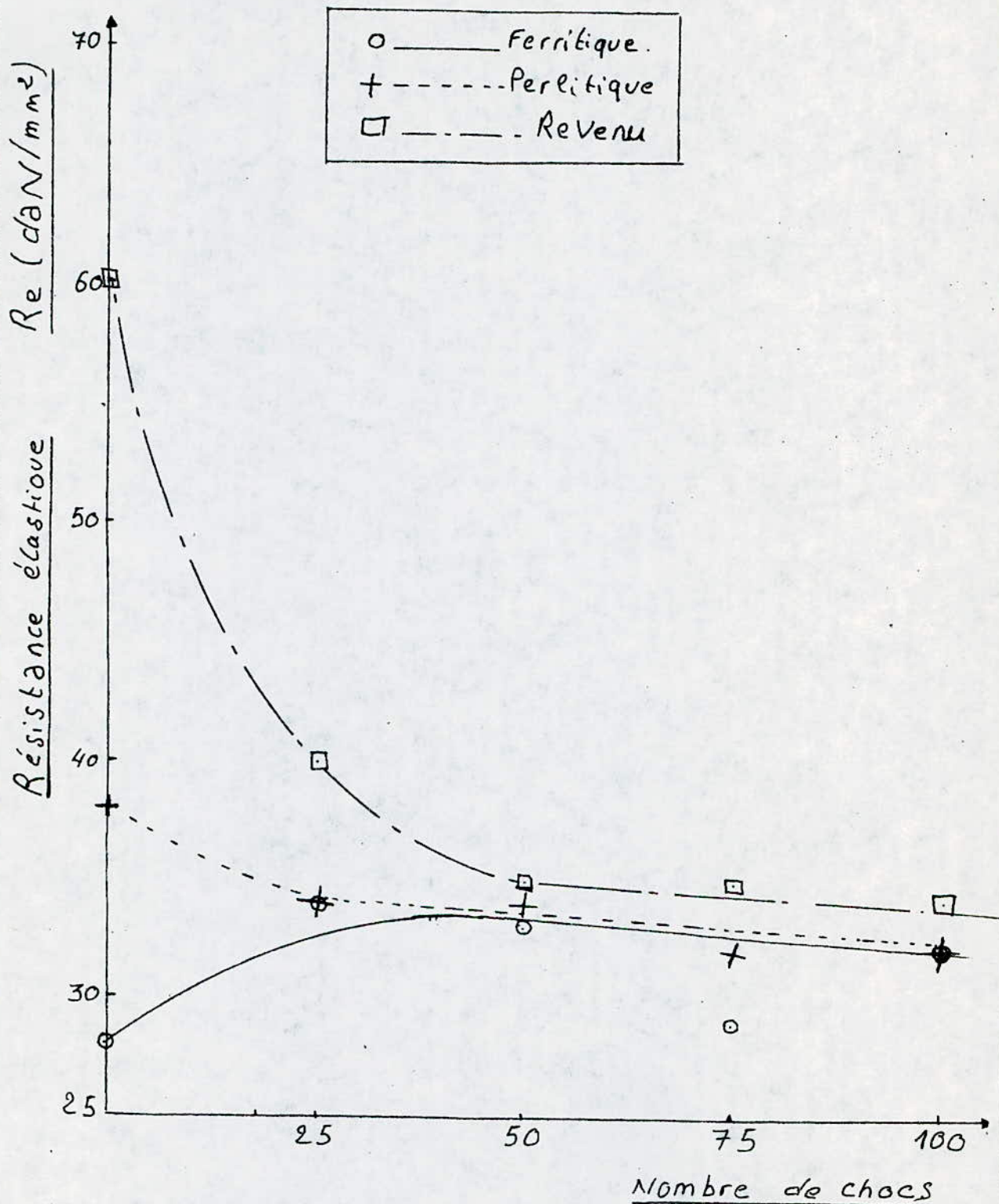


FIG: 25 Evolution de la Résistance à la Limite Élastique en Fonction du nombre de chocs thermiques des Structures Ferritique, Perlitique et Revenu de la Fonte GS

