

وزارة التعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : Métallurgie

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

Influence de la vitesse de Refendement
sur la structure, le retrait et les
Caracteristiques des pieces en fonte grise

Proposé par :

E.N.F

Etudié par :

BENCHERIF M.K.

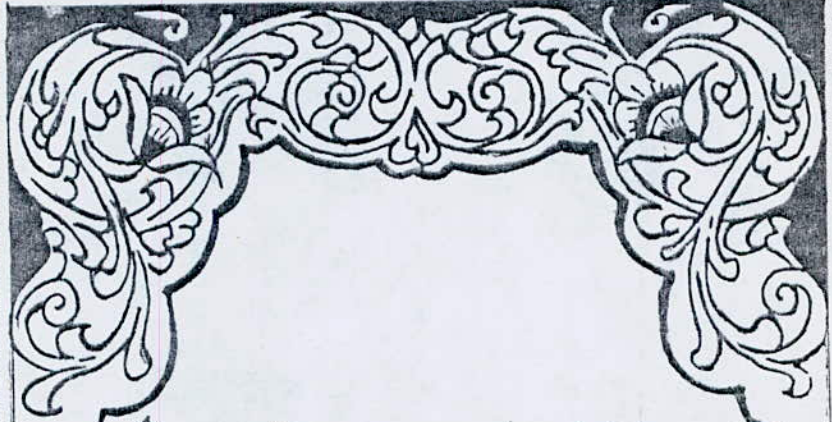
HAMDACHE.S

Dirigé par :

M^{me} Bouali

PROMOTION :

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ

تَشْدِيدٌ وَمَنَافِعُ لِلنَّاسِ

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ

Dedicaces

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Je dedie ce modeste travail :

- *A mes tres chers parents*
- *A mes freres et ma soeur*
- *A tous mes amis.*

BENCHERIF Mohamed Karim

Je dedie ce modeste travail :

- *A mes tres chers parents*
- *A mes soeurs et mon frere*
- *A ma soeur, mon beau frere et leur enfants,*
en particulier YACINE
- *A tous mes amis.*

HAMADACHE Saci

Remerciements

Nous tenons à remercier vivement tous les professeurs et les responsables du département Metallurgie qui ont contribué à notre formation, en particulier notre promotrice Mme BOUALI qui nous a aidé tout au long de l'élaboration de ce projet de fin d'étude.

Nous remercions également tout le personnel de la fonderie E.N.F. d'EL-HARRACH en particulier Mr CHIKHI, le personnel de la C.V.I. ainsi que celui de l'U.F.R.

Enfin sans oublier tous ceux qui nous ont aidé dans la réalisation de notre projet.

PLAN DE TRAVAIL

Introduction

Partie Théorique

- Chapitre I : Généralités sur les fontes. 2, 3
- Chapitre II : Fontes grises lamellaires. 5
- II.1 : Mécanisme de solidification. 5
- II.2 : Formation du graphite. 6
- II.3 : Analyse sommaire des constituants de la fonte grise. 10 8,9
- II.4 : Influence des divers facteurs sur la structure. 13
- II.4.1 : Composition chimique. 13, 14, 16, 17
- II.4.2 : Conditions de reforgeage. 18, 19, 20, 21
- II.4.3 : Surfusion et Inoculation. 22
- II.4.4 : Répétition des fusions. 22
- Chapitre III : Caractéristiques Mécaniques et utilisation des fontes grises. 23, 24, 25
- Chapitre IV : Retrait. 26.
- IV.1 : Notion de retrait. 26
- IV.2 : Origine du retrait. 26
- IV.3 : Etapes du retrait. 27
- IV.4 : Facteurs du retrait. 27
- IV.4.1 : Composition chimique. 28, 28
- IV.4.2 : Epaisseur des pièces. 28
- IV.4.3 : Condition de fabrication. 28
- IV.4.4 : Mode de moulage. 28, 29

- IV.4.5 : Rigidité du moule. 29
IV.4.6 : Mode de coulée. 29
IV.4.7 : Emplacement des masselottes. 30
IV.5 : Défauts dûs au retrait. 30
IV.5.1 : Retassure. 30
IV.5.2 : Porosité spongieuse. 30
IV.5.3 : Tensions Internes. 31
IV.5.4 : Ecart du retrait. 31

Partie Expérimentale

Chapitre I : Elaboration de la fonte grise et Techniques Expérimentales.

I.1 : Elaboration de la fonte grise.

I.2 : Techniques Expérimentales.

Chapitre II : Résultats et Interprétations.

Conclusion.

INTRODUCTION

INTRODUCTION :

Les exigences de la technique moderne ont amené le fondeur à élaborer des alliages ayant des caractéristiques mécaniques élevées, et des propriétés d'utilisation remarquables, à un prix de revient intéressant.

D'une façon générale dans les fontes grises, la présence du graphite initialement considérée comme une déficience à montré de nos jours, un certain nombre de propriétés avantageuses.

Ce projet de fin d'étude se basant sur l'étude de la fonte grise lamellaire de l'entreprise nationale de fonderie d'EL HARRACH a pour but d'étudier l'influence de la cinétique de refroidissement (dans les conditions industrielles celle-ci est caractérisée par les épaisseurs des parois) sur la structure, le retrait, ainsi que sur les caractéristiques mécaniques.

le matériau utilisé est donc la fonte grise de composition :

% C = 3,30 % % Si = 3,5 % (éléments principaux)

Nous avons travaillé sur des éprouvettes allant de 10 à 50 mm d'épaisseur obtenues par moulage en sable, en analysant la structure obtenue pour chacune d'elle nous avons effectué des essais mécaniques.

Afin de nous permettre de trouver la structure donnant de meilleurs propriétés mécaniques avec le moins de défauts possibles ainsi on pourra éventuellement fabriquer des pièces par moulage à bon prix si la surface spécifique de l'éprouvette est égale à la surface spécifique de la pièce.

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I

Generalites sur les Fontes

Les fontes, dont les teneurs en carbone varie théoriquement de 1,7 % à 6,67 % et pratiquement de 2 à 4,5 %, sont caractérisées par l'intervention d'une transformation eutectique qui leur confère une aptitude particulière au moulage.

Dans les fontes, les teneurs en éléments normaux d'élaboration Mn, Si, P, S sont en général notablement plus élevées que dans les aciers. De ce fait, la description de leurs transformations à l'aide du diagramme binaire Fe - C est encore plus approximative que pour les aciers. Il faudrait au moins introduire les ternaires Fe-C-Si- et Fe-C-P.

Selon la forme du carbone, on distingue différents types de fontes :

Fontes Blanches : Ce sont des fontes où tout le carbone est sous forme de cémentite Fe_3C , elles ont une cassure blanche. Leur structure, établie suivant le diagramme Fe-C métastable, est constituée de perlite, lédéburite et cémentite, et est obtenue avec une faible teneur en silicium. Leur caractéristique principale est la dureté qui les prédispose aux utilisations demandant de la résistance à l'abrasion. Ces fontes sont pratiquement inusinables à cause de leur dureté élevée qui les rend trop fragiles.

Fontes truites : Ce sont des fontes mixtes (mi-blanche-mi-grise) dont la plus grande partie du carbone (plus de 0,8 %) se trouve sous forme de cémentite. Leur structure est constituée de : Lédéburite, perlite et graphite lamellaire.

Le graphite est le plus souvent sous forme de bâtonnets, et la perlite est souvent grossière et lamellaire. La cémentite libre s'y rencontre souvent.

Fontes à graphite sphéroïdal :

Ce sont des fontes dans lesquelles le graphite se trouvant sous forme sphéroïdale est obtenue par addition, le plus souvent, du Magnésium (de 0,03 % à 0,07 %) qui confère au graphite, pendant la cristallisation, cette forme.

A la différence d'une graphite lamellaire, le graphite sphéroïdal n'est pas un concentrateur actif de contraintes (effet d'entaille moins sévère), et il affaiblit moins la matrice d'une fonte; de ce fait, les propriétés mécaniques d'une FG.S sont plus élevées que celles d'une fonte usuelle.

Ces fontes possèdent, en outre, les mêmes avantages que présente une fonte : bonne coulabilité et usinabilité, aptitude à amortir les vibrations, haute tenue à l'usure, ect...

La composition chimique courante d'une fonte à graphite sphéroïdal (norme Française AFNOR) :

C = 3,4 à 4 % , Si = 2 à 3 % , Mn = 0,1 à 0,8 %

P < 0,01 % , S < 0,02 % , Mg = 0,02 à 0,1 %

Fontes Grises : Ce sont des fontes dans lesquelles le graphite se trouve sous forme lamellaire.

Les lamelles de graphite réparties dans la matrice métallique donnent à la cassure une couleur grise caractéristique.

Ces lamelles confèrent à la fonte grise des propriétés très particulières telles une excellente usinabilité, une grande capacité d'amortissement des vibrations et une bonne résistance à l'usure. Ces fontes sont très appréciées pour leur aptitude à être coulées en formes complexes au prix le plus bas des alliages de fonderie de bonne qualité.

Ce type de fontes fera l'objet d'une étude approfondie dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

Fontes Grises Lamellaires

La fonte grise est un alliage ternaire Fe-C-Si qui contient comme impuretés inévitables Mn, P et S, sa métallurgie est fort complexe et ne peut être étudiée comme celle de l'acier (système binaire). La forme graphitique est une caractéristique de cette fonte, qui détermine de nombreuses de ces propriétés. La composition de base de la fonte peut être représentée fictivement par l'équivalent carbone (Céq) ou par l'indice de saturation (Sc) où :

$$\text{Céq} = \% \text{ Ct} + 1/3 (\% \text{ Si} + \% \text{ P})$$

$$\text{Sc} = \% \text{ Ct} / (4,3 - 1/3 (\% \text{ Si} + \% \text{ P}))$$

Où Ct : Teneur en carbone total de la fonte.

L'équivalent carbone (Céq), ainsi que l'indice de saturation (Sc), donnent une indication sur le comportement de la fonte à la solidification et par conséquent sur le type de la structure.

Les fontes ayant un équivalent de carbone (Céq) supérieur à 4.3% (Sc >1) sont dites hypereutectiques, elles sont particulièrement qualifiées pour résistance au choc. Les fontes de résistances élevées ont un équivalent de carbone (Céq) inférieur à 4.3 % (Sc <1); elles sont dites hypo-eutectiques.

II. 1. Mécanisme de solidification.

Lorsque l'alliage liquide est coulé dans un moule, il y a successivement apparition de germes solides puis développement des cristaux jusqu'à consommer tout le liquide.

... 2

La solidification d'une fonte industrielle (Fe-C-Si-S) à faible teneur en soufre s'effectue d'abord par la formation d'un squelette dendritique d'austénite primaire; suivi en deuxième phase, dans l'intervalle interdendritique par la cristallisation du liquide eutectique.

II. 2. Formation du graphite.

Ce n'est qu'au cours de la solidification de l'eutectique que se ferment les lamelles de graphite.

La graphitisation n'est entièrement terminée que lorsque l'eutectique est complètement solidifié.

La graphitisation des lamelles de graphite est le centre de cristallisation des cellules eutectiques.

Au cours du refroidissement suffisamment lent le liquide eutectique se solifie en graphite et austénite, comme s'il existait réellement un eutectique graphite austénite. A chaque lamelle d'austénite solidifiée correspond une lamelle de graphite qui, pour sa formation exige une diffusion des atomes de carbone au travers de la zone adjacente d'austénite, émergeant du métal liquide qui l'entoure.

Le germe de graphite a devant lui le liquide et il est entouré dans le solide par les constituants de décompositions du liquide eutectique selon les réactions:

Liquide eutectique ----> agrégat austénite + carbure eutectique

Carbure eutectique ----> austénite + Graphite

De telle sorte qu'il y a, enfin de compte, de l'austénite solide

Au contact du graphite. Il n'y a pas croissance du germe dans sa longueur, car cela ne serait possible que par diffusion à l'état solide diffusion forcément très lente.

La diffusion à l'état liquide, la plus rapide, a lieu sur le front de solidification et le sens de croissance du graphite est donc dans la longueur de l'élément fermé, à partir du centre de germination qui se trouve au centre de la cellule en cours de solidification on a ainsi une formation en rosette.

Si le nombre de germes apparaissent en même temps, est élevé il y a un nombre élevé de paillettes courtes car chaque paillette ne peut s'accroître beaucoup en longueur, la quantité de carbure nécessaire à sa croissance étant prélevée sur le contingent des lamelles voisines.

Au contraire si le nombre de germes est faible, à un instant donné, on est en présence de grandes lamelles de graphite.

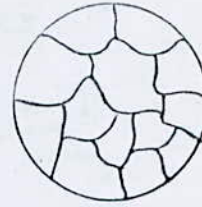
II.3 Analyse sommaire des constituants de la fonte (structure):

Les fontes grises sont constituées d'une matrice perlitique, ferrito-perlitique ou ferritique dans laquelle sont présentes des lamelles de graphite, dont le nombre, la forme et les dimensions sont extrêmement variables, et des zones d'eutectique phosphoreux si la teneur en phosphore dépasse 0.2 %. Les propriétés de ces fontes varient très largement avec les caractères du graphite.

Ferrite: Solution solide d'insertion de carbone dans le fer (CC) ou (CFC).

Elle est peu résistante et sa dureté est faible. Ces caractéristiques varient avec celles des aciers à cause de l'influence d'éléments secondaires qui rentrent aussi, à faible teneur, en solution dans la ferrite (Si, Mn, N).

La ferrite est très ductile ($A=35\%$) et résiliente ($KCu = 100 \text{ joules/cm}^2$). La figure N° 1. représente une matrice ferritique observée par micro-scope .
(elle est très facilement usinable).



Cémentite: C'est une combinaison chimique de fer et de carbone Fe_3C .

Elle possède une dureté très élevée de l'ordre de 700 à 800 HB. Etant très fragile, sa résistance mécanique est difficilement mesurable .

Sa ductilité $A=0\%$ et par suite sa plasticité est pratiquement nulle. De même pour la résilience qui est pratiquement nulle ($KCu = 0 \text{ joules/cm}^2$).

Perlite : c'est un agrégat de 2 phases (Ferrite et cémentite) qui se présentent sous forme d'un feuilletage de lamelles disposées alternativement.

Les caractéristiques de la perlite sont liées à la finesse de ces lamelles, c'est à dire lorsque ces lamelles sont très minces (fines), la résistance au cisaillement s'accroît et la perlite devient plus dure et plus résistante ($R_m=75-95 \text{ dan/mm}^2$, $HB=200-300$).

Ce phénomène est dû à un refroidissement rapide, tandis que la perlite en lamelles grossières est moins dure et moins résistante que celle précédemment citée.

Elle possède une faible ductilité ($A = 10\%$) et une faible résistance ($K_{Cu} = 2 \text{ daj/cm}^2$) .

Stéadite : C'est un constituant d'inclusions solides dures d'un eutectique phosphoreux binaire (Fe_3P), formé à la suite d'un taux élevé de phosphore dans la fonte-grise . Il est souvent réparti en réseau autour des cellules eutectiques. Sa dureté varie de 400 à 600 HB. En l'absence de cémentite libre, il constitue la partie la plus dure du métal.

Graphite: La décomposition de la cémentite donne naissance à du graphite, qui se présente sous 2 formes principales :

- Le graphite punctiforme : appelé aussi graphite de surfusion parceque c'est lui qui se forme de préférence en cas de surfusion notable de l'alliage.

- Le graphite lamellaire: il apparait sur les coupes micrographiques sous l'aspect de filaments, dont la largeur varie avec l'inclinaison du plan de coupe sur la lamelle coupée.

Forme du graphite : On designe le graphite suivant sa forme, sa répartition et ses dimensions voir les planches: 1,2 et 3,

PLANCHE I. — Diagrammes de référence pour la forme du graphite (répartition A).

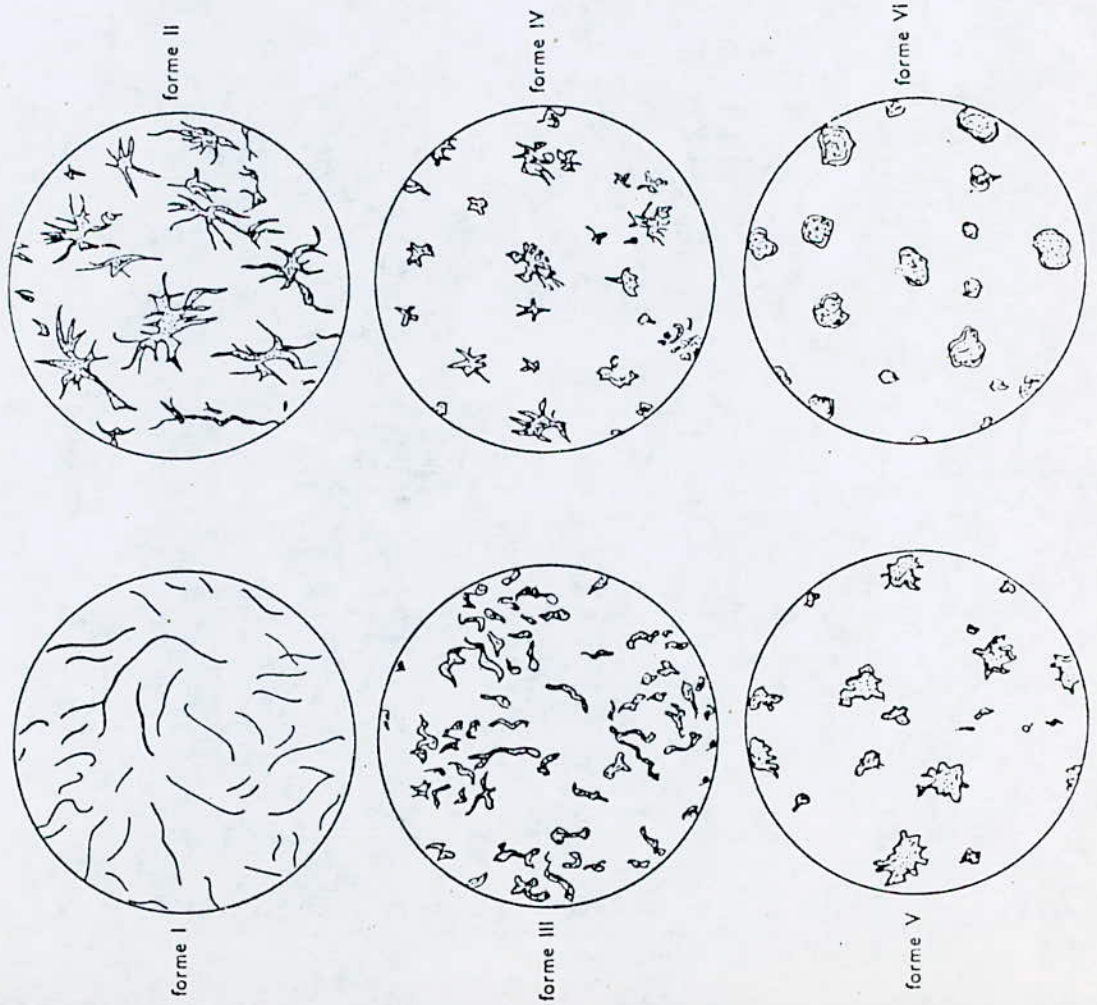
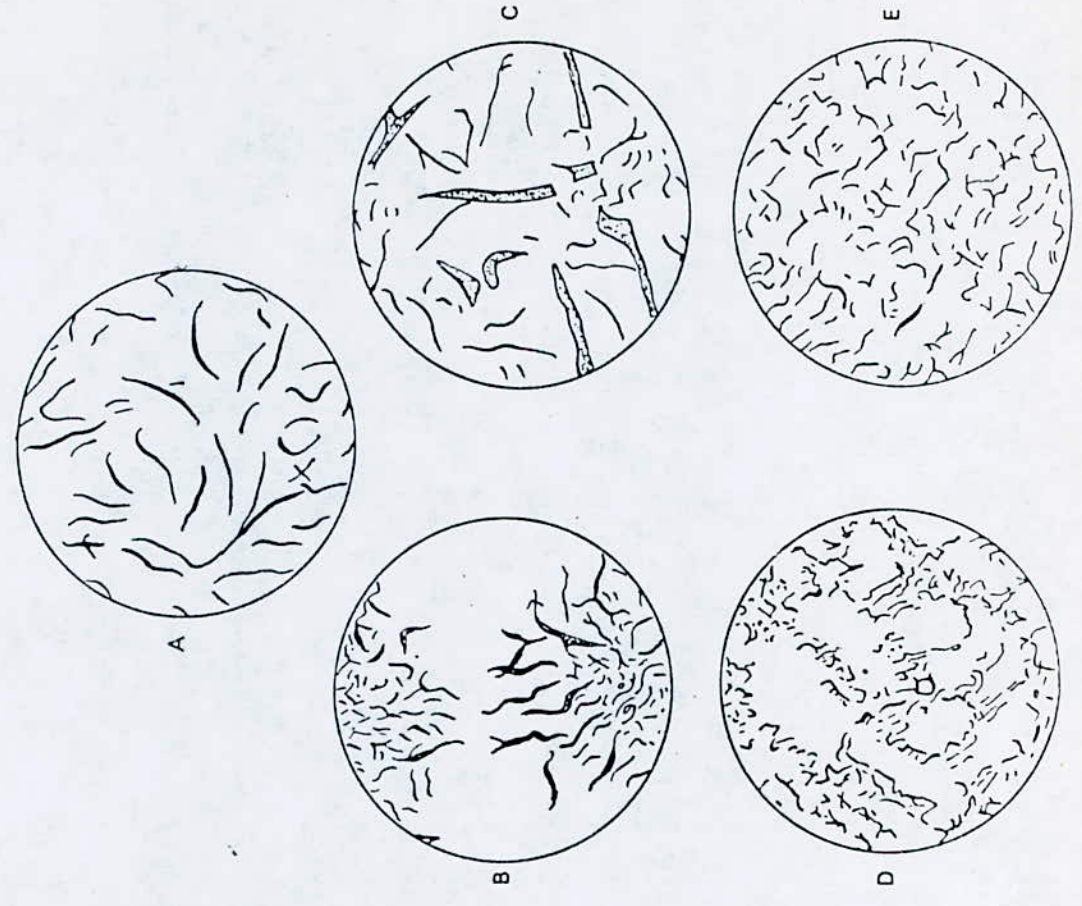
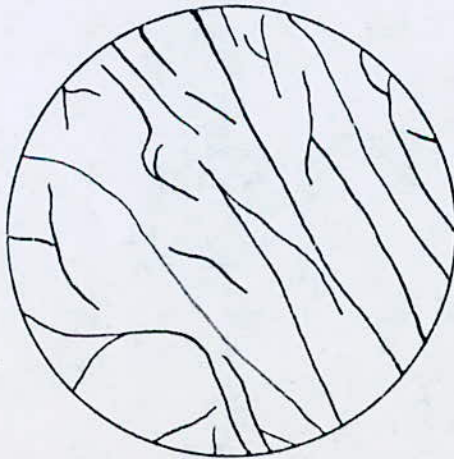


PLANCHE 2. — Diagrammes de référence pour la répartition du graphite (forme I).

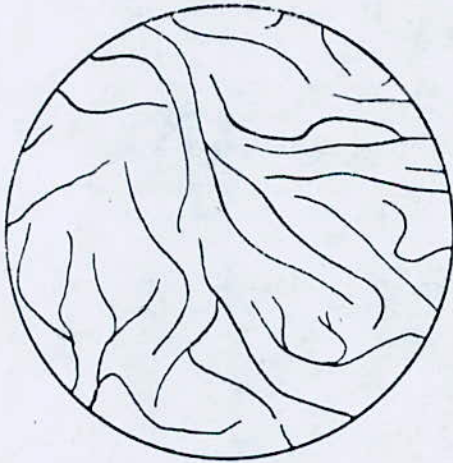


FLANCHE 3. — Diagrammes de référence pour les dimensions du graphite.

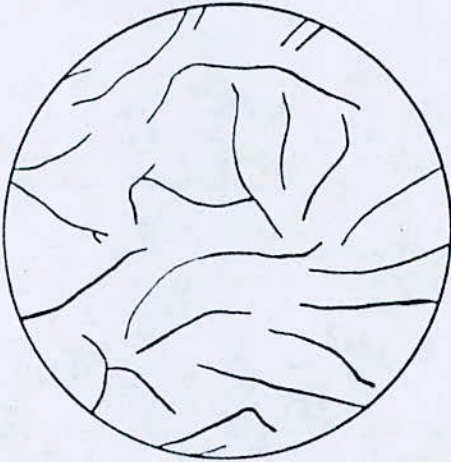
Formes I et VI et répartition A (grossissement $\times 100$).



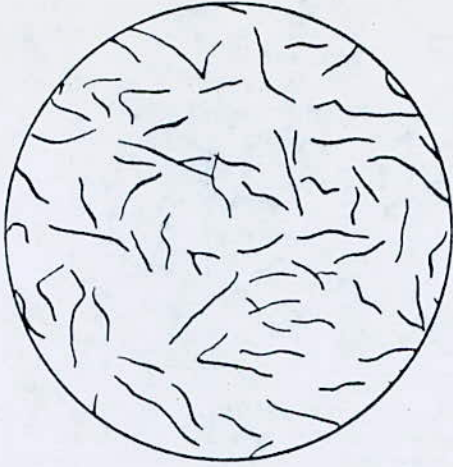
1



2

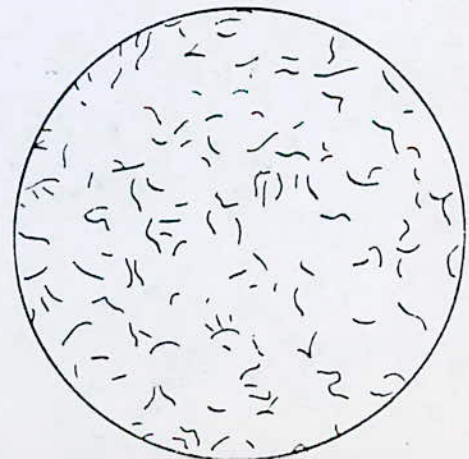


3

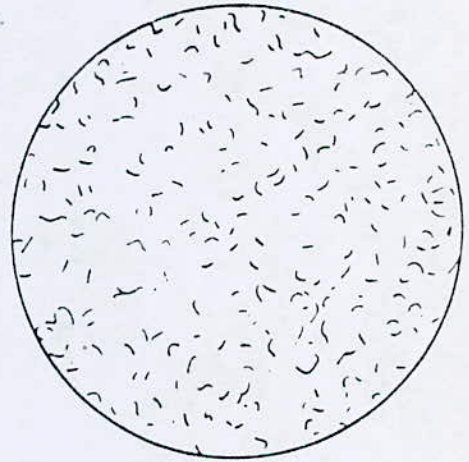


4

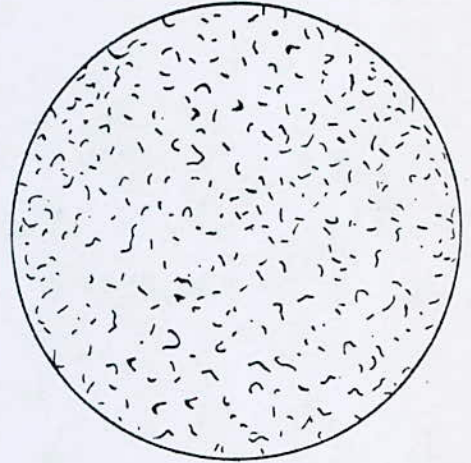
12



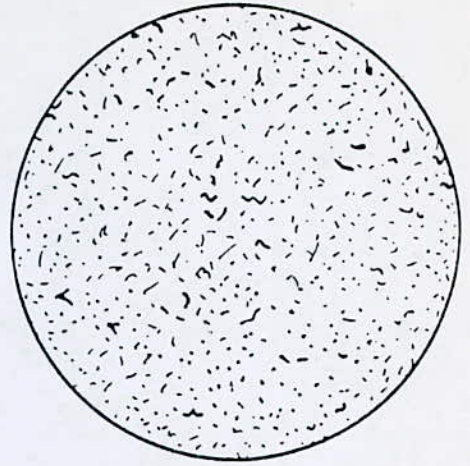
5



6



7



8

Facteurs influants sur la formation du graphite :

Sur la forme et les dimensions des éléments de graphite influent divers facteurs naturels, entre autres :

- La vitesse de refroidissement : qui varie en moyenne en sens inverse de l'épaisseur, et dont l'augmentation favorise la surfusion et l'apparition du graphite punctiforme, et la diminution favorise le graphite lamellaire.

Donc la graphitisation est d'autant plus facile que la vitesse de refroidissement est plus faible .

- La composition chimique : présence d'éléments graphitisants tels que le silicium ou antigrahitisants tels que Manganèse.

II.4 : Influence des divers facteurs sur la structure .

II.4.1 Composition chimique

La fonte grise contient en dehors du fer les éléments:

Carbone : C'est un élément qui a une importante influence sur les propriétés de la fonte, en effet, plus la teneur en carbone total est élevée, plus il se forme du graphite (teneur en carbone graphique augmente) et plus les propriétés-mécaniques sont faibles (la présence du graphite en importante quantité affaiblit la résistance), donc la teneur en carbone totale d'une fonte grise doit être d'autant plus basse que les résistances mécaniques recherchées sont plus élevées. Cependant, les teneurs minimales en carbone sont de l'ordre de 2.8 % à 3 % car en dessous, l'intervalle de solidification devient important : la coulabilité diminue et les risques de retassure augmentent.

Enfin, plus la teneur en carbone total d'une fonte grise est basse, plus ses températures de fusions et de coulée sont élevées. Cette teneur se situe entre 2.8 % et 4 %

Silicium: Sa teneur dans la fonte ^{he} ne dépasse pas 3,5 % .
le silicium exerce un rôle graphitisant en favorisant la précipitation du carbone sous forme de graphite selon la réaction :



Lorsque la teneur en silicium d'une fonte grise augmente, la température de début de solidification diminue et la température de fin de solidification augmente, par suite, l'intervalle de solidification est moins grand, donc :

- Les températures de fusion et de coulée sont moins élevées .
- Les pièces présentent moins de défauts (hétérogénéité de structures, retassures).

Dans la figure N° 2, sont représentés 3 diagrammes Fe-C correspondant à des teneurs en silicium de 0 %, 2 % et 4 % . De là, nous pouvons remarquer que le silicium :

- Modifie l'allure générale du diagramme .
- Déplace le point de l'eutectique Fe-C vers la gauche.