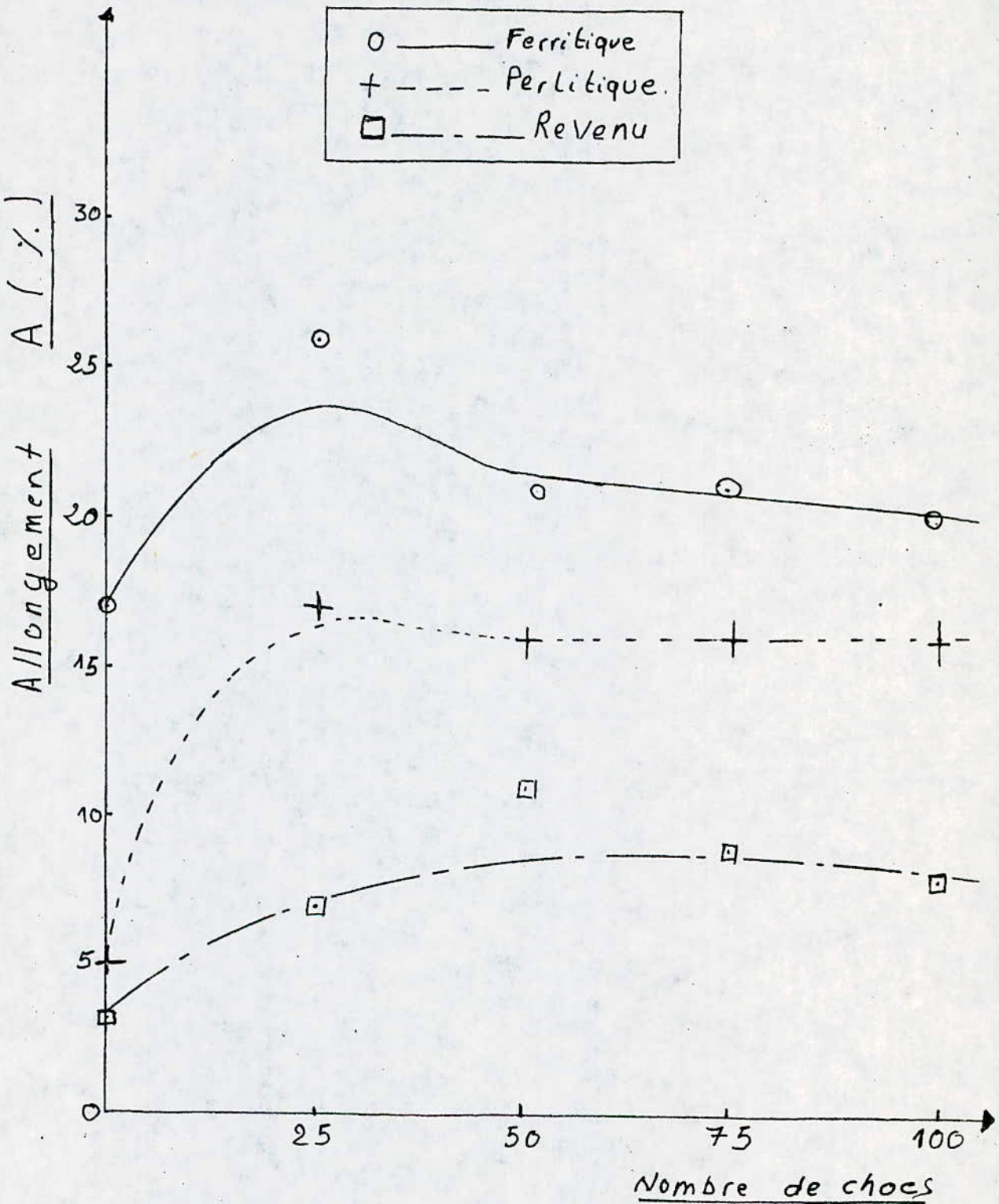


FIG: 26 Evolution de L'Allongement a la rupture en Fonction du Nombre de chocs thermiques Pour Les structures Ferritique, Perlitique et Revenue de la fonte G.S

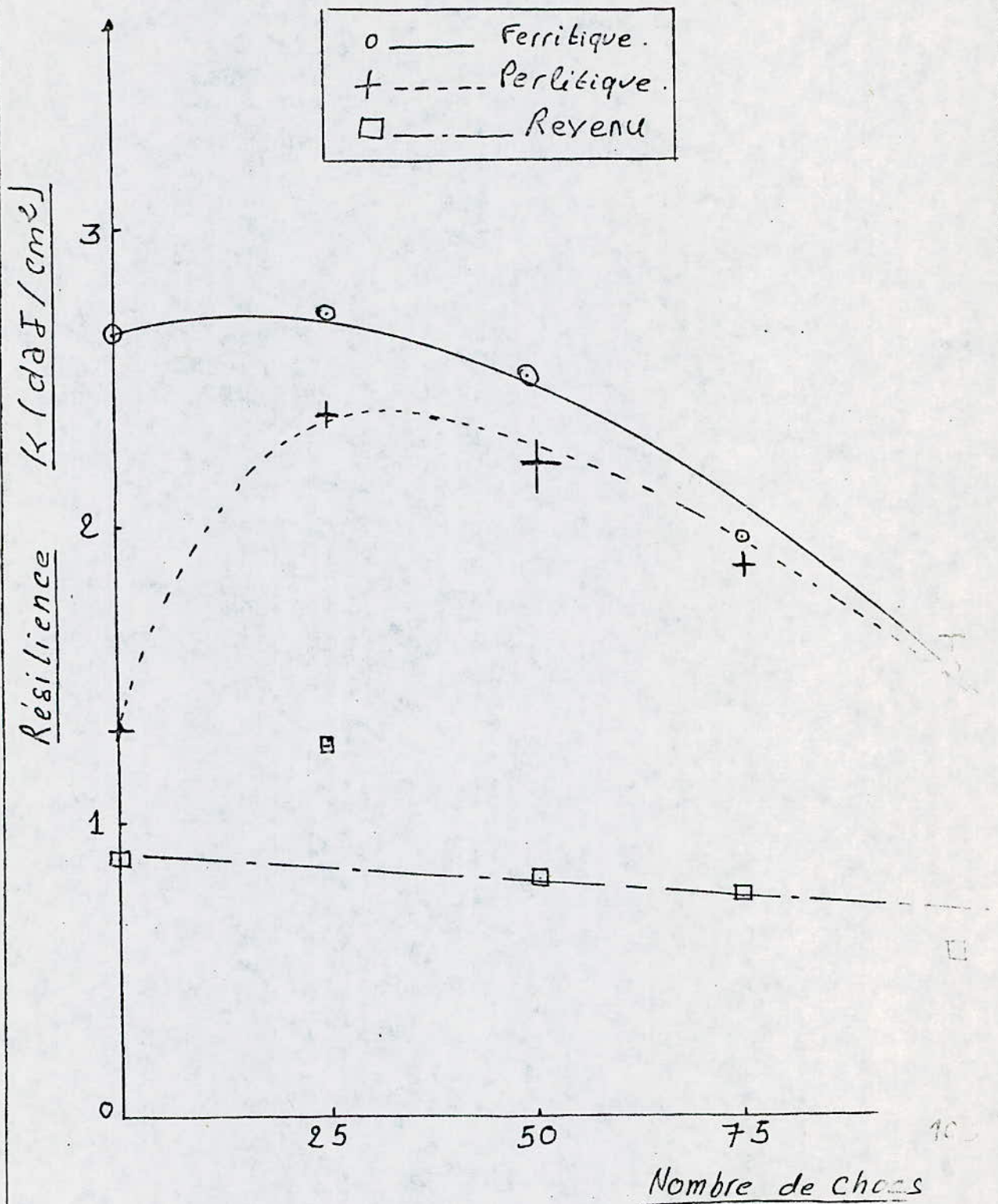


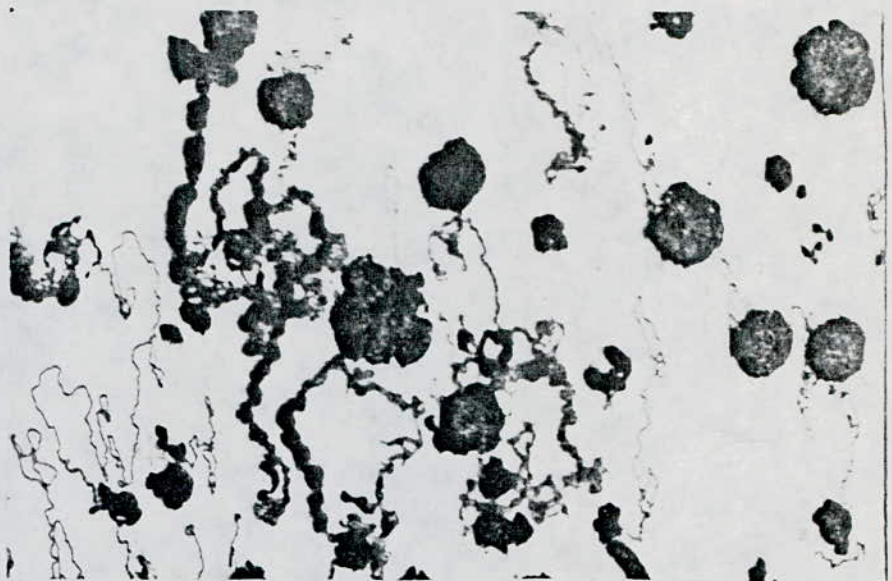
Fig: 27 Evolution de La résilience en fonction  
 du nombre de chocs thermiques des structures  
 Ferritique Perlitique et Revenu de la  
 Fonte G.S.



a. 100 cycles de  
Fatigue Thermique

X 200

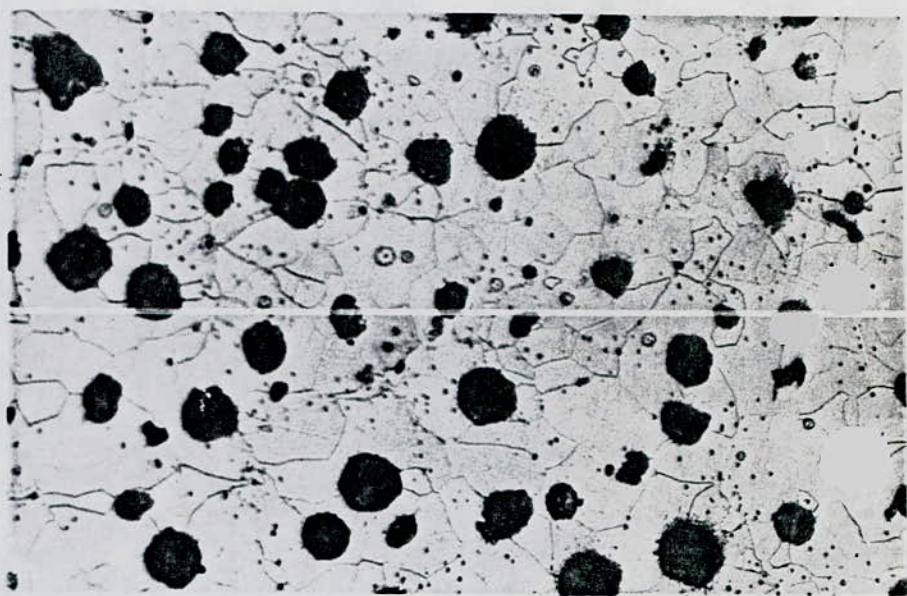
(Sans attaque)



b. 100 cycles de  
Fatigue Thermique

X 200

(Attaque Ni<sub>2</sub>/4%)



c. 500 cycles de  
Fatigue Thermique

X 500

(Sans attaque)

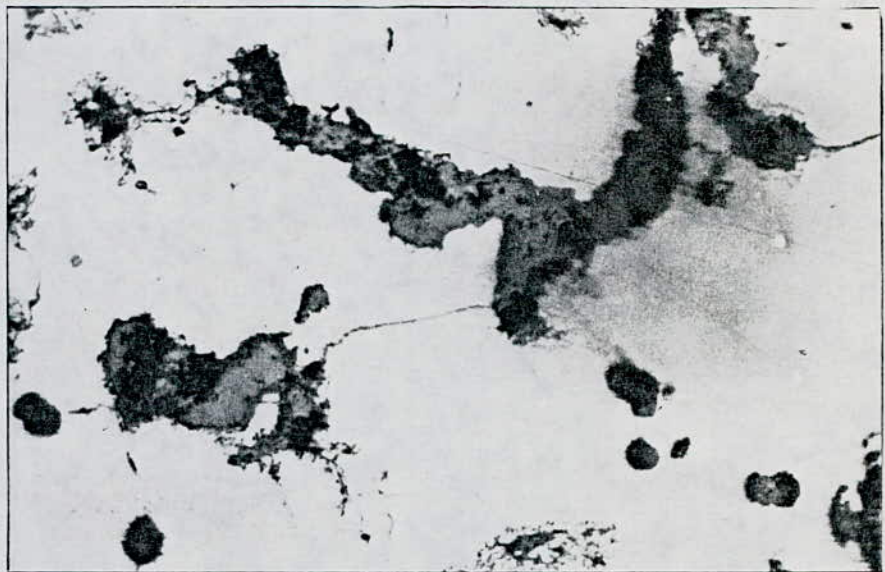
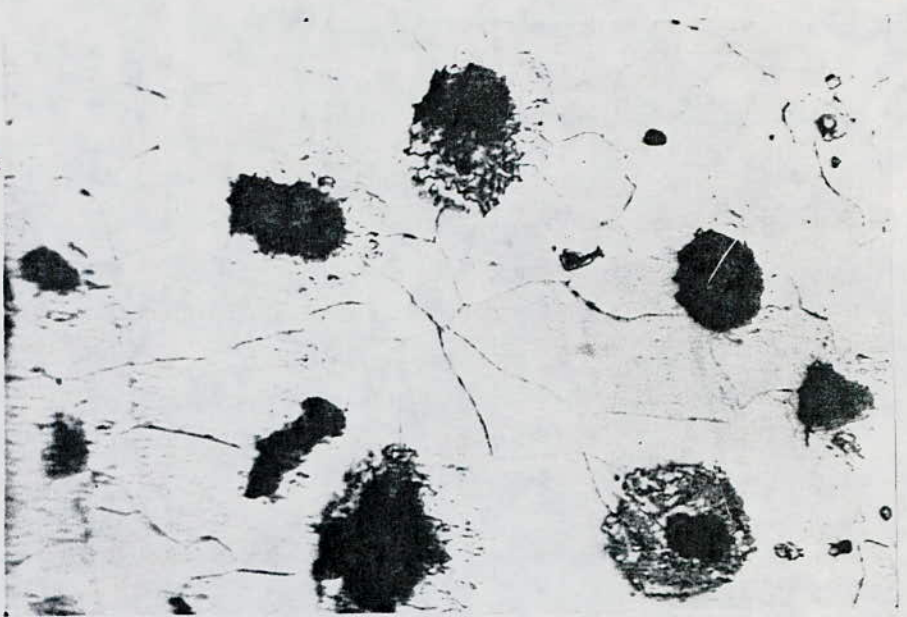


Fig 28 : Evolution structurale au cours du cyclage de fatigue thermique de la structure Ferritique de la fonte G.S.