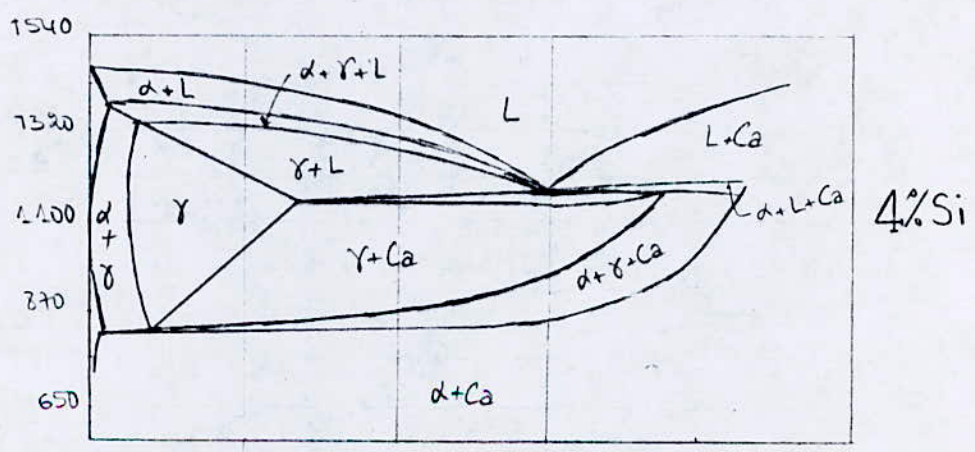
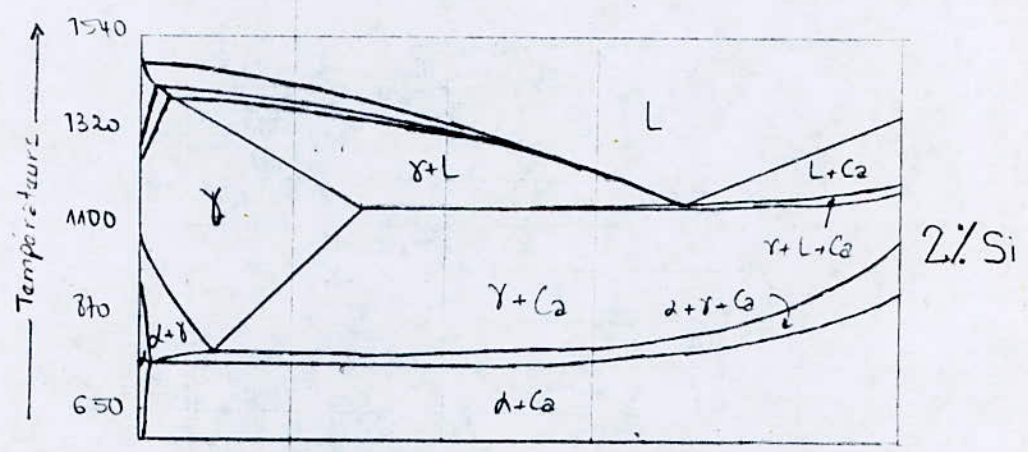
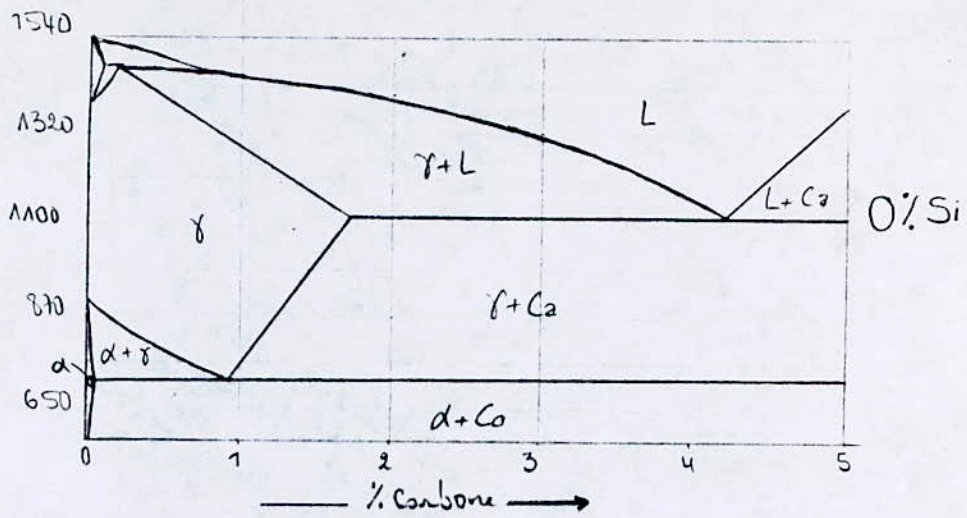


Fig 2: Diagrammes de Solidification Fer-Carbone pour les teneurs en Si de 0%, 2% et 4%.

Soufre : Est un élément apporté surtout par le Coke lors de la fusion, ainsi que par les retours et la vieille fonte.

Il ralentit sensiblement la graphitisation, il a alors un rôle néfaste, il est particulièrement actif, une petite addition de cet élément transforme rapidement la structure et la rend perlitique.

Le soufre favorise la formation des soufflures sous-cutanées, et forme avec le Mn des inclusions de MnS dont le rôle est négligeable.

Le soufre est une impureté qui altère les propriétés mécaniques, il augmente la dureté de la fonte qui devient de plus en plus fragile lorsque la teneur de soufre augmente, si cette teneur dépasse 0.15 % suivant le reste d'analyse chimique de la fonte, la dureté dépassera 220 HB, et à partir de cette valeur, la fonte grise deviendra difficilement usinable et présentera des résistances mécaniques moins élevées.

- Manganèse : Sa teneur habituelle varie de 0.45 % à 1 %, dans les fontes ordinaires. Son rôle essentiel est de neutraliser l'effet néfaste du soufre sur les propriétés mécaniques des fontes grises, par formation de sulfure de manganèse MnS.

- Il a peu d'influence sur la structure, il accroît la finesse des lamelles et affine quelque peu la perlite, ce qui entraîne l'élévation de la résistance à la traction, surtout pour des teneurs élevées de l'ordre de 0.7 % et plus.

- L'augmentation du manganèse rend la fonte plus perlitique tout en augmentant progressivement la dureté. Cependant pour une teneur élevée en manganèse (Mn 1 %), la fonte devient difficilement usinable par suite d'une dureté élevée.

C'est pourquoi, pour obtenir des fontes grises présentant des propriétés mécaniques plus élevées, il faut chercher à viser une teneur en soufre voisine de 0.1 %, mais inférieurs à 0.15 %, et une teneur en Mn comprise entre 0.7 % et 0.8 % au moins satisfaisant à la formule : $Mn \geq 1.72 S + 0.30$.

Phosphore :

Le phosphore accroît la coulabilité de la fonte à la fois par déplacement de l'eutectique (effet de même ordre que le silicium) et par abaissement du point de fusion, donc facilite la coulée, par exemple, avec 0.5 % de phosphore, on constate un abaissement de 115 °C pour une fonte à 3.5 % de carbone et 2 % de silicium (960 °C au lieu 1075°C).

Un taux élevé de phosphore dans la structure entraîne la formation des inclusions solides dures d'un eutectique phosphoreux Fe_3P dans les fontes grises, et par suite il accroît la dureté et la fragilité de la fonte grise, et augmente légèrement ses résistances mécaniques jusqu'à une certaine teneur suivant la teneur en carbone total .

- Si la teneur en carbone total est basse, les propriétés mécaniques de la fonte grise deviennent très sensibles à la teneur de phosphore qui ne doit dépasser 0.3 % .

- Si la teneur en carbone total est élevée (3.4% par ex) une teneur en phosphore plus élevée que 0.3 % a peu d'influence sur les propriétés mécaniques.

II.4.2 : Conditions de refroidissement:

Elles sont déterminées par: a) Température de coulée

b) Diffusivité thermique du moule

c) Massivité de la pièce.

a) Température de coulée: La température pour les fontes grises se situe dans l'intervalle (13 00 °C-14 00 °C), celles-ci étant caractérisées par une bonne coulabilité : aptitude à bien remplir le moule et à se conformer aux détails de l'impression.

On a évalué cette qualité par le chemin plus au moins long parcouru dans un canal en forme de spirale dans un moule normalisé par le liquide avant de se figer .

Les principaux facteurs influants sur la coulabilité sont :

- La surchauffe
- Le titre en phosphore

La surchauffe : Le degré de surchauffe ou écart de température (Δt) par rapport au liquidus de l'alliage accroît la coulabilité.

En fonderie, on adopte des degrés de surchauffe de l'ordre de 150 à 350 °C pour les fontes grises.

Titre en phosphore : Le phosphore améliore la coulabilité de la fonte grise. dans le cas des fontes devant présenter des résistances mécaniques élevées, il est indiqué de ne pas dépasser une teneur en phosphore de 0.15 %.

b) Diffusivité thermique du moule :

Dans un moule, on dispose d'agents qui vont se charger de transmettre vers l'arrière les calories à éliminer ce sont les gaz et vapeurs, leurs dégagement exige une certaine quantité de chaleur et aussitôt dégagés ils en absorbent une autres par échauffement.

Les gaz et vapeurs dont la pression s'accroît fortement, tant par les nouveaux dégagements que par l'élévation de température cherchent une issue soit à travers l'alliage soit-vers l'arrière à travers les canaux naturels qui existent entre les grains de sables .

Ces gaz et vapeurs servent donc de supports aux calories à évacuer et constituent dans le cas du moule en sable le facteur principal du refroidissement.

Autre agent de refroidissement le noir minéral, son pouvoir refroidissant est fonction de sa teneur en matières volatiles, celles ci vont se dégager, s'échauffer et suivre le même chemin d'évacuation que la vapeur à travers le sable.

Donc malgré la mauvaise conductibilité thermique du sable le refroidissant peut être réalisé en un temps raisonnable grâce à la présence d'eau et de noir minéral dans les couche de sable voisine de l'alliage coulée.

c- Massivité de la pièce :

- Dans les conditions industrielles, il est commode de caractériser la vitesse de refroidissement d'après l'épaisseur des parois des pièces à mouler.

D'après SCHWARZ et WATH, une éprouvette cylindrique de diamètre $D = 2 r$ mm présente la même surface de refroidissement qu'une plaque d'épaisseur $e = r$ mm.

On appelle surface spécifique le rapport S/V de la surface au volume de la pièce moulée.

Une éprouvette se refroidit dans un moule comme la pièce moulée à produire si la surface spécifique de l'éprouvette égale la surface spécifique de la pièce moulée.

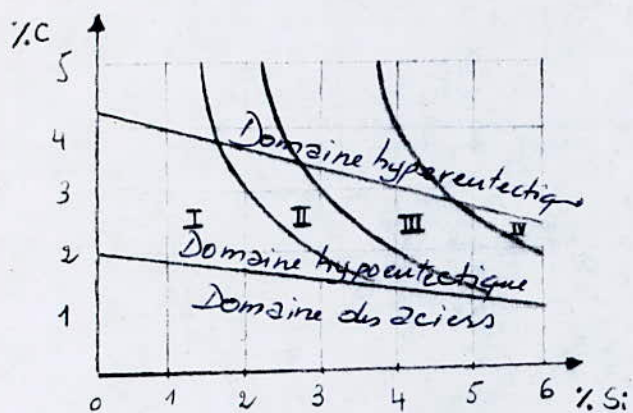
La structure obtenue dans l'éprouvette est alors significative et représentative de celle du moulage.

Pour une même loi de refroidissement, l'aptitude à la graphitisation de la fonte est donnée par un facteur G_c de graphitisation selon H. LAPLANCHE en aura :

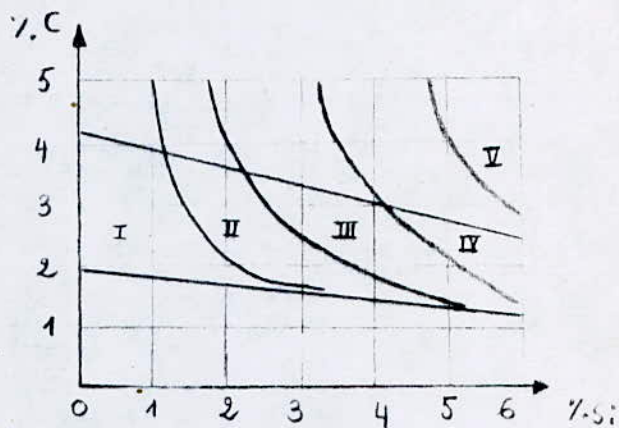
$$G_c = \frac{4 \text{ Si}}{3} \times \left(1 - \frac{g\% \text{ 25}}{15c + 3\text{Si}} \right)$$

Si on donne à G_c différentes valeurs numériques on obtient un faisceau de courbes qui délimitent les différents domaines des fontes comme le montre les courbes de LAPLANCHE suivantes pour un moulage de diamètre donné de 6 à 48 mm. (Fig 3)

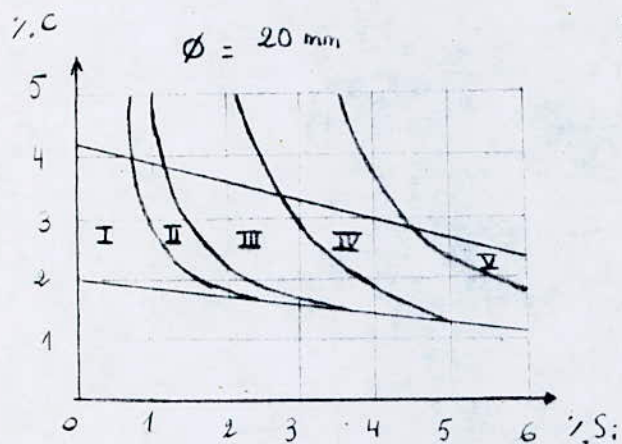
$\phi = 6 \text{ mm}$



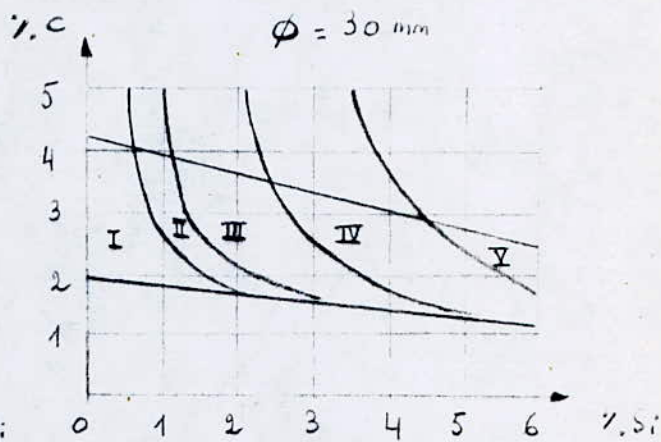
$\phi = 10 \text{ mm}$



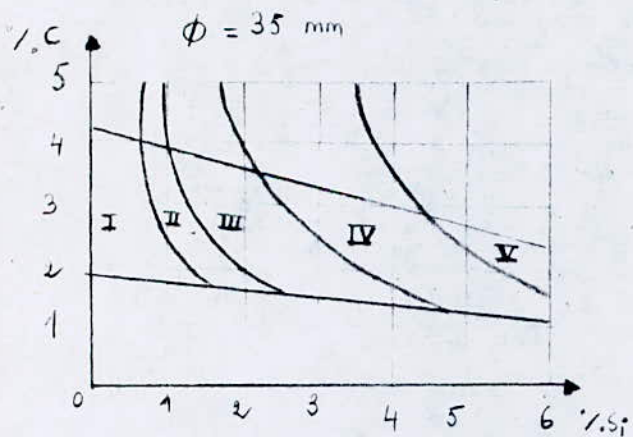
$\phi = 20 \text{ mm}$



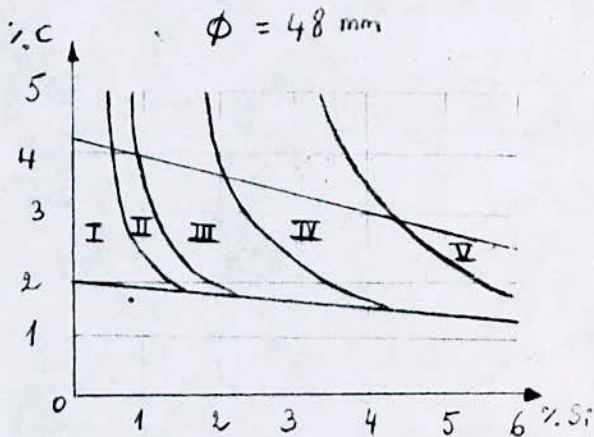
$\phi = 30 \text{ mm}$



$\phi = 35 \text{ mm}$



$\phi = 48 \text{ mm}$



Relation : structure - Composition - Massivité de la pièce

d'après H. LAPLANCHE

Fig(3)

Chaque zone du plan correspond à un type de fonte :

Zone I : Fonte blanche.

Zone II : Fonte truitée.

Zone III : Fonte grise à matrice perlitique.

Zone IV : Fonte grise à matrice perlite-ferritique.

Zone V : Fonte grise à matrice ferritique.

L'avantage de ces courbes c'est de pouvoir être utilisées directement pour les prévisions de la structure de la fonte.

II.4.3. Surfusion et inoculation :

Pour accélérer la graphitisation à partir de la phase liquide, il est fréquent qu'on introduise intentionnellement dans la fonte des inoculants, par exemple : Ferre-silicium à 70 - 80 % en silicium, ainsi que d'autres éléments d'addition (Al, Ni, Cu, ...) qui forment des centres de cristallisation supplémentaires.

La formation du graphite à partir de la phase liquide n'est possible qu'à une très faible vitesse de refroidissement lorsque le degré de surfusion n'est pas très grand.

II.4.4. Répétition des fusions :

Lorsqu'on utilise un lit de fusion composé partiellement de rebuts de fonderie, on constate que la répétition des fusions diminue la germination du graphite.

CHAPITRE III

*Caracteristiques Mecaniques
Et
Utilisation des Fontes Grises*

III. 1. Caractéristiques Mécaniques des fontes grises :

Les propriétés mécaniques de la fonte grise sont déterminées par sa structure, surtout par son composant graphitique qui joue le rôle des entailles affaiblissant la matrice métallique.

Les propriétés mécaniques varient selon le type de structure métallique, ainsi, une structure perlitique assure des résistances et duretés élevées; par contre, une structure ferritique les diminue.

La morphologie du graphite, qui est sous forme lamellaire, influe beaucoup sur les caractéristiques mécaniques de la fonte; ainsi, la résistance à la traction est d'autant plus grande que la quantité des inclusions du graphite est plus petite, qu'elles sont plus fines et plus isolées.

Les inclusions du graphite influent peu sur les duretés dont les valeurs sont déterminées essentiellement par la matrice métallique de la fonte.

La constitution et la micro-structure sont des facteurs principaux agissant sur l'usinabilité des fontes, là encore, le graphite par son caractère lubrifiant joue un rôle primordial : il améliore d'autant plus l'usinabilité qu'il est plus fin.

Les propriétés de ténacité et de plasticité des fontes forment un ensemble relativement médiocre, mais ces alliages présentent des propriétés d'emploi uniques dues pour la plupart à la présence de graphite.

L'épaisseur des éprouvettes ou des pièces a aussi un rôle important car elle fait varier la vitesse de refroidissement qui elle même a une grande influence sur la grosseur et la répétition du graphite ainsi que sur la structure de la matrice; en effet, la résistance à la traction, la dureté et la fragilité varient dans le sens contraire de l'épaisseur.

III. 2. Utilisation des fontes grises :

Les très nombreuses applications des fontes grises reposent sur un ensemble de propriétés fondamentales : résistance aux contraintes statiques et aux efforts alternes, résistance à l'usure et résistance aux corrosions par les milieux humides et par les sols. Les fontes grises permettent l'obtention par coulée de formes compliquées, et l'application éventuelle de traitements thermiques élargit encore le champ déjà étendu de leurs caractéristiques mécaniques. Leur usinabilité est excellente et leur prix de revient relativement peu élevé.

A cause de ces propriétés remarquables, il n'est pas donc étonnant que les fontes grises trouvent dans l'industrie l'emploi de tonnage beaucoup plus important que l'ensemble de tous les autres alliages de fonderie.

Nous rappellerons dans ceci quelques uns de leurs usages les plus traditionnels :

- Bâtiment : sanitaire, cuisine et chauffage, pièces de voiries, ...
- Résistance à la chaleur et au choc thermique : pièces de foyers, de fleurs, d'échangeurs thermiques, ...
- Résistance mécanique : machines outils, cylindres de laminoirs, nombreuses pièces d'automobiles (bloc moteur, chemises, ...), leviers trompettes de ponts, ...

IV. 1 Notion de retrait:

Le retrait est la contraction de l'alliage depuis l'instant auquel ce dernier remplit le moule jusqu'au moment où la pièce atteint la température ambiante.

On définit alors deux sortes de retrait :

Le retrait volumique global

$$Rv = \frac{V_m - V_p}{V_m} \times 100 \%$$

V_m = Volume du modèle

V_p = Volume de la pièce

Le retrait linéaire global

$$RL = \frac{L_m - L_p}{L_m} \times 100 \%$$

L_m = Longueur du modèle

L_p = Longueur de la pièce

IV. 2. Origine du retrait :

Le liquide comporte des défauts cristallins et particulièrement des vides atomiques, la solidification tend vers un système cristallin contenant beaucoup moins de lacunes, autrement dit vers un état plus compact que le liquide.

IV. 3. Etapes du retrait :

Le retrait comporte 3 étapes :

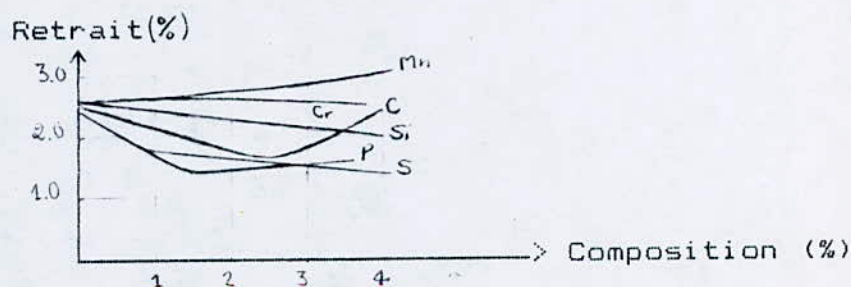
1ère étape : Contraction à l'état liquide : C'est la diminution du volume se produisant au cours du refroidissement de l'alliage alors que celui-ci est encore liquide.

2ème étape : Contraction de solidification : C'est la diminution du volume accompagnant la solidification, dans le cas des fontes grises, la contraction de solidification est en partie atténuée par le gonflement accompagnant la graphitisation.

3ème étape : Contraction à l'état solide : C'est la diminution du volume se produisant en dessous de point de fin de solidification jusqu'à la température ambiante.

IV. 4. Facteurs du retrait :

IV. 4.1. Composition chimique : Une fonte se contracte d'autant plus que sa teneur en carbone et en éléments favorisant la graphitisation (Si, Ni, Cu, Al) est faible. voir Figure ci-dessous :



Pour une même teneur totale en carbone dans le cas des fontes grises, celles dont le carbone se dépose partiellement sous forme de paillettes de graphite font un retrait plus important que celles dont le carbone graphitise totalement.

IV. 4.2. Epaisseur des pièces :

Le retrait linéaire est d'autant plus important que la pièce coulée est mince comme le montre le tableau suivant :

Pièces utilisées pour la fabrication de modèles de fonderie.

Alliage Fonte grise	Retrait linéaire mm / m
Pièces minces	10
Pièces moyennes	8
Pièces épaisses	7

IV. 4.3. Conditions de fabrication :

Une pièce coulée très chaude présente un retrait plus fort qu'une pièce à plus basse température.

IV. 4.4. Mode de moulage :

Le moulage en sable des pièces en fonte grise est le procédé

le plus utilisé, le sable de moulage doit posséder une certaine compressibilité c'est à dire la propriété de réduire quelque peu son volume sous l'action des forces de compression engendrées par le retrait de l'alliage pendant sa solidification et son refroidissement.

IV. 4.5. Rigidité du moule :

Le sable de moulage doit posséder une cohésion suffisante, sinon le moule peut s'effondrer partiellement ou totalement lors du transport ou du moulage. Le moule peut s'effondrer aussi pendant la coulée par suite de la destruction de ses parois.

IV. 4.6. Mode de coulée :

a/ Action réchauffante des coulées :

Les pièces d'épaisseur uniforme peuvent parfois donner lieu à une hétérogénéité dans le refroidissement quand les dispositions adoptées par la coulée sont telles qu'une trop forte quantité d'alliage passe à un même endroit et y provoque un réchauffement local du moule, ce réchauffement devient la cause d'un ralentissement local de refroidissement.

b/ Reprise de coulée :

Quand la coulée n'est pas continue, il y a reprise de coulée durant le temps où l'alliage reste liquide il y a risque de solidification prématurée dans les parois minces qui ne sont pas entièrement remplis.

IV. 4.7. Emplacement des Masselottes :

Les masselottes peuvent aussi constituer des massivités locales, produisant aux endroits de leur raccordement à la pièce les mêmes effets que les massivités dues à la forme de la pièce.

IV. 5. Défauts dûs au retrait :

Parmi les nombreux défauts dûs au retrait on peut citer :

IV. 5.1. Retassure :

Défaut de fonderie dû au retrait de l'alliage au cours de sa solidification caractérisée par une cavité interne.

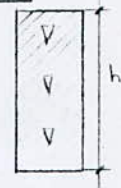
Cas : Pièce massive :

La cavité interne est bien localisée.



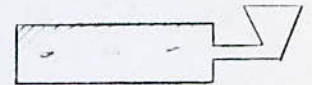
Cas : Pièce longue et mince :

La retassure se répartit sur toute la hauteur.



Cas : Barreau cylindrique :

Coulée en position horizontale et attaqué à une extrémité seulement accusera dans sa cassure des taches noires qui sont des petites retassures.



IV. 5.2. Porosité spongieuse :

Cette porosité est localisée souvent dans de grosses massivités ainsi que dans des pièces d'épaisseurs régulières.

IV. 5.3. Gauchissement :

Défaut de non conformité de la pièce au plan établi, par suite d'une cambrure totale ou partielle de la pièce.

IV. 5.4. Ecart de retrait :

Défaut de non concordance au plan caractérisé par le fait que la pièce n'a pas les dimensions requises : le retrait fait seulement par l'alliage différant de celui que l'on escomptait.

IV. 5.5. Tensions internes :

Défaut de fonderie présenté par les pièces dont le métal est le siège de sollicitations internes. Ces dernières ont pris naissance au cours du refroidissement à la suite d'opposition au retrait.

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE I

*Elaboration de la Fonte Grise
Et
Techniques Experimentales*

A/ Elaboration de la fonte grise:

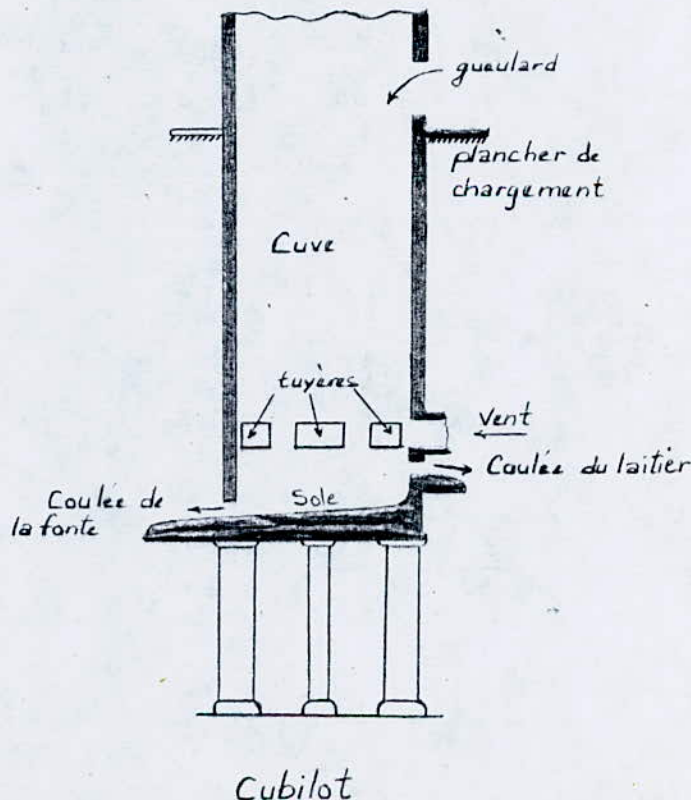
La fonte grise a été élaborer dans un cubilot qui est un four de fusion simple économique par suite de contact direct entre le combustible (coke) et la charge métallique.

1/ Description de l'appareil:

Cet appareil de fusion se présente comme un cylindre d'axe vertical de 5 à 10 m de hauteur, 1 à 3 mètres de diamètre constitué par une enveloppe de tôle, avec garnissage réfractaire de 30 à 50 cm d'épaisseur. La charge est introduite par un gueulard latéral et le vent est soufflé par une série de tuyères disposés à la base et alimentées par la boîte à vent.

La fonte liquide et les scories sont évacuées par les trous de coulée par différence de masse volumique.

2/ Schéma du Cubilot:



3/ Cahier de charge : La charge du cubiflet, destinée à élaborer la fonte, se compose :

1) De la fonte : a) fonte de première fusion, sous forme de gueuses .

- Fonte hématite : 150 Kg

- Fonte d'El-hadjar : 250 Kg

b) Fonte de retours (récupération) provenant des pièces mécaniques cassées) : 60 Kg

2) Du coke : dont la combustion fournira la chaleur nécessaire à la fusion du métal : 60 Kg

3) De la castine : pour transformer les cendres du coke en scories fusibles vers 1400 °C : 30 Kg

4) Des briquettes de ferre silicium à 55 %.on utilise 7 briquettes pesant chacune 1,8 Kg.

4/ Analyse des sables de moulage :

Le moule contient 2 types de sable de moulage :

a) Sable de contact: c'est un mélange de :

- 33 % de vieux sable
- 40 % de sable neuf
- 25 % de clarsol
- 2 % d'eau

Perméabilité du sable : Pour déterminer la perméabilité du sable "méthode AFA", on confectionne une éprouvette de 50 mm de diamètre et de 50 mm de hauteur dont le serrage est réalisé par 3 corps de pilon d'un poids de 5 Kg qu'on laisse tomber librement d'une hauteur de 50 mm.

La quantité de sable utilisée est d'environ 150 g et doit être réglée de telle façon que l'éprouvette obtenue ait 50 mm de hauteur avec une tolérance de $\pm 2\%$.

La perméabilité est ensuite mesurée par chronométrage du temps nécessaire au passage à travers l'éprouvette de 2 litres d'air à une pression de 10 cm d'eau.

On note l'indice de perméabilité = 112.

Essai de compression : l'essai est effectué sur l'éprouvette décrite précédemment, on note : 128 g/Cm²

Essai de cisaillement : Cet essai est réalisé sur une éprouvette qui a déjà servi à la détermination de la perméabilité, le résultat est donné en g/Cm². On trouve : 95 g/Cm².

Humidité : Propriété très importante d'utilisation du sable. on dispose de 20 g de sable qu'on fait sécher en infrarouge, après séchage on pèse le sable. Le degré d'humidité est déterminée par :

$$\% \text{ Humidité} = \frac{m - m'}{m} \times 100 \%$$

m : masse du sable avant séchage .

m' : masse du sable après séchage .

$$\% \text{ humidité} = \frac{20 - 18.66}{20} \times 100 = 6.7 \%$$

Indice de finesse de sable :

Autre propriété importante du sable. On dispose de 50 g de sable étuvé qu'on verse dans des tamis de différents diamètres, on note :

Taille en mm	Poids (g)	K: Coef. multipl.	P % grains	Produit
1.40	0	6	0	0
1.00	0	9	0	0
0.71	0	15	0	0
0.50	0.32	25	0.64	16
0.35	7.38	35	14.76	516.6
0.25	26.23	45	52.46	2360.7
0.18	14.12	60	28.24	1694.4
0.125	1.37	81	2.74	221.94
0.09	0	118	0	0
0.063	0.12	164	0.24	39.36
Cuvette de fond	0.46	275	0.92	253
TOTAL	$\Sigma=50$ g			$\Sigma= 5102$

$$\text{Indice de finesse } I_f = \frac{(K.P.)}{\text{Poids}} = \frac{5102}{50} = 102$$

b/ Sable de remplissage :

Il est utilisé pour combler tout le volume du châssis.

Pour des raisons économiques, on utilise généralement en fonderie 50 à 90 % de sable vieux.

Les propriétés d'utilisation de ce sable, sont déterminées de la même manière que pour le sable de contact :

Perméabilité : on trouve 135.

Essai de compression : 790 g/cm².

Essai de cisaillement : 456 g/cm².

Humidité :

$$\% \text{ Humidité} = \frac{20 - 18.68}{20} \times 100 \% = 5.1 \%$$

non

Nature du sable	Poids éprouv. (g)	Perméabilité	compression (g/cm ²)	cisaillement (g/cm ²)	Humidité %
Vieux	150	135	790	455	5.1
Contact	150	112	128	95	6.7

5/ Modèle : Les modèles sont des éprouvettes sous forme de barreaux cylindriques de différents diamètres 10, 15, 22, 33, 50 mm avec une même longueur.

6/ Exécution du moule : Le moule étant en sable, les différentes phases de l'exécution du moule employé pour fabriquer les éprouvettes sont :

a/ Exécution du dessous de châssis : On pose le modèle sur un plateau à l'intérieur du châssis de dessous, on tamise du sable de moulage jusqu'à recouvrir le modèle et remplir le châssis, on racle l'excédent de sable et on le serre modérément, ensuite on retourne le châssis.

b/ Exécution du dessus de châssis : On soupoudre la surface de contact des deux parties du moule à l'aide de sable blanc sec, on exécute le canal de coulée, on place la deuxième partie du châssis sur la première, et on pique des trous d'air à l'aide d'une pointe.

Ensuite le moule est chargé et claveté pour éviter que le châssis supérieur ne se soulève sous la poussée du métal en fusion, puis l'étape de la coulée : le métal en fusion est versé dans le moule par le trou de coulée.

7/ Analyses de la fonte obtenue :

Pour déterminer les différentes températures caractéristiques de la fonte étudiée, on a fait couler une quantité liquide de celle-ci dans un petit creusé (pour essai) relié à un thermocouple. On note les résultats suivants :

- Température de coulée = 1350 °C
- Température liquidus = 1109 °C
- Température solidus = 1067 °C
- **Carbone Equivalent C_{eq} = 4,58 % (Fonte Hypereutectique)**

On note que la fonte utilisée pour cette expérience a été prélevée de la poche utilisée pour la coulée des éprouvettes.

Pour l'analyse chimique, le spectromètre a donné les résultats suivants :

C %	Si %	Mn %	S %	P %	Mg %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %	Pb %	Al %
3.30	3.5	.69	.217	.222	.008	.072	.101	.409	.25	.015	.000

B/ Techniques expérimentales :

1/ Micrographie :

La micrographie est l'examen au microscope de produits métallurgiques polis, attaqués par un réactif qui permet de différencier les constituants.