d. 500 cycles de  
Fatigue thermique

X 500

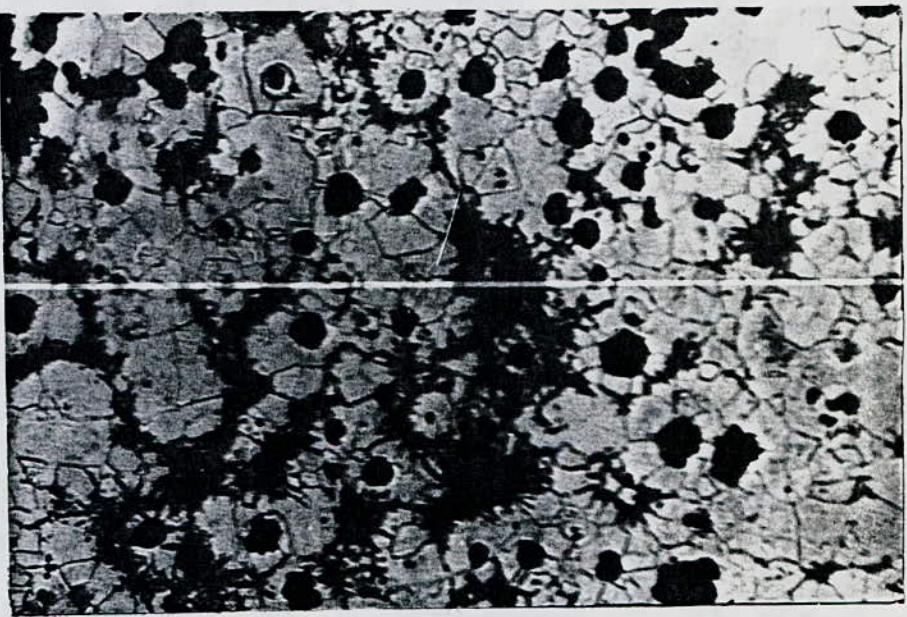
(attaque Nital 4%)



e. 1500 cycles de  
Fatigue thermique

X 100

(attaque Nital P)



f. 2000 cycles de  
Fatigue thermique

X 100

(attaque Nital)

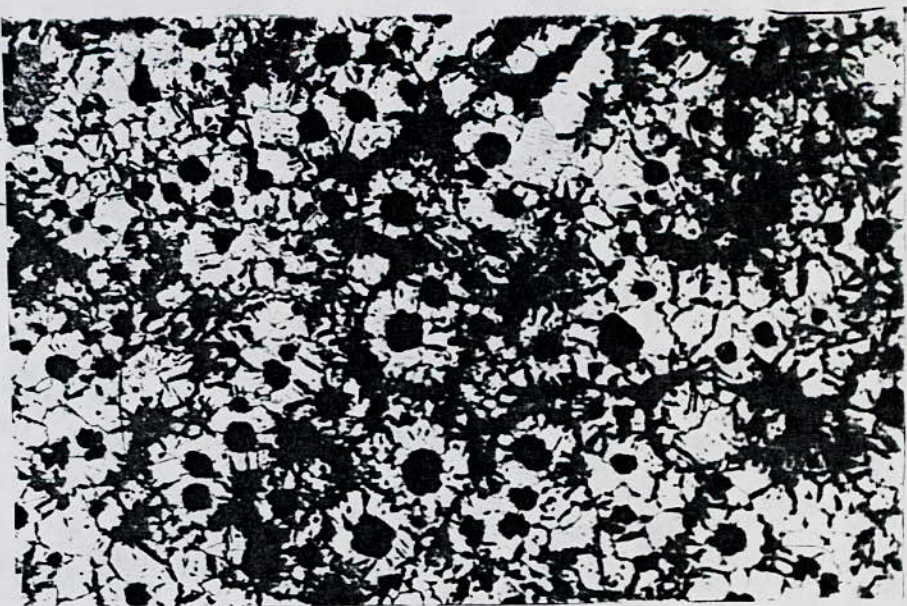
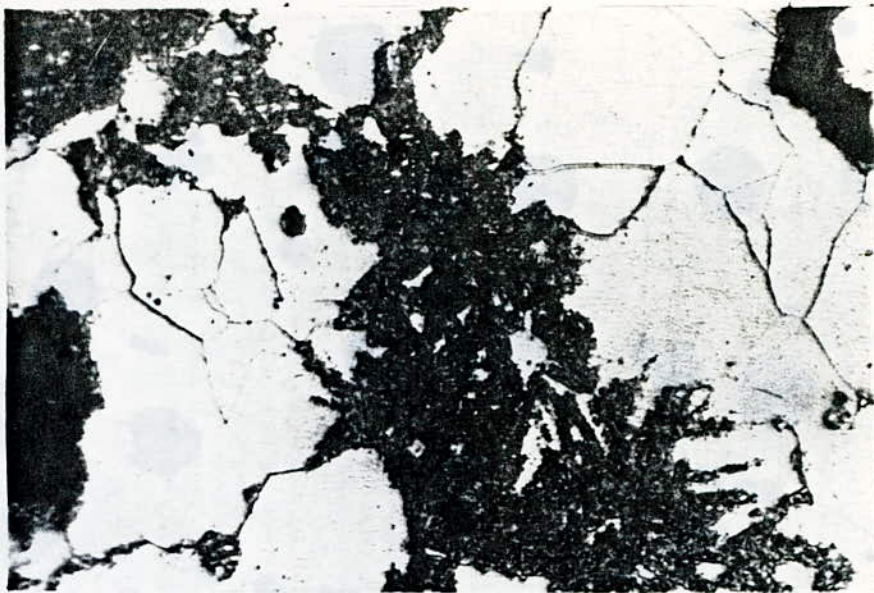


Fig 28 suite: Evolution structurale au cours du cyclage de fatigue thermique de la structure Ferritique de la Fonte G.S.

g. 2000 cycles de  
Fatigue thermique

X 500  
(attaque : Nital)



h. 20 000 cycles  
de fatigue thermique

X 100  
(sans attaque)



i. 20 000 cycles  
de fatigue thermique

X 200  
(attaque nital.)

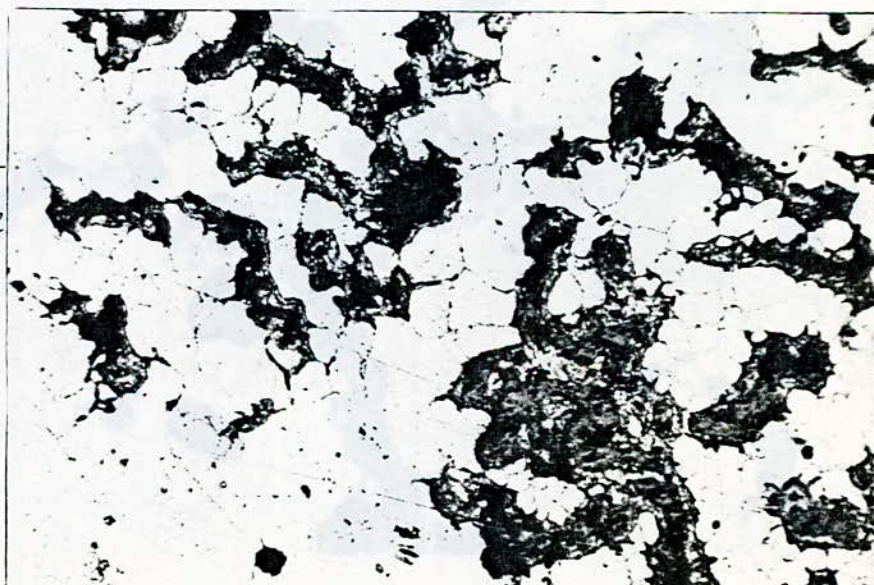


Fig 28 suite Evolution structurale au cours du cyclage  
de Fatigue thermique de la structure Ferritique  
de la Fonte G.S