L'opération de micrographie comporte : le prélèvement de l'échantillon, son enrobage, son polissage, son attaque, son observation au microscope et sa photographie.

- Enrobage : l'échantillon est enrobé à froid avec la résine.

- Polissage : qui constitue à rendre la surface plane et brillante et ne présente aucune rayure susceptible de gêner l'observation microscopique.

Le polissage a été effectué avec du papier abrasif :

+ Polissage grossier avec papier émeri : 120 - 400 - 600

+ Polissage fin avec papier émeri : 1000.

+ Finition à l'aide d'un feutre, pâte diamantée et de lubrifiant.

- Attaque : après polissage, l'échantillon est attaqué à froid par un réactif qui est le Nital 5% pendant 15 secondes.

Le Nital agit par coloration superficielle différenciant ainsi les divers constituants.

- Examen microscopique et photographique : On se sert d'un appareil spécial qui comprend : microscope, un système d'éclairage avec source lumineuse, lentilles et un appareil photographique. Des photographies ont été prises sur les différents échantillons avec différents grossissements, avant et après attaque.

2/ Essais Mécaniques :

Les essais mécaniques ont pour but de déterminer un certain nombre de caractéristiques de la fonte grise.

- Dureté Brinell : On a souvent recours à l'essai de dureté parce qu'il est rapide, peu coûteux et non destructif. Il consiste à mesurer une empreinte laissée par un pénétrateur à la surface de l'échantillon étudié.

Dans l'essai Brinell courant, le pénétrateur est une bille de 10 ou 5 mm correspondant à des charges de 3000 et 750 Kg.

Pour des mesures précises, il faut faire la moyenne de plusieurs diamètres à l'aide d'une règle oculaire et lire la valeur de la dureté correspondante à chaque diamètre au moyen d'un tableau de conversion.

- Microdureté : Pour cet essai concernant des surfaces très petites on applique une charge de 100 g.

Le diamètre de l'empreinte, est mesuré à l'aide d'un microscope à oculaire micrométrique. Les valeurs de dureté (Hv) sont données à l'aide d'un tableau de conversion.

- **Essai de traction** : Il consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques. Les différentes éprouvettes destinées à cet essai sont usinées à partir de barreaux cylindriques bruts de coulée suivant la norme AFNOR : A32-101 concernant les fontes grises (voir fig. 2).

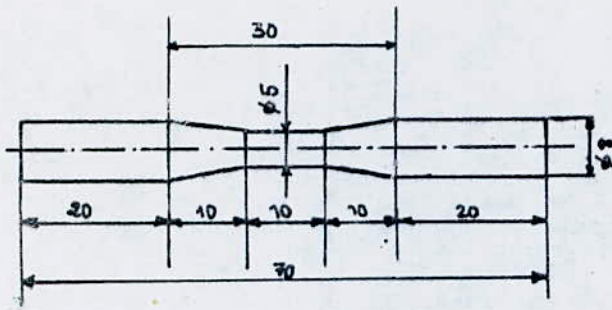
Diamètre brut de coulée (mm)	10	15	22	33	50
Diamètre éprouv. usinée (mm)	5	8	12.5	20	30

- **Essai de Résilience** : C'est un des moyens les plus classiques utilisé pour caractériser la fragilisation du métal sous l'action d'un choc réalisé sur une éprouvette entaillé. Il consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule une éprouvette entaillé en son milieu et reposant sur 2 appuis. On détermine l'énergie (W) absorbée dont on déduit la résilience.

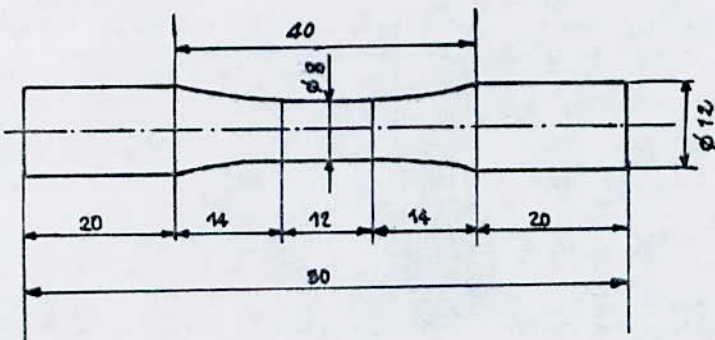
La résilience est l'énergie exprimée en Joules par cm², nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette.

L'éprouvette eu U est définie par la norme AFNOR : A03-156 concernant les fontes grises (voir fig. 3).

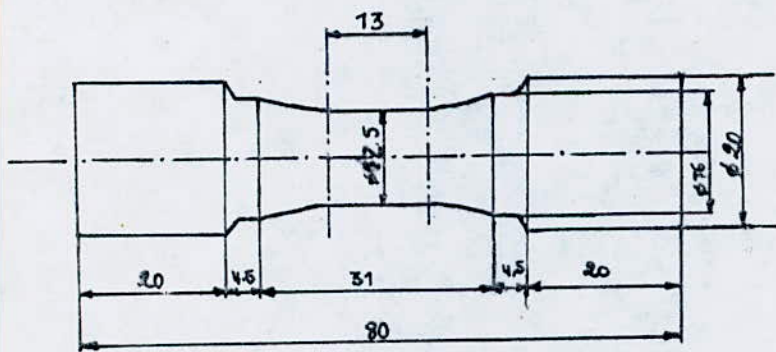
Fig(2): Eprouvettes Normalisées de Traction (A32-101)



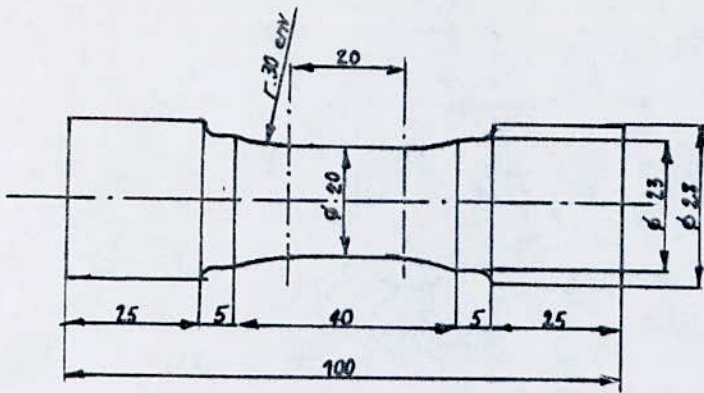
Eprouvette usinée à partir du barreau de 10 mm de ϕ .



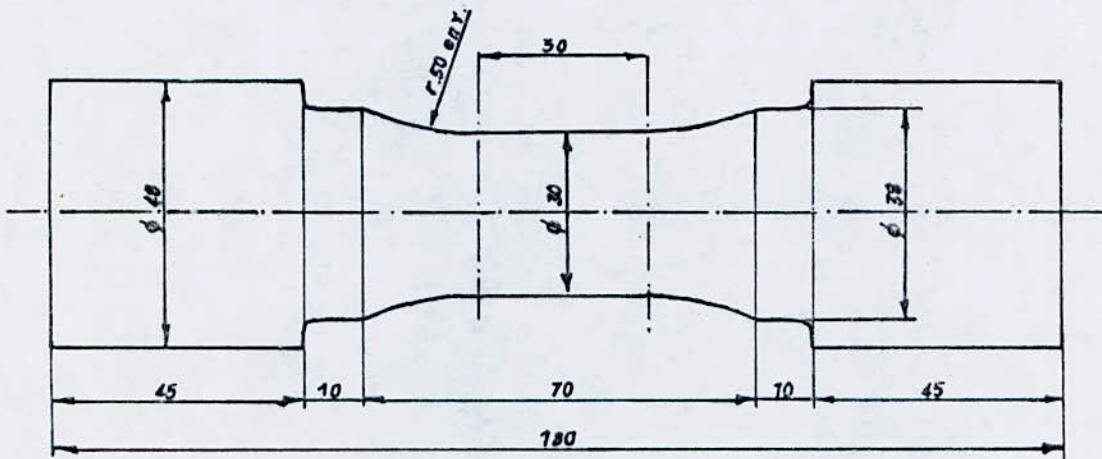
Eprouvette usinée à partir du barreau de 15 mm de ϕ .



Eprouvette usinée à partir du barreau de 22 mm de ϕ .

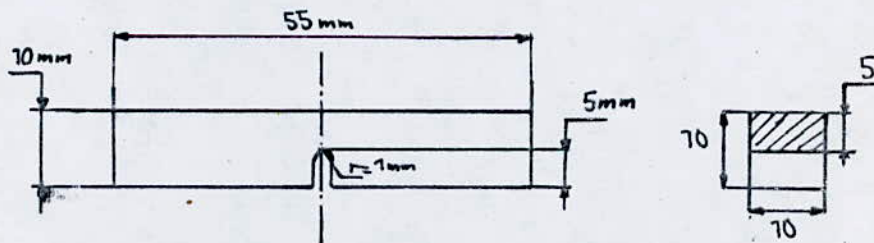


Eprouvette usinée a partir du barreau de 33 mm de ϕ .



Eprouvette usinée a partir du barreau de 50 mm de ϕ .

Fig (3) : Eprouvette Normalisée de Résilience (A03-156)



CHAPITRE II

Resultats et Interpretations

A/ Analyse micrographique :

a) Morphologie du graphite

Par analyse au microscope optique, grossissement 100, des différents échantillons polis sans attaque, la morphologie du graphite peut être mise en évidence.

Pour caractériser le graphite observé il est nécessaire de fournir des indications sur la forme, la répartition de la dimension des particules de graphite.

A cet effet, on a utilisé, respectivement dans l'ordre suivant, les chiffres romains pour la forme (voir planche 1), les lettres majuscules pour la répartition (voir planche 2), et les chiffres Arabes pour la dimension (voir planche 3), après la prise de photos de chaque échantillons (Fig.1), leur analyse et en se référant à la norme "AFNOR A32-100",

On dresse le tableau suivant donnant l'épaisseur des échantillons en fonction de la morphologie du graphite.

!Epaisseurs ! mm	10	15	22	33	50
!Morphologie					
!Forme-	I	I	I	I	I
! --	II	II	II	II	II
!Répartition	A	A	A	C	C
!Dimension	5	4	4	3	3

Désignation des mesures

N°	1	2	3	4	5	6	7	8
Longueur en mm	100	50 à 100	25 à 50	12 à 25	6 à 12	3 à 6	1.5 à 3	1.5
(Lamelles)								

b/ Analyse Matricielle

En examinant la matrice de chaque éprouvette bien polie et attaquée au Nital au microscope optique (voir Fig 2).

On remarque la présence de différentes structures à savoir:

Le graphite

La perlite

et quelques îlots d'eutectique phosphoreux et de ferrite.

Le tableau ci-dessous donne les épaisseurs des parois des éprouvettes fonction de la structure

Epaisseur éprouvettes (mm)	10	15	22	33	50
Structures	Graphite	Graphite	Graphite		
Correspond-	+Perlite	+ Perlite	+Perlite	//	//
	+	+	+ Ferrite		
	Eutectique phosphoreux	Eutectique phosphor..	Eutectique phosphoreux		

Interprétation

La cristallisation du graphite prend des formes assez compliquées, mais leur section par le plan d'une coupe les visualise sous la forme de lamelles.

D'après les résultats obtenus, on remarque que les lamelles de graphite sont plus longues, plus larges et plus espacées à mesure que l'on se rapproche de la forte section, et au contraire elles sont plus fines et serrées pour les petites sections.

Comme dans le milieu industriel en caractérise la vitesse de refroidissement par l'épaisseur des parois des pièces, celles-ci varient bien en sens inverse, d'où un processus de graphitisation plus complet pour un refroidissement lent pour les différentes épaisseurs, en remarque la présence d'un graphite sous de rosette déchiquetées (forme II) du à l'effet du principal poison (impureté) à savoir le **Pb**, celui-ci dépasse le taux maximal tolérable qui est de 0,0020 % .

- Comme le taux d'impuretés admissibles dans les moulages fins plus grands que dans les moulages épais, il en résulte une diminution du nombre de rosettes déchiquetées en évaluant dans le sens des grandes épaisseurs.

- Pour les épaisseurs 10 - 15- 22 mm , en remarque une distribution normale : Répartition A du a une surfusion notable autrement dit à un refroidissement plus rapide .

- Pour les épaisseurs 33 et 50 mm, le graphite se présente sous forme de lamelle grossières et en amas: Répartition C . Ceci ayant pour origine la forte teneur en silicium. Cette distribution étant la caractéristique des fontes hypereutectique



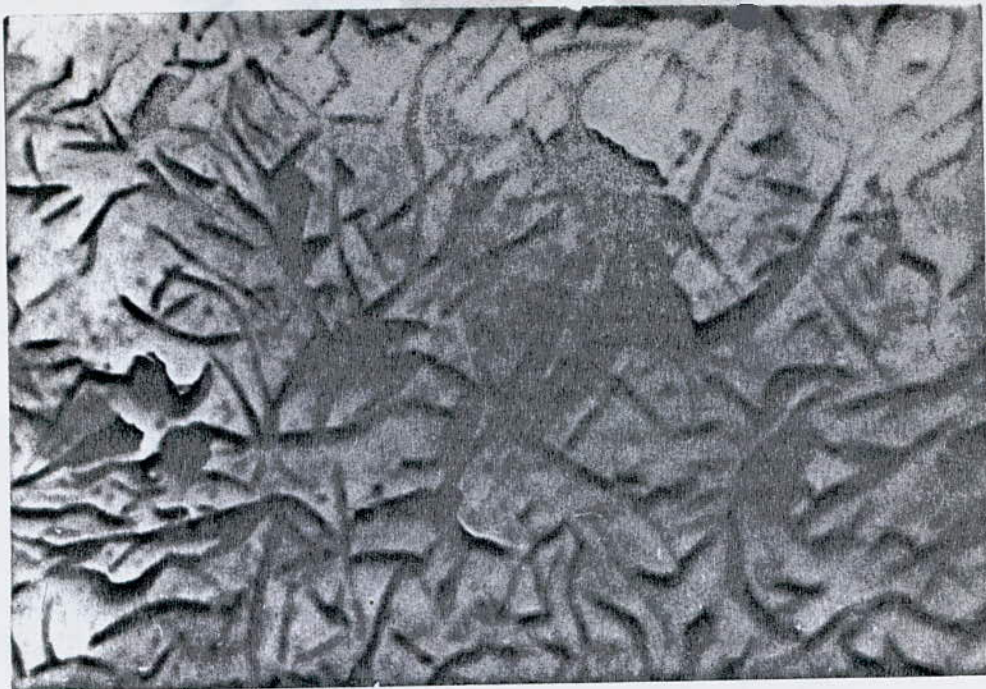
$\varnothing = 10 \text{ mm}$
Forme : I, II
Répartition : A
Dimension : 5



$\varnothing = 15 \text{ mm}$
Forme : I, II
Répartition : A
Dimension : 4



$\varnothing = 22 \text{ mm}$
Forme : I, II
Répartition : A
Dimension : 4



$\varnothing = 33 \text{ mm}$

Forme : I, II

Répartition : C

Dimension : 3



$\varnothing = 50 \text{ mm}$

Forme : I, II

Répartition : C

Dimension : 3

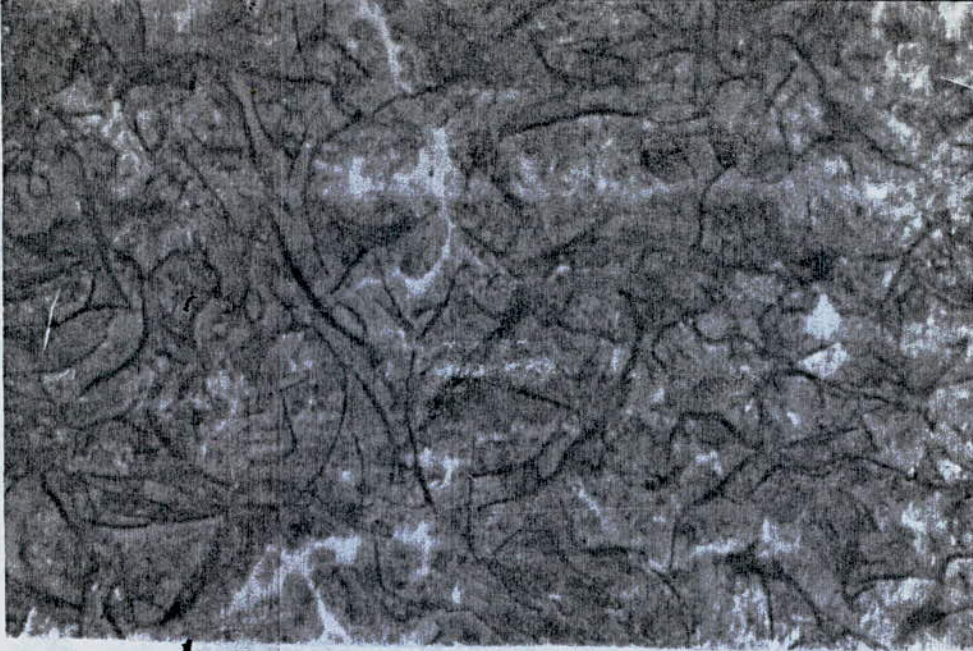
L'examen micrographique après attaque au Nital des structures correspondantes aux éprouvettes de dimensions 10 et 15 mm révèle une présence importante de graphite et de perlite avec quelques îlots d'eutectique phosphoreux .