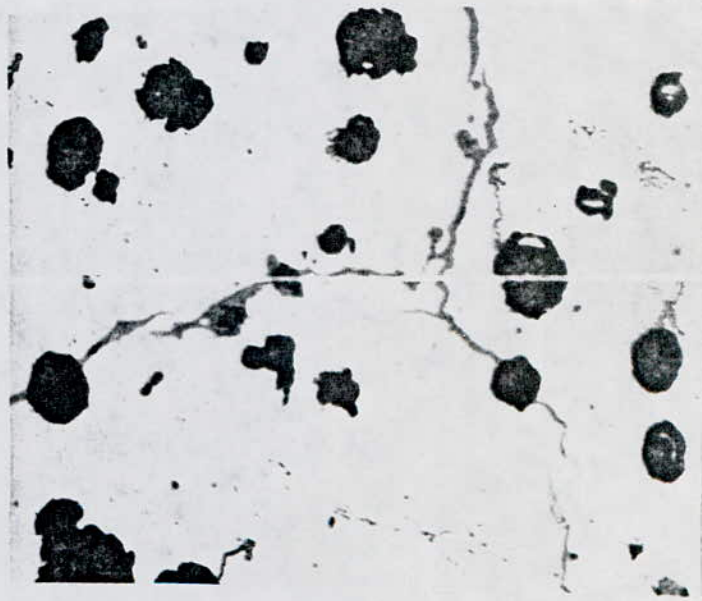
a. 100 cycles de  
fatigue thermique.

X 500  
(attaque Nital)



b. 250 cycles de  
fatigue thermique.

X 200  
(sans attaque)



c. 750 cycles de  
fatigue thermique

X 500  
(sans attaque)

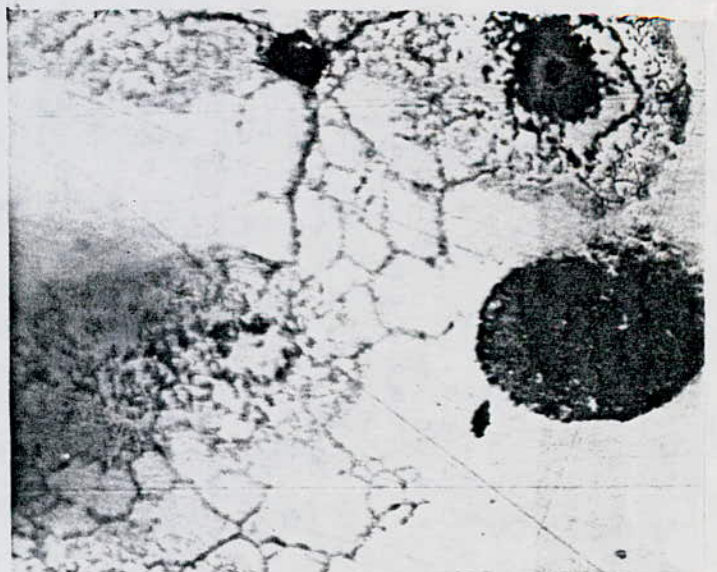


Fig 30 : Evolution structurale au cours du cyclage de fatigue thermique de la structure Revenue de la fonte GS.

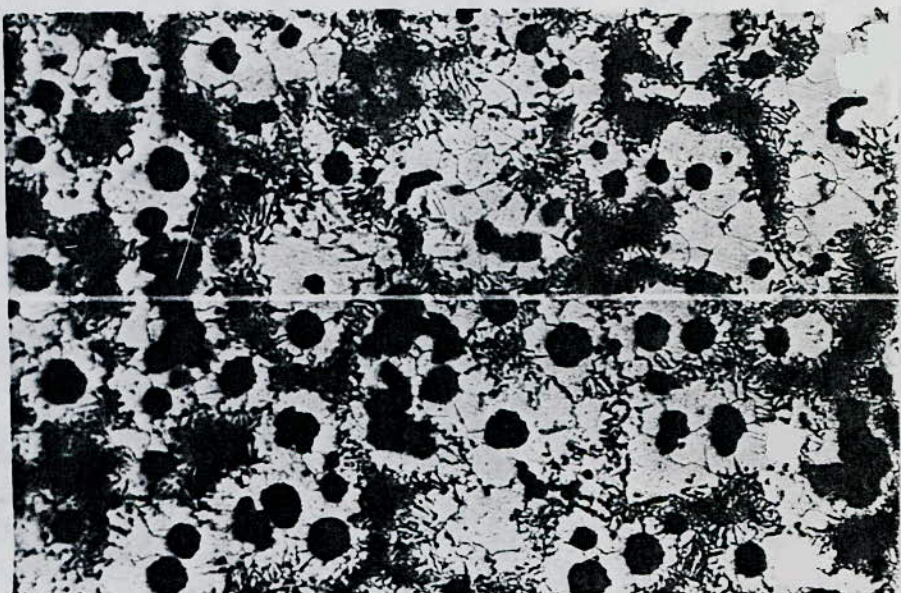
cl. 1500 cycles  
de fatigue thermique

X 500  
(attaque Nitel)



e. 2000 cycles  
de fatigue thermique

X 100  
(attaque Nitel)



f. 2000 cycles  
de fatigue thermique

X 500  
(sans attaque)