Puis l'apparition de quelques plages de ferrite pour les dimensions 22 , 33 et 50 mm en plus des structures observées précédemment. ceci vérifie en partie les graphes décrits dans la partie théorique (voit Fig 3).

Pour une même teneur combinée en carbone et en silicium et en augmentant les dimensions des épaisseurs des parois des pièces, donc pour un refroidissement de plus en plus lent, il y a apparition de quelques îlots de ferrite.

D'après la figure, on devrait s'attendre à l'apparition d'une structure de fonte grise à matrice ferritique pour les dimensions 22, 33 et 50 mm, mais difficile à obtenir à l'état brut coulée, car le refroidissement très lent nécessaire est une limite difficile à atteindre en fonderie même avec des moules en sable bien calorifuges.

La présence d'îlots d'eutectiques phosphoreux peut-être expliqué par la forte teneur en phosphore, celle-ci, dépassant les 0,2 %, entraîne la formation des inclusions solides dures de Fe₃P (Austénite) .



$\phi = 10 \text{ mm}$

Structures :

Perlite
graphite
eutectique
phosphoreux



$\phi = 15 \text{ mm}$

Structures :

Perlite
graphite
eutectique
phosphoreux

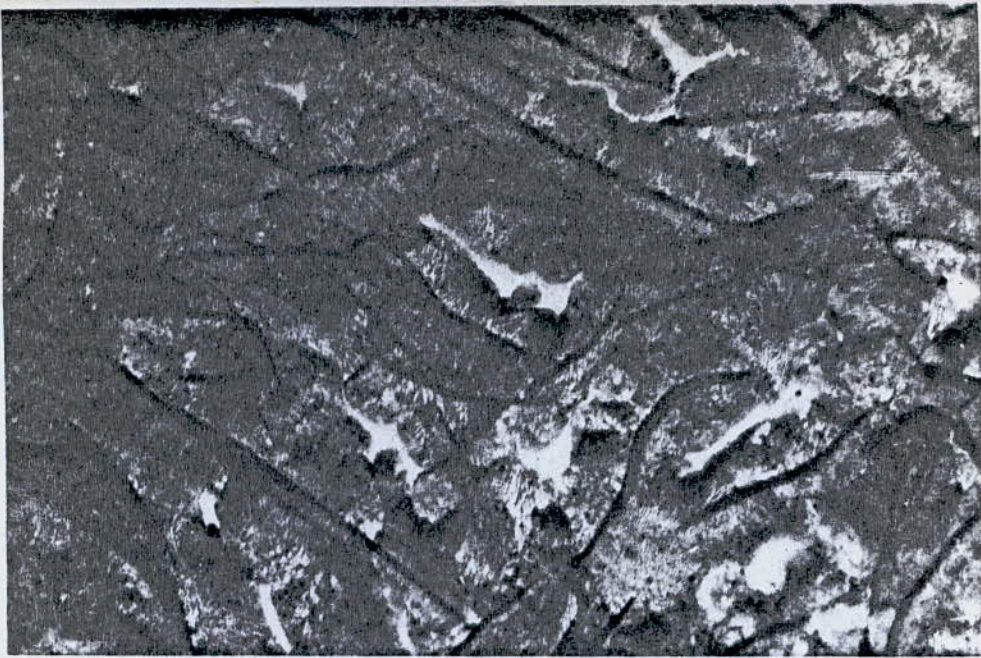


$\phi = 22 \text{ mm}$

Structures :

Perlite
graphite
eutectique
phosphoreux
ilots de ferrite

FIG (2) : G x 250 Attaque au Nital



$\varnothing = 33 \text{ mm}$

Structures :

Perlite

graphite

eutectique

phosphoreux

ilots de ferrite

$G \times 500$



$\varnothing = 50 \text{ mm}$

Structures

Perlite

graphite

eutectique

phosphoreux

ilots de ferrite

$G \times 500$

B/ Essai de traction

L'ensemble des résultats obtenus est résumé dans le tableau suivant :

Epaisseur	Limite d'élasticité (dan / mm ²)	Résistance de la traction (dan / mm ²)
10	21.20	22.38
15	18.90	20.65
22	15.35	17.05
33	16.00	17.28
50	12.3	14.15

D'après le tableau précédent, le module d'élasticité pour ces éprouvettes de composition chimique identique, varie selon l'épaisseur, cette variation est dû à l'influence notable de la vitesse de refroidissement sur le graphite .

La courbe de la Fig 3 indique la variation de la résistance à la traction en fonction de l'épaisseur des éprouvettes .

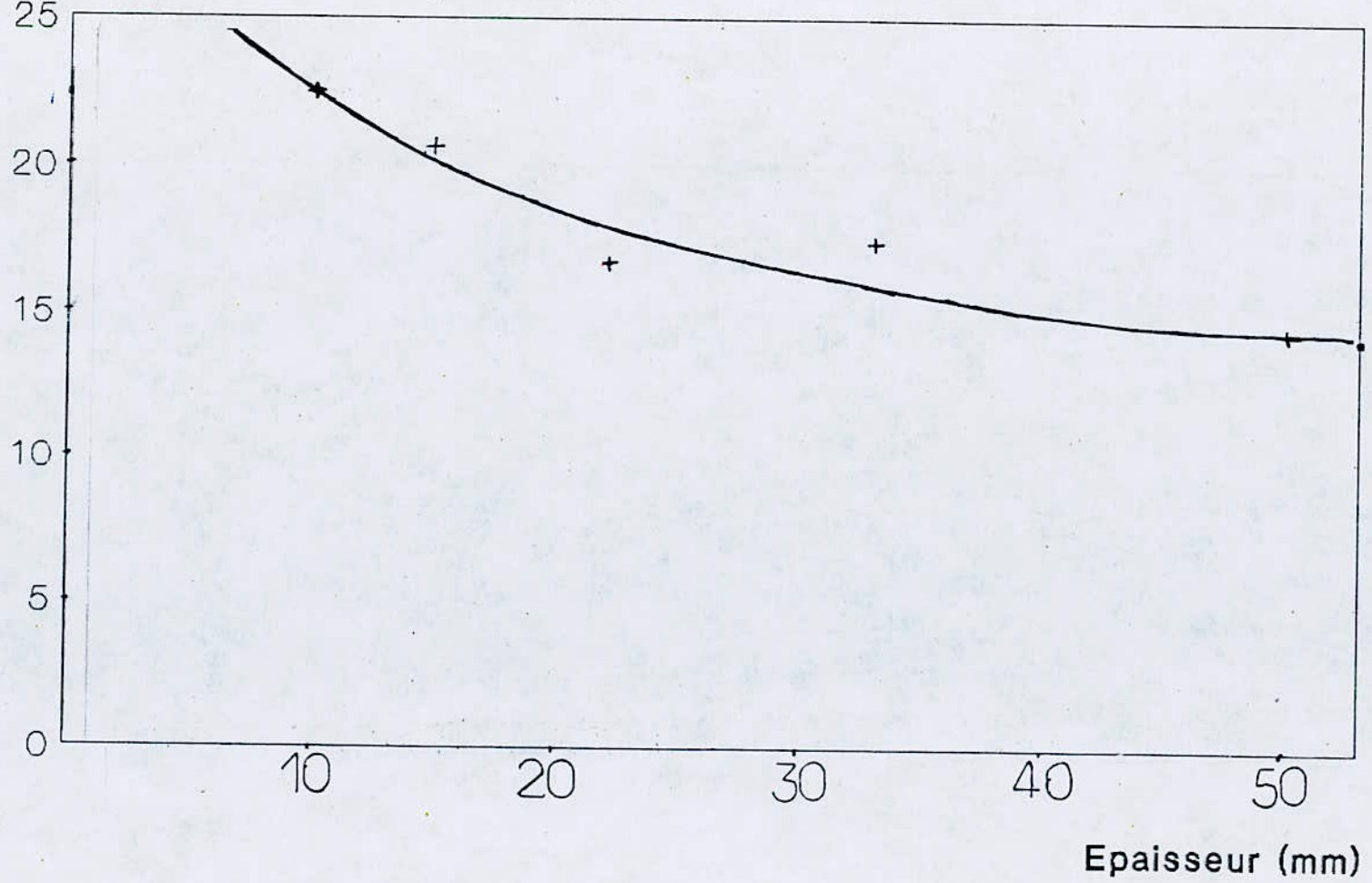
Cette variation montre qu'à l'état brut de coulée, la résistance à la traction augmente avec la diminution des épaisseurs; elle va de 14.15 dan / mm² pour l'éprouvette de 50 mm à 22.38 dan/mm² pour l'éprouvette de 10 mm .

Puisque l'épaisseur de l'éprouvette est reliée à la vitesse de refroidissement, et comme la vitesse de refroidissement influe à la fois sur le graphite et sur la structure de la matrice; en effet, la résistance à la traction de la fonte grise est d'autant plus importante que les lamelles de la perlite sont plus fines et la taille des inclusions graphitiques est plus petite et plus isolées il s'ensuit une plus grande résistance en évoluant dans le sens des petites éprouvettes .

La présence du graphite de type C diminue les caractéristiques en traction en particulier la résistance à la traction et le module d'élasticité .

ESSAI DE TRACTION

Résistance à la traction (daN/mm²)



C/ Essai de dureté Brinell :

Pour obtenir des mesures précises sur la dureté, nous avons pris la moyenne de 3 essais pour chaque échantillon, et cela en mesurant à chaque fois le diamètre de l'empreinte à l'aide d'une réglette oculaire, puis à l'aide d'un tableau de correspondance, nous lisons directement la dureté correspondante.

L'ensemble des résultats obtenus est résumé dans le tableau suivant :

Epaisseur (mm)	Dureté hb
10	210
15	200
22	188
33	172
50	156

Les valeurs obtenus sont rapportées dans un graphe indiquant les variations de la dureté Brinell en fonction des épaisseurs des éprouvettes (Fig. 4).

L'allure de la courbe dureté Brinell en fonction de l'épaisseur montre qu'à l'état brut, la dureté Brinell diminue avec l'augmentation de l'épaisseur des éprouvettes; en effet, la dureté passe de 218 HB pour l'épaisseur de 10 mm à 156 HB pour l'épaisseur de 50 mm.

En résumé, la dureté HB est d'autant plus élevée que l'épaisseur des éprouvettes est plus faible.

Les variations des duretés mesurées sont dues essentiellement à l'influence de la vitesse de refroidissement sur la structure; en effet, la distance interlamellaire de la perlite qui est fonction de l'influence du mode de refroidissement provoque ces différences de dureté.

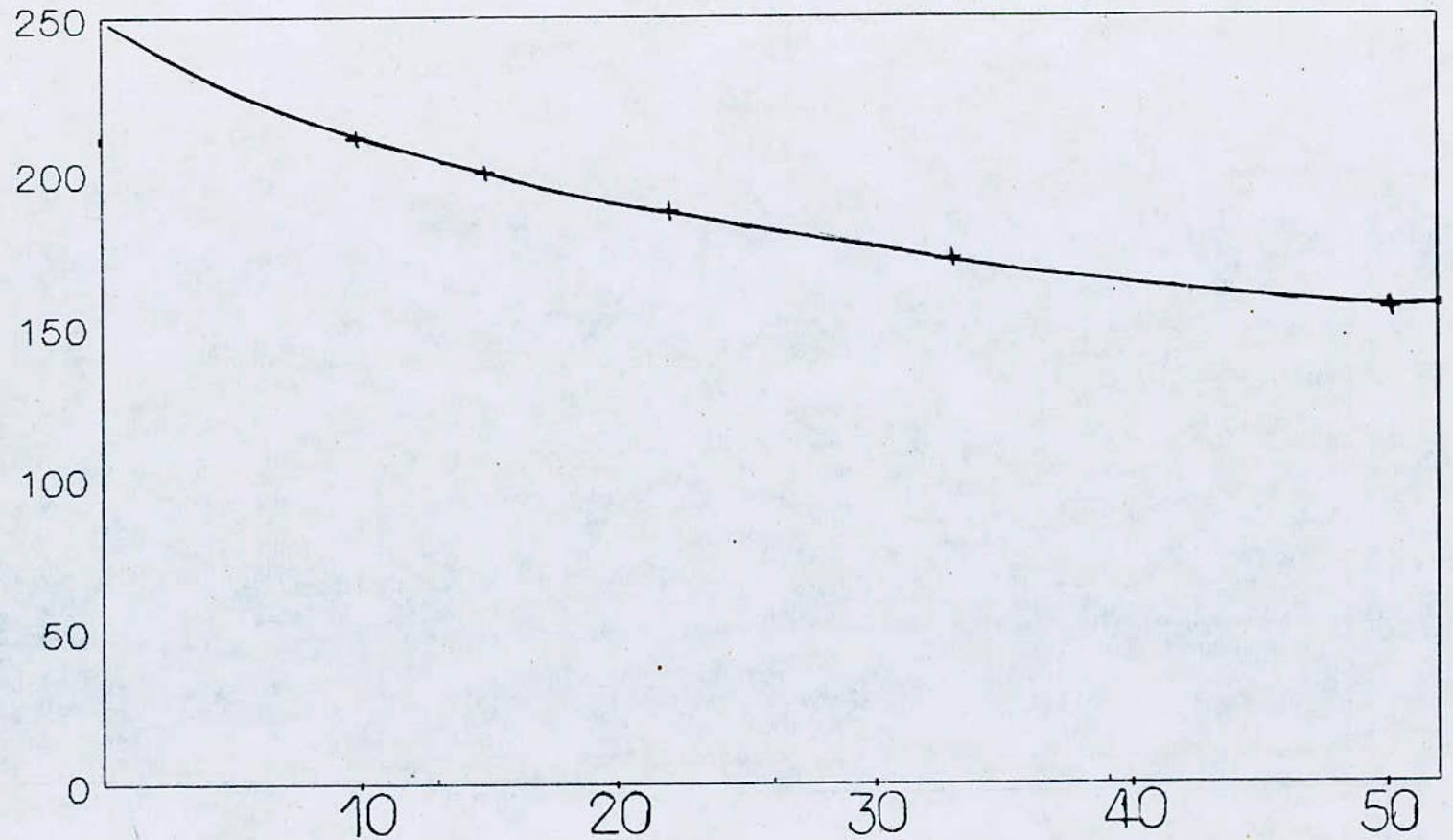
La dureté augmente avec la finesse des lamelles de la perlite, et comme les dimensions des lamelles de perlite augmente en évoluant dans le sens croissant des épaisseurs (vitesse de refroidissement devient faible), il s'ensuit que la dureté diminue dans ce sens.

La dureté Brinell donne des résultats globaux qui caractérisent surtout la structure de la matrice, alors que l'influence de la répartition du graphite est relativement peu importante.

En résumé, la dureté Brinell est influencée par la teneur en carbone combiné et par la distance interlamellaire des constituants de la perlite.

ESSAI DE DURETE

Durete (hb)



Epaisseur (mm)

D/ Microdureté

La dureté vikers a été mesurée de la surface au coeur de chaque éprouvette avec un pas de 0.5 mm. Les résultats sont représentés dans les tableaux ci-dessous.

Ensuite, les graphes ont été établis pour observer l'évolution de cette microdureté en fonction de la profondeur des éprouvettes (Fig.5,6,7,8,9).

En examinant l'allure des graphes des différents échantillons de 10 à 50 mm, on remarque une diminution notable de la dureté de la surface au coeur de chaque des éprouvette, ceci s'explique par le fait que la dureté est essentiellement influencée par la structure de la matrice et par la morphologie du graphite autrement dit grandeur et dispersion des lamelles de graphite.