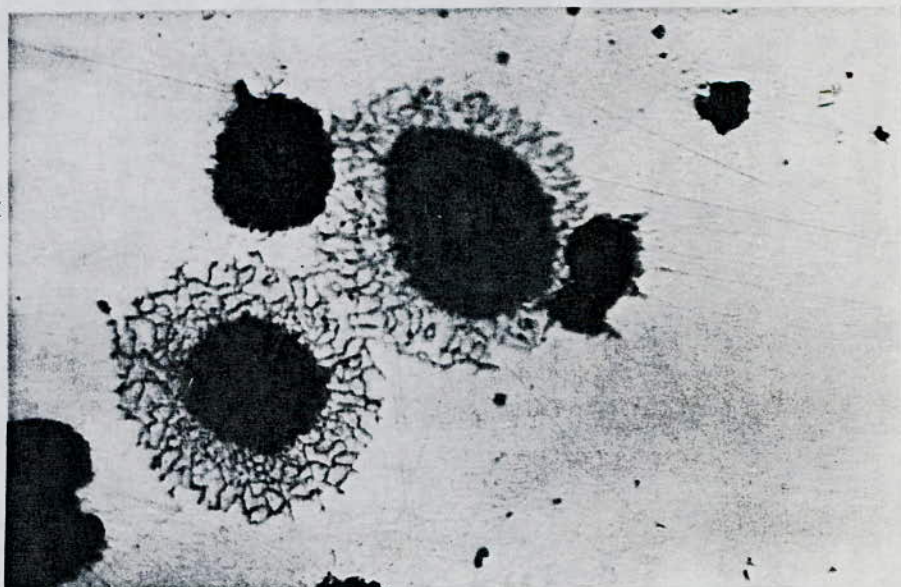


Fig 30 suite: Evolution structurale au cours de cyclage de fatigue thermique de la structure Revenue de la fonte G.S

8.20000  
cycles de  
fatigue thermique

X 100  
(sans attaque)



8.20000  
cycles de  
fatigue  
thermique

X 500  
(attaque: Nital)

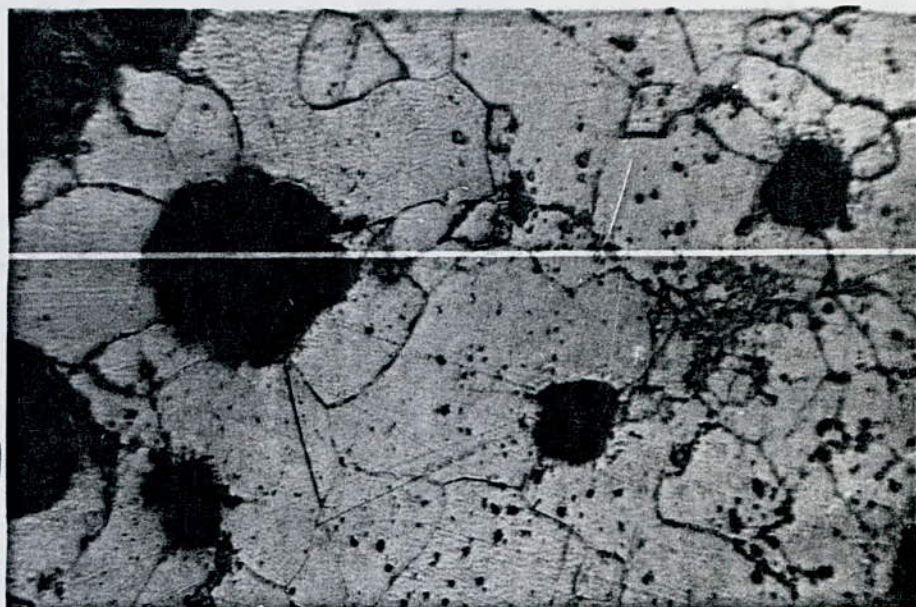


Fig 30 suite. Evolution structurale au cours  
du cyclage de fatigue thermique  
de la structure Revenue de la fonte G.S

Tableau N° 6 Evolution de la microdureté en fonction du cycle de fatigue Thermique de la fonte G.S.

Structure	Ferrite		Perlite		Revenue	
	M HV		M H		K (daJ/cm <sup>2</sup> )	M HV
0	167		267		0,875	360
100	159		307		0,775	436
250	155		379			444
500	158		376		0,6	414
750	163					
1000	167		359		0,60	355
1250	173					
1500	156		349		0,65	343
1750	143					
2000	130		313		0,825	269

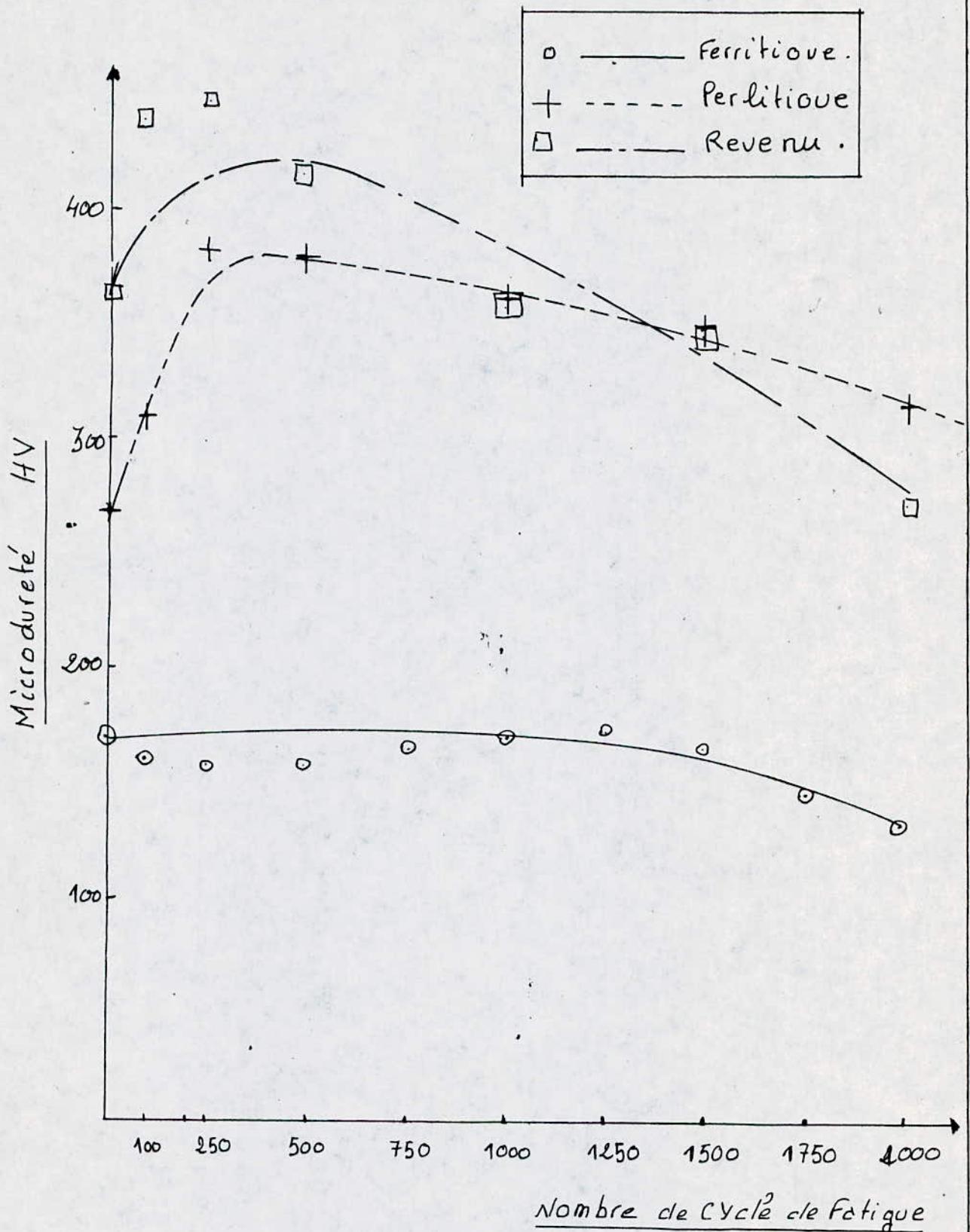


Fig: 31. evolution de la microdureté, HV en fonction du nombre de cycle de Fatigue thermique des structures Ferritiques, Perlitique et Revenu de la fonte G.S.



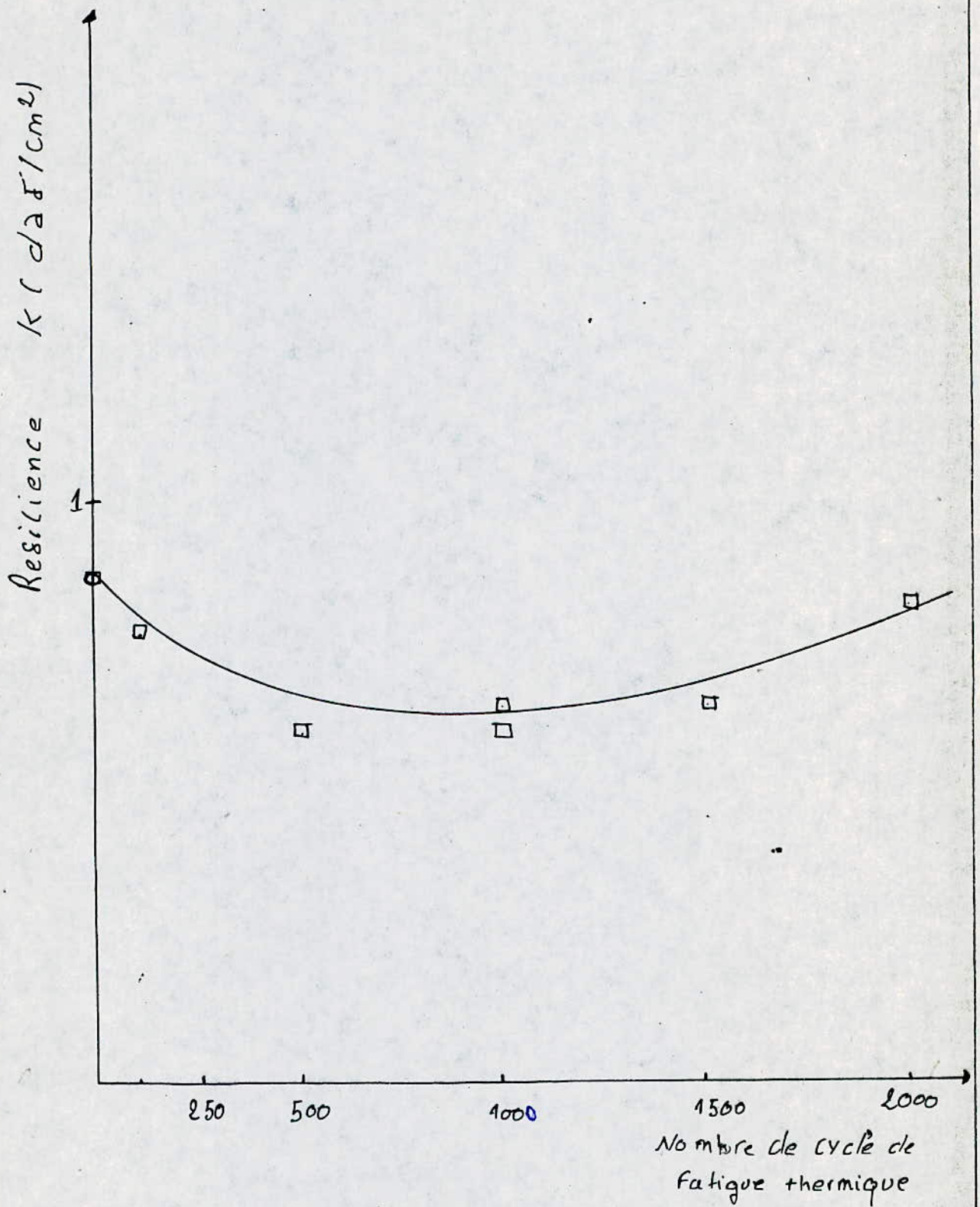


Fig 32 Evolution de la résilience en fonction du Nombre de cycle de fatigue thermique de la Structure Revenue de la Fonte 65.

## CHAPITRE 5 : INTERPRETATIONS GENERALES ET CONCLUSIONS

### 5-1 INTERPRETATIONS DES RESULTATS:

#### 5-1-1 ETUDE DU COMPORTEMENT EN CHOCS ET FATIGUE THERMIQUE DE LA FONTE GS.

L'Etude menée dans le cadre de ce projet est limitée à tester le dispositif réalisé et de conclure, quand à son utilisation dans l'étude de la fatigue thermique, c'est pourquoi nous ne pouvons approfondir l'aspect du comportement de la fonte GS essayée en fatigue et en choc thermiques-.

Nous présentons l'interprétation des résultats obtenus de la manière suivante :

#### 5-1-1-1 EVOLUTION STRUCTURALE ET DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Dans les structures ferritiques et perlitiques, la perlite se transforme en ferrite et graphite -. La proportion de la perlite décomposée augmente avec la durée de l'essai, c'est à dire avec le nombre de cycle -. Ce processus est plus accéléré en chocs qu'en fatigue thermiques à cause de la différence de la durée de maintien à chaud et de la température maximale plus élevée en choc; Probablement ces transformations font qu'après un certain nombre de cycle, la structure perlitique se transforme en structure ferritique et la perlite existante dans la structure ferritique, estimée à environ 5%, disparaît complètement -.

Dans la structure sorbitique le cémentite se décompose également et la structure tend vers une structure ferritique -. Ces résultats montrent l'augmentation des proportions de la ferrite et du graphite au cours du cyclage thermique -.