Pour les éprouvettes de 10 , 15 mm, on est en présence d'une forte quantité de perlite, d'où une dureté de l'ordre de 250..Hv les lamelles de graphite étant très fines et dispersées, la dureté due au graphite est négligeable, la présence d'eutectique phosphoreux donne une dureté de l'ordre de 390 Hv.

Pour les éprouvettes de 22,33,50 mm, on remarque une diminution plus importante de la dureté au ~~coeur~~ due à la présence d'un graphite plus grossier favorisé par la diminution de la vitesse de refroidissement en évoluant dans le sens des grandes épaisseurs , on remarque aussi une présence plus importante d'eutectique phosphoreux traduisant ainsi une dureté de l'ordre de 400 Hv, et une présence majoritaire de plages de perlite, la présence de quelques îlots de ferrite donne dureté de l'ordre de 90 Hv.

Microdureté - Epaisseur : 10 mm

Distance (mm)	1/10	5/10	10/10	15/10	20/10	25/10	30/10	35/10	40/10	45/10	50/10	55/10	60/10	65/10	70/10
Dureté (Hv)	351	237	220	228	206	237	191	254	199	237	220	228	322	245	193

Distance (mm)	75/10	80/10	85/10	90/10	95/10	99/10
Dureté (Hv)	245	220	213	193	220	206

Microdureté - Epaisseur : 15 mm

Distance (mm)	1/10	5/10	10/10	15/10	20/10	25/10	30/10	35/10	40/10	45/10	50/10	55/10	60/10	65/10	70/10
Dureté (Hv)	254	383	245	237	206	228	220	206	401	110	237	228	397	206	198

Distance (mm)	75/10	80/10	75/10
Dureté (Hv)	370	170	165

Microdureté - Epaisseur : 22 mm

Distance (mm)	1/10	5/10	10/10	15/10	20/10	25/10	30/10	35/10	40/10	45/10	50/10	55/10	60/10	65/10	70/10
Dureté (Hv)	254	245	237	264	237	206	366	213	135	220	366	103	420	100	113

Distance (mm)	75/10	80/10	85/10	90/10	95/10	100/10	105/10	110/10
Dureté (Hv)	193	206	383	193	187	254	237	228

Microdureté - Epaisseur : 33 mm

Distance (mm)	1/10	5/10	10/10	15/10	20/10	25/10	30/10	35/10	40/10	45/10	50/10	55/10	60/10	65/10	70/10
Dureté (Hv)	237	220	116	193	170	171	229	176	165	383	237	181	110	206	105

Distance (mm)	75/10	80/10	85/10	90/10	95/10	100/10	105/10	110/10	115/10	120/10	125/10	130/10	135/10	140/10	145/10
Dureté (Hv)	103	100	193	187	170	165	420	170	98	160	165	401	373	109	156

Distance (mm)	150/10	155/10	160/10	165/10
Dureté (Hv)	264	98	147	150

Microdureté - Epaisseur : 50 mm

Distance (mm)	1/10	5/10	10/10	15/10	20/10	25/10	30/10	35/10	40/10	45/10	50/10	55/10	60/10	65/10	70/10
Dureté (Hv)	237	206	160	254	177	237	220	143	264	245	274	297	373	237	220

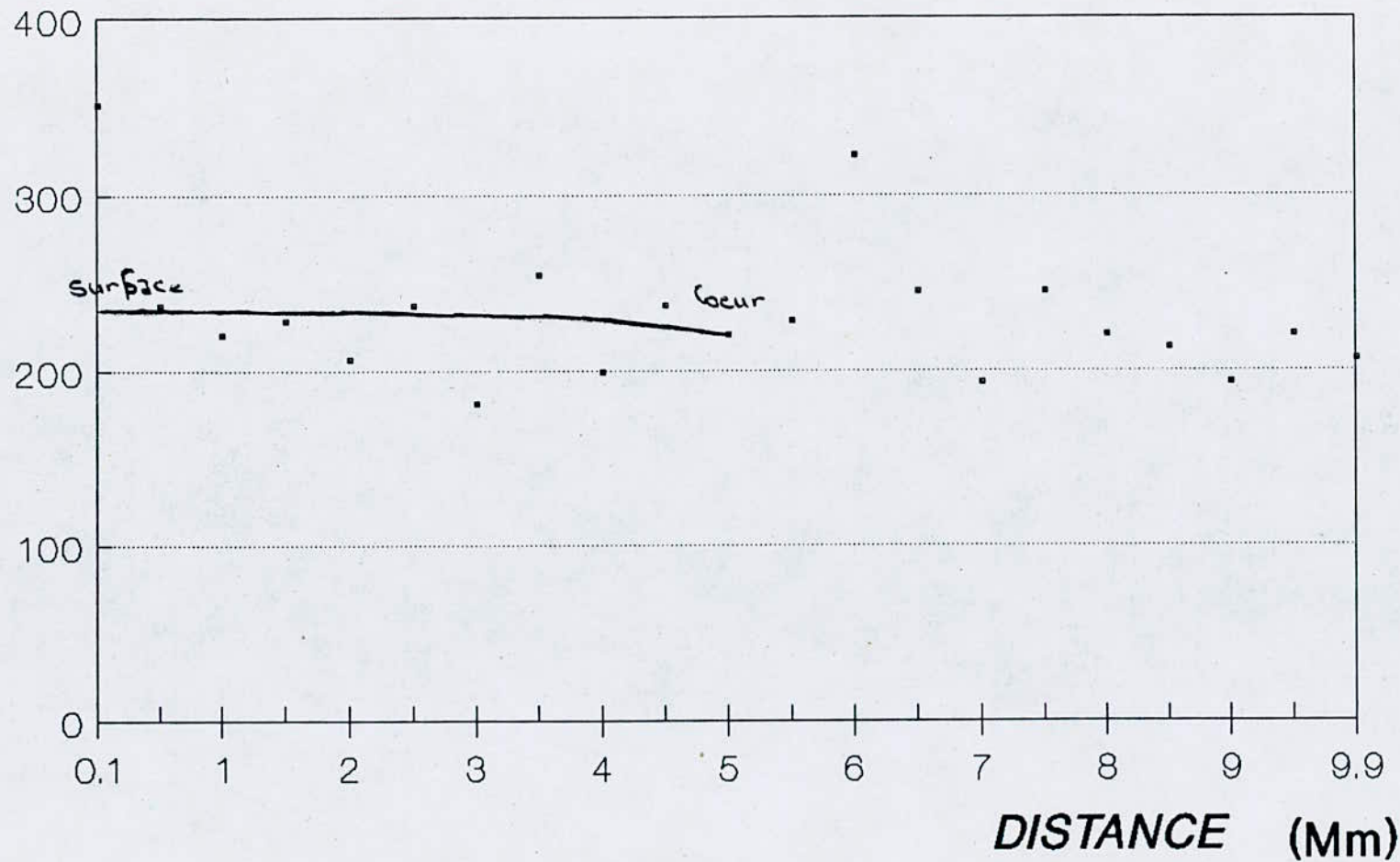
Distance (mm)	75/10	80/10	85/10	90/10	95/10	100/10	105/10	110/10	115/10	120/10	125/10	130/10	135/10	140/10	145/10
Dureté (Hv)	297	273	760	170	705	710	708	322	760	100	170	157	187	98	703

Distance (mm)	150/10	155/10	160/10	165/10	170/10	175/10	180/10	185/10	190/10	195/10	200/10	205/10	210/10	215/10	220/10
Dureté (Hv)	116	193	206	128	366	357	125	274	240	177	206	193	143	139	728

Distance (mm)	225	230	235	240	245	250
Dureté (Hv)	132	135	116	113	110	106

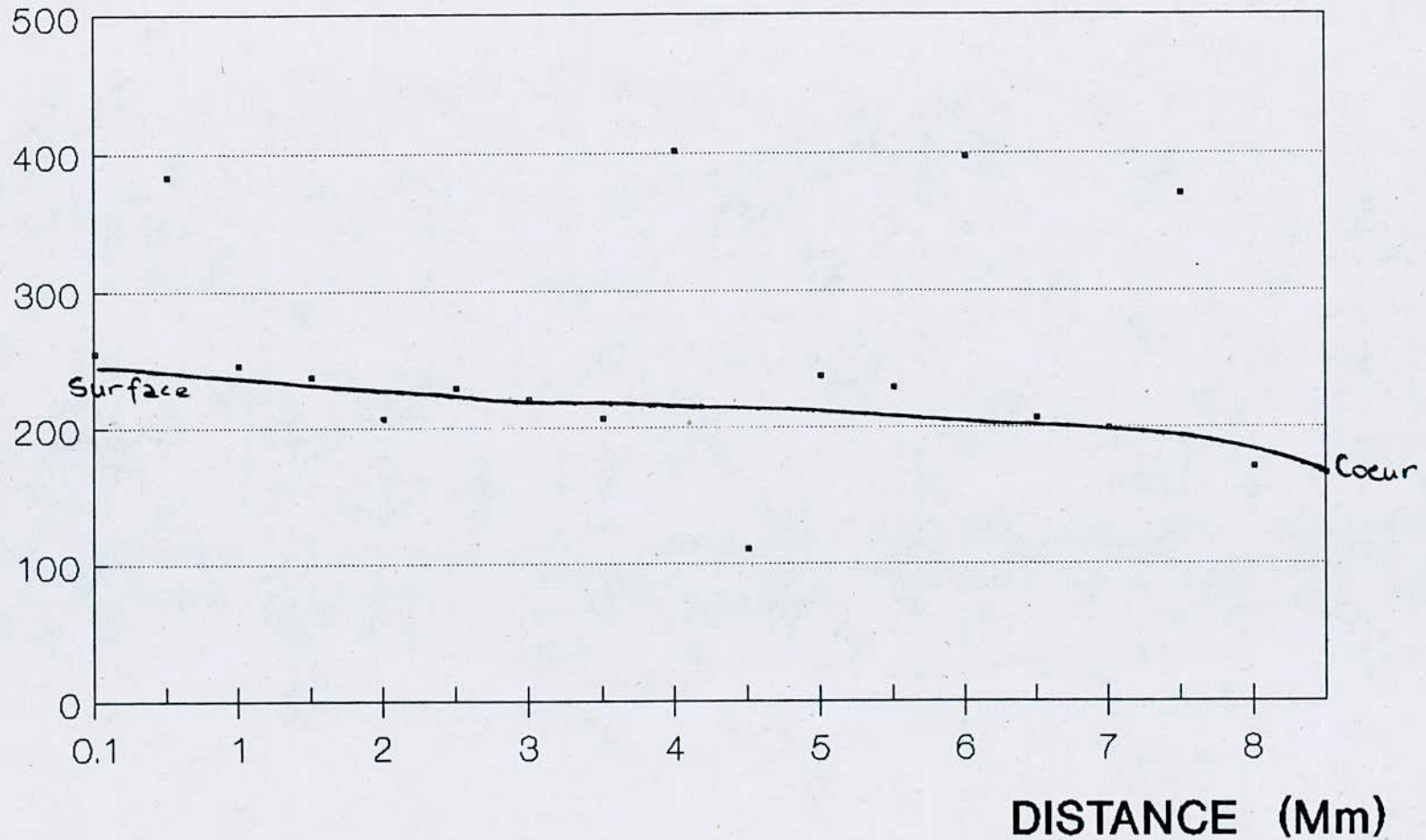
MICRODURETE - EPAISSEUR 10 mm

DURETE (Hv)



MICRODURETE -EPAISSEUR 15 mm

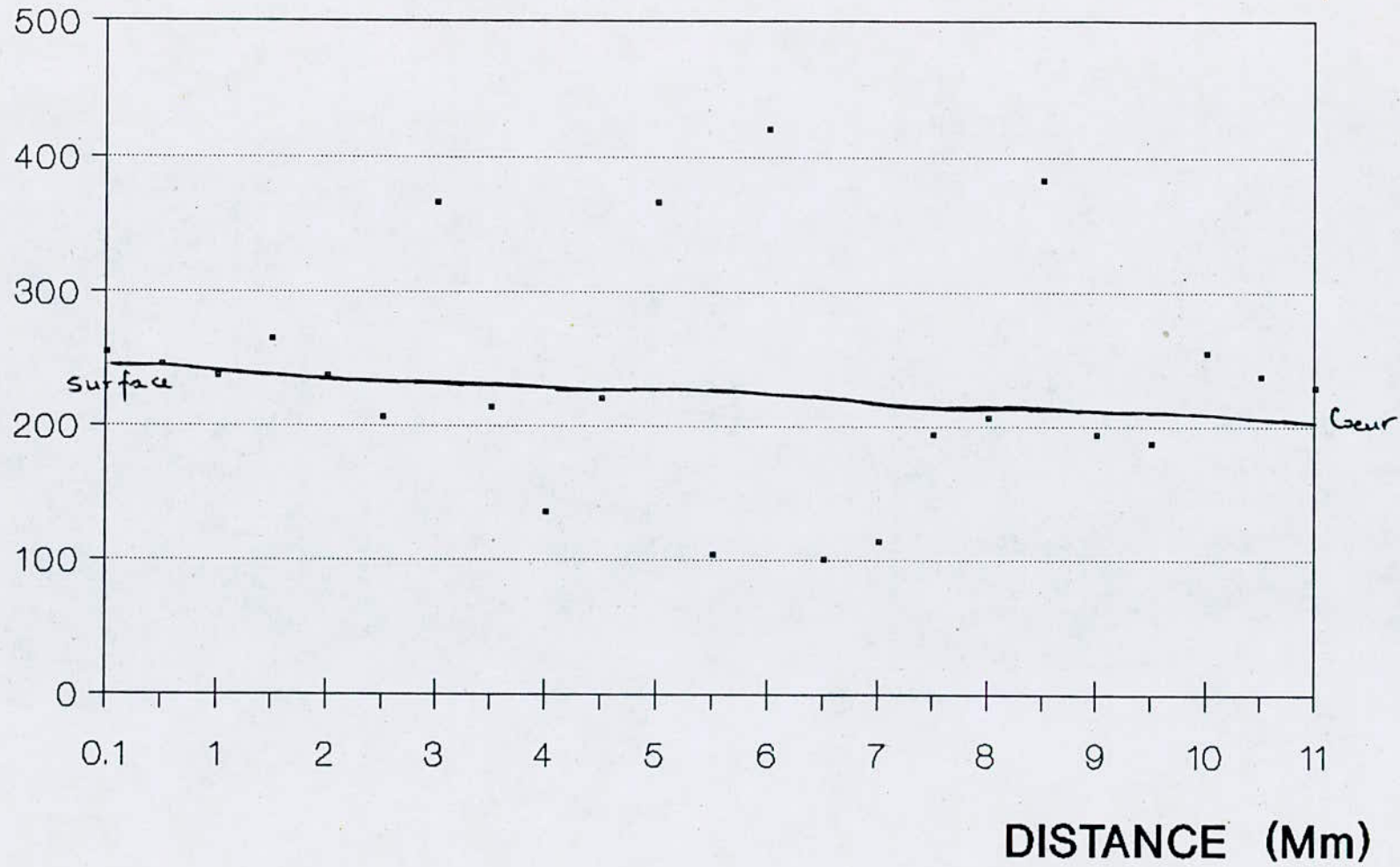
DURETE (Hv)