Nous n'avons pas vérifié si la taille des nodules de graphite varie au cours du cyclage et conclure quant à la diffusion du carbone issue de la décomposition de la perlite vers la surface des nodules -.

Nous avons constaté qu'au cours de l'essai, des amas de petites tailles de graphite se forment dans la matrice et aux joints de grain de la ferrite -.

.../...

### 5-1-1-2 EVOLUTION DE L'OXYDATION

L'oxydation tant interne qu'externe s'accélère au cours du cyclage. L'oxydation externe se repartit sur toute la surface tandis que l'oxydation interne se localise au niveau des joints de grain et autour du graphite -.

Lorsque les fissures apparaissent, la région entourant ces fissures est atteinte par l'oxydation. Egalement ceci permet de conclure que les régions de concentration de contrainte (fissurées et joints de grain) sont atteintes plus facilement. De même que le graphite sous sa grande affinité pour l'oxygène, il réagit rapidement avec ce dernier. En effet, l'oxygène diffuse plus rapidement dans le graphite que dans la matrice -.

Ces observations sont confirmées par l'évolution des caractéristiques mécaniques. Ainsi, les structures perlitique et revenue s'adoucissent (chute des caractéristiques de résistance et augmentation de l'allongement) tandis que la ferrite semble se durcir à cause du phénomène d'écroûissage développé au cours du cyclage -.

Dans leur étude sur le rôle de la structure de la fonte GS sur sa durée de vie (DUFLOT, VARTINOT et PELERIN [ 8 ]) montrent que la durée de vie de la structure ferritique est plus grande que celle des autres structures et que cette durée de vie augmente avec les proportions de la ferrite et du graphite -. Ceci peut être expliqué par les résultats que nous avons obtenu -.

D'après JANOWAK, CRAWFORD et ROHRIG [ 9 ]; La fonte GS ferritique est plus résistante à l'oxydation, car d'une part, la forme nodulaire du graphite est moins sensible à l'attaque de l'oxygène et d'autre part, la présence d'une phase homogène et contenant 2 à 3% de silicium favorisant d'un film protecteur réduisent l'effet de l'oxygène -.

### 5-1-1-3 EVOLUTION DE LA FISSURATION

La fissuration observée dans les trois structures est dû type intergranulaire -. Les fissures prennent naissance essentiellement à partir du graphite lorsqu'il n'a pas la forme sphéroïdale et présente des entailles -. Ce qui est remarquable dans le phénomène de fissuration c'est le développement des fissures d'un graphite à l'autre (connexion des graphites cités précédemment) -. La taille des fissures augmente avec le nombre de cycle - .../...

L'aptitude à la fissuration est différente pour les trois structures étudiées-. Ainsi, la structure de revenu se fissure plus facilement suivie de la structure ferritique, la structure perlitique semble résister mieux -.

#### 5-1-2 APTITUDES DU DISPOSITIF D'ESSAI

Le dispositif d'essai a permis d'atteindre les objectifs suivants:

- 1 - Etude de l'évolution structurale en fatigue et choc thermique
- 2 - Etude de l'effet de l'oxydation au cours du cyclage -.
- 3 - Evolution des caractéristiques mécaniques ( $R_m$ ,  $R_e$ ,  $A$ ,  $K$ ) au cours du cyclage thermique -.
- 4 - Développement de l'endommagement par fissuration au cours du cyclage -.

Donc nous pouvons conclure que l'objectif a été atteint mais des améliorations sont à apporter pour maîtriser mieux les différents paramètres et pour l'introduction de nouveaux facteurs tels que la mise des éprouvettes sous contraintes au cours de l'essai, la mise sous des conditions d'environnement appropriés pour étudier l'effet de corrosion -. De même l'introduction de système de contrôle des déformations des contraintes, du développement de la fissuration.

#### 5-2 CONCLUSION

Cette étude nous a permis de mettre au point un dispositif d'essai de matériaux en fatigue et en choc thermiques -.

Le contrôle d'un certain nombre de paramètres a été maîtrisé, tel que les températures maximales et minimales, la vitesse de variation de température, les durées de maintien à chaud et à froid, et la du bain de refroidissement -.

Le dispositif permet d'obtenir les courbes du cyclage en choc et fatigue thermique, le comptage du nombre de cycle et l'utilisation d'éprouvette de formes normalisées ( traction, résilience, ....) et

Avec ces possibilités une reproduction des conditions industrielle peut être réalisée -.

Les résultats obtenus pour la fonte GS sont concluants -.  
Une étude plus approfondie est souhaitable avec l'amélioration  
du dispositif et l'utilisation des techniques d'analyse et d'observation  
adéquates -.

## B I B L I O G R A P H I E

- (1) SPERA D. A.  
" What is thermal fatigue ? "  
Thermal fatigue of Materials and components, ASTM - STP 612 PP 3 - 9 (1976)
- (2) MIANNAY D.  
" Fatigue et choc thermiques "  
CTIF. edition technique des industries de la fonderie, PP 1-28 (Mars 1975)
- (3) MANSON S.S.  
"Thermal stress and thermal shock, mechanical behaviour of materials at elevated temperature" Ed. T.E. DORN, MC GRAW HILL, P 393 (1961)
- (4) FLAVENOT J.F. et SKALI N.  
" Influence des conditions de rectification sur les contraintes residuelles introduites dans un acier 42 CD4" CETIM inte N° 71 , PP 58 - 66 , (1982)
- (5) FLUZIN P.  
" Contribution à l'etude des effets de synergie en fatigue thermique, application à la ruine des cylindres d'un laminoir à chaud du cuivre "  
these de Docteur - Ingenieur. Université technologique de compiegne (1983)
- (6) ROUSSEAU D. , RIEGERT J.P., SERAPHIN L. et TRICOT R.  
" Fatigue thermique des Aciers à outils pour travail à chaud "  
revue de métallurgie , PP 875 - 889 ( Décembre 1975).
- (7) LEROY D.  
" Interaction materiau/milieu dans le cas de la fatigue thermique en milieu corrosif. Application à la fissuration des rouleaux d'une installation de coulée conteneur d'acier "  
Thèse de Docteur - Ingenieur, Université technologique de compiegne (Janvier 1981)
- (8) DUFLOT J. MARTINOT M., et PELERIN E.  
" Rôle de la structure des fontes G.S. sur leur durée de vie selon la methode de simulation de l'IRSID" Rapport IRSID RE 454 , (Juin 1977)
- (9) JANOWAK J., CRAWFORD J.D., et RÖHRIG K.  
" Ferritic nodular irons for elevated temperature service".
- (10) A. ROOS " Précis de métallurgie appliquée" Ed. DUNOD-BORDAS-PARIS 1963
- (11) M. GEIGER. " Métallurgie de fonderie" Ed: EYROLLES 1978