62

MICRODURETE -EPAISSEUR 22 mm

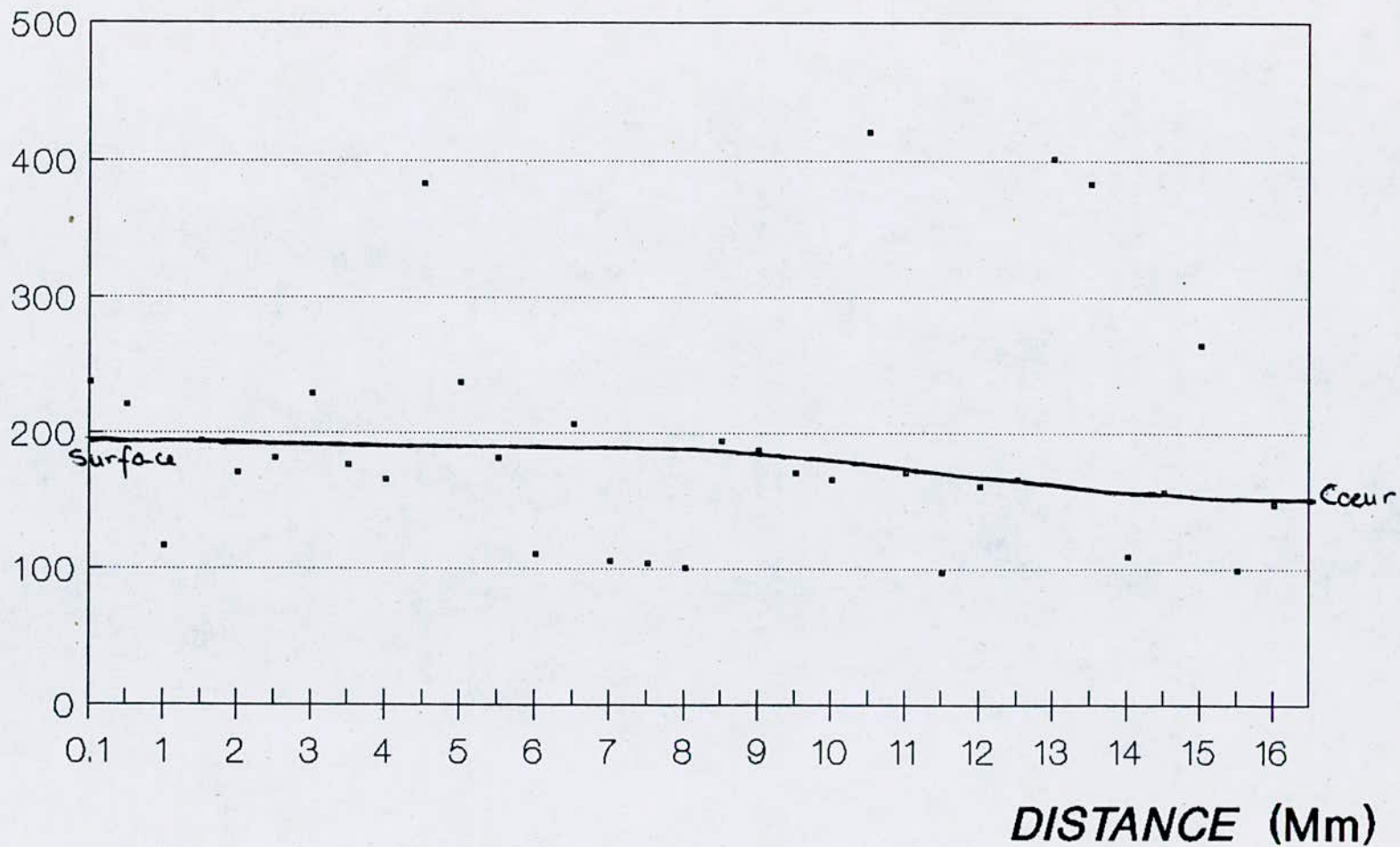
DURETE (Hv)



63

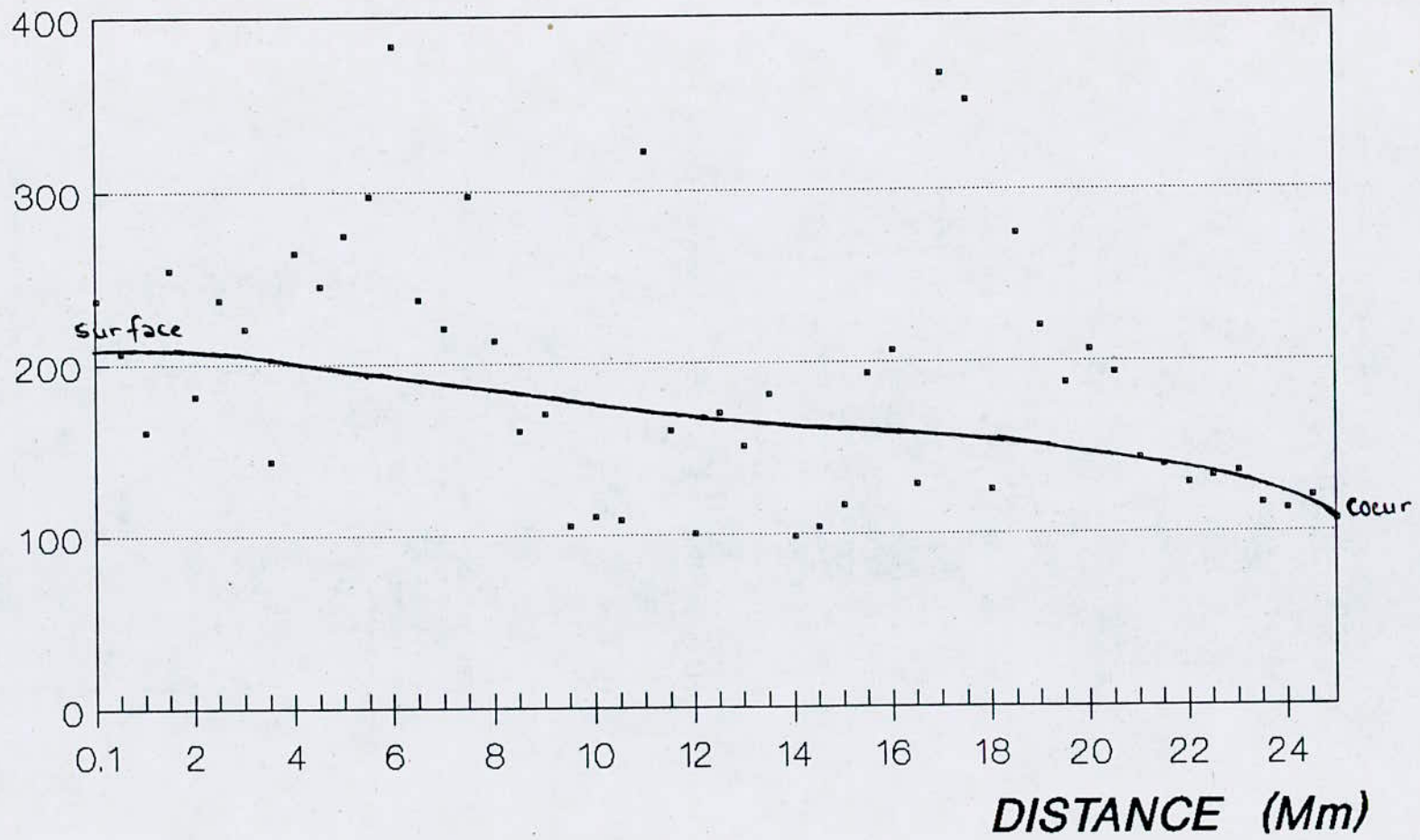
MICRODURETE -EPAISSEUR 33 mm

DURETE (Hv)



MICRODURETE -EPAISSEUR 50 mm

DURETE (Hv)



E / Essai de résilience :

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenue :

O (mm) Eprouvette Normalisée	Angle O	W (absorbé) (daj)	K(daj/cm ²)
10	154	0.62	1.24
15	153	0.74	1.48
22	153.3	0.68	1.38
33	154	0.62	1.24
50	154	0.62	1.24

En traçant le graphe donnant les variations de la résistance au choc (résilience) en fonction de l'épaisseur des éprouvettes, on constate que la résilience est généralement faible et varie peu (légèrement selon ces épaisseurs, Fig 10) .

Ceci est dû à la structure, car plus elle est résistante, plus elle est fragile. Cette fragilité s'explique par le fait que les paillettes de graphite sont des sources de concentration de contraintes en leurs extrémités pointue, d'où risque d'amorçage de rupture.

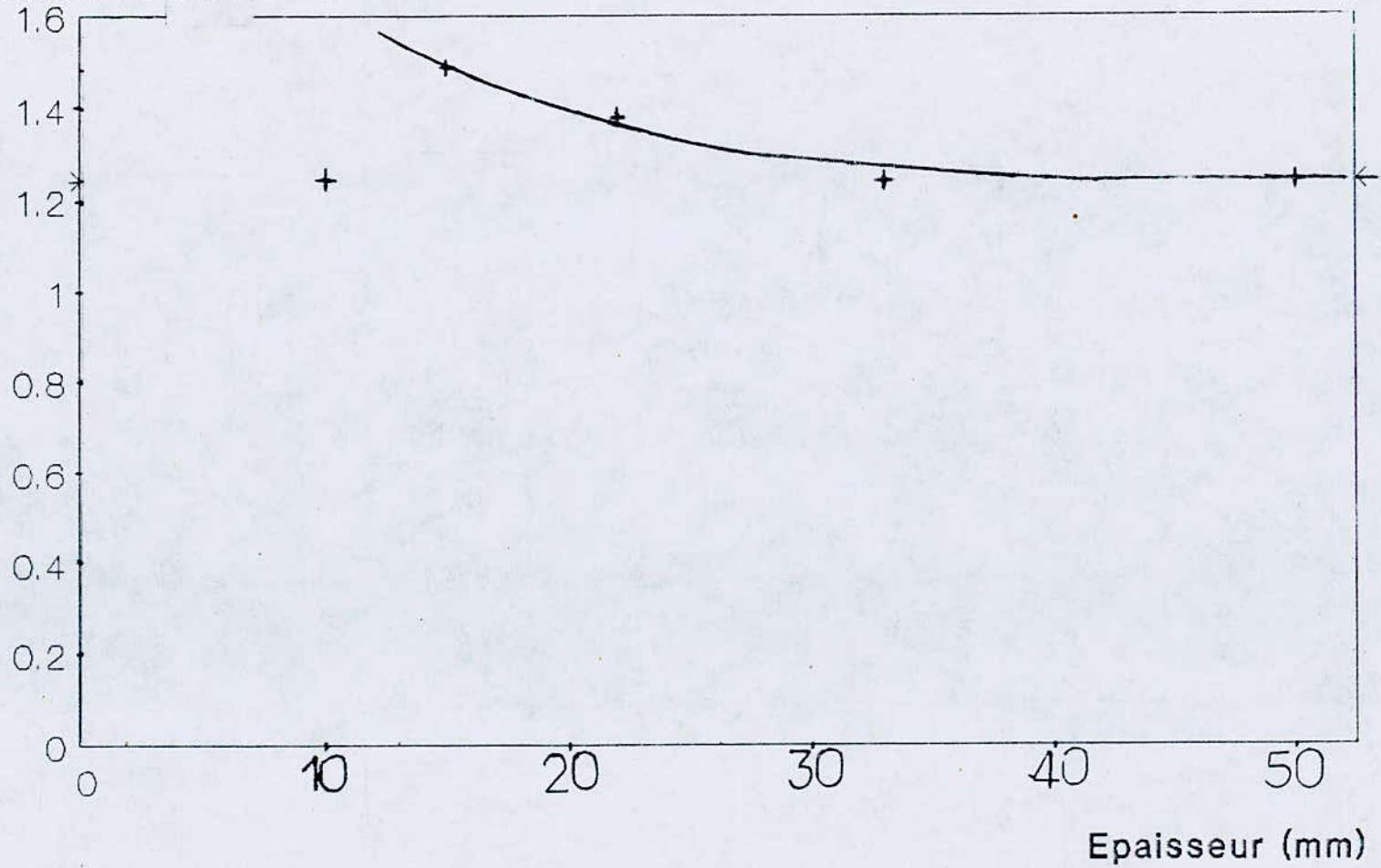
La présence d'eutectique phosphoreux provoque, aussi, la fragilité de la fonte grise.

L'amorçage ayant lieu, la rupture se propage aisément de lamelle en lamelle .

Il faut noter aussi que l'essai de résilience sur barreaux est imprécis et eutaché d'erreur. L'erreur semble prévenir

ESSAI DE RESILIENCE

Resilience (daj/cm^2)



principalement du travail absorbée par la projection des morceaux après rupture, travail négligé pour l'évolution^a de la résilience.

F/ Retrait :

Après refroidissement dans le moule, on retire les éprouvettes. Après examen et mesures, on calcul le retrait linéaire et volumique les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant.

Lm : longueur du module (mm)	184	184	184	184	184
Le : Longueur l'éprouvette (mm)	182.5	182.5	182.6	182.7	182.8
Ø m : Diamètre du modèle (mm)	10	15	22	33	50
Ø e: Diamètre de l'éprouvette (mm)	9.7	14.7	21.8	32.8	49.9
Vm : Volume du modèle (mm ³)	14451.3	32515.5	69944.4	157374.9	361283.2
Ve : Volume l'éprouvette (mm ³)	13486.4	30973.3	68155.9	154374.7	357492.7
Rv : Retrait volumique (%)	6.68	4.74	2.55	1.91	1.05
Rl : Retrait linéaire (%)	8.21 8.5	8.21	7.63 7.60	7.2 7.04	6.5

On remarque que le coefficient de retrait linéaire approche celui décrit dans la partie théorique, autrement dit le retrait est plus important pour des éprouvettes épaisses, ceci est dû à la différence de vitesse de refroidissement.

Après l'observation des éprouvettes, on remarque la présence de 4 types de défauts:

1ère type de défaut : la retassure qui est caractérisée par une cavité interne. Elle est tapissée de dendrites de solidification sous forme d'arborescences plus ou moins fines.

Elle se trouve répartit sur toute la hauteur des éprouvettes de 10 et 15 mm, car la solidification se fait à une allure tellement rapide que la fonte n'a pas le temps de descendre à l'intérieur des éprouvettes et de rejeter aussi la cavité vers le haut .

Les grandes éprouvettes accusent dans leur cassure des taches noires qui sont des petites retassures. L'importance du vide dépend de l'importance de la quantité de fonte liquide emprisonnée au moment où les surfaces isothermes de solidification se renferment sur elles même.

2ième type de défaut : La porosité spongieuse, plus importante dans le cas des grandes éprouvettes. Ce défaut est dû à l'action combinée du retrait (hétérogénéité dans le refroidissement provoquée par un mauvais séchage du moule) autrement dit par l'humidité du sable qui dépasse l'humidité tolérée qui est de 6 %.

3ième type de défaut : Le gaugissement^{ch} défaut de non conformité de l'éprouvette au plan, provoqué par un mauvais centrage des chassiss inférieur et supérieur.

4ième type de défaut : Tension interne due aux inégalités des épaisseurs entraînant ainsi une hétérogénéité dans le refroidissement :

Les parties massives restent chaudes pendant un temps plus long par rapport à celle qui sont minces, donc elles effectuent leur retrait avec un certain retard, il en résulte à tous les stades de refroidissement des différences dans la valeur du retrait d'une partie de l'éprouvette alors que d'autres se trouvant dans le voisinage immédiat des premiers sont sollicités dans un autre sens par le retrait d'une autre partie.

Tous ces efforts élémentaires sur chaque grain s'ajoutent ou se contrarient pour former un système de sollicitations internes auxquelles l'éprouvette entière est soumise.

CONCLUSION

La sensibilité à l'épaisseur est une notion fondamentale pour les fontes grises, qu'il s'agisse de la structure, de retrait ou des caractéristiques mécaniques.

La structure et les propriétés mécaniques ne varient pas seulement d'un point à un autre dans une même section, mais encore d'une éprouvette d'un certain diamètre à une éprouvette d'un autre diamètre en raison d'une différence de la cinétique de refroidissement.

Du point de vue métallographique, il s'agit d'une anisotropie du graphite et de la matrice.

Le retrait varie dans le même sens que la diminution de l'épaisseur aussi faut-il y remédier aux défauts qu'il engendre par :

- séchage du moule.
- adoption d'une coulée régulière.
- prévision d'un système d'attaque convenable.
- centrage des chassis.

Pour diminuer les tensions internes, on prévoira un traitement thermique à savoir le recuit de relaxation des contraintes.

Les constituants micrographiques des fontes grises agissent respectivement sur les propriétés mécaniques.

- Le graphite sur le module d'élasticité.
- La matrice sur la dureté Brinell, ductilité.
- Le graphite et la matrice sur la résistance à la traction.

S'il s'agit de déterminer les caractéristiques d'une fonte destinée à un usage particulier, on distinguera dans chaque cas les caractéristiques de la matrice d'une part et celles provenant de la morphologie du graphite d'autre part.

Bibliographie

1. *Techniques de l'ingenieur.*
M 760
2. *Precis de metallurgie.*
3. *Precis de metallurgie appliquee.*
Andre Roos - Bernard Milet
4. *Metaux et Alliages.*
Tome 2 ; LEIRIS
5. *Manuel des fontes moulees.*
Centre des fontes moulees.
6. *Metallographie et traitement thermiques des metaux.*
Lakhtine Louri.
7. *Metallurgie Generale*
CHASSIN - Tome 1 et 2.
8. *Metallurgie de Fonderie*
GEIER - Tome 1 et 2.
9. *Defauts de fonderie*
FRANCOIS BOUSSARD.
10. *Cours de Metallurgie.*
VIDAL.

