

وزارة الجامعات والبحث العلمي
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT METALLURGIE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

INFLUENCE DE LA VITESSE DE REFROIDIS-
SEMENT ET DE LA COMPOSITION CHIMIQUE
SUR LES CARACTERISTIQUES MECA-
NIQUES D'UNE FONTE G.L.

Proposé par :
Mme BOUALI

Etudié par :
OBEIDI Tahar

Dirigé par :
Mme BOUALI

PROMOTION
SEP 92

المكتبة — المكتبة
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

D E D I C A C E S

Je dédie ce modeste travail à :

- La mémoire de mon grand-père,
- Mes très chers parents,
- Mes frères et soeurs,
- Tous mes amis.

OBEIDI TAHAR

R E M E R C I E M E N T S

Je tiens à remercier très vivement tous les professeurs du Département Métallurgie qui ont contribué à ma formation. En particulier, ma promotrice, Mme BOUALI, qui m'a aidé tout au long de l'élaboration de ce projet de fin d'études.

J'exprime ma gratitude à l'ensemble du personnel de la fonderie E.N.F. d'El-Harrach, en particulier à Mr CHIKHI, ainsi qu'à celui de l'U.F.R.

Enfin, je n'oublierai pas tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

PLAN DE TRAVAIL

INTRODUCTION

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I	: Généralités sur les fontes grises	
I.1	: Fontes blanches	3
I.2	: Fontes grises	5
I.3	: Fontes traitées	5
I.4	: Fontes à graphite sphéroïdal	6
CHAPITRE II	: Fontes grises à graphite sphéroïdal	
II.1	: Mécanisme de solidification	7
II.2	: Formation des lamelles de graphite	11
II.3	: Propriétés structurales de la fonte grise	12
II.4	: Propriétés et rôles des constituants	13
II.5	: Facteurs influants sur la structure et les propriétés	16
CHAPITRE III	: Caractéristiques mécaniques et utilisation des fontes grises	
III.1	: Résistance mécanique des fontes grises	24
III.2	: Dureté des fontes grises	24
III.3	: Autres propriétés et principales utilisations	25

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE IV : Elaboration de la fonte grise et techniques expérimentales

A - ELABORATION DE LA FONTE GRISE

IV.1	: Paramètres du cubilot	26
IV.2	: Analyse des sables de moulage	27
IV.3	: Modèle	29
IV.4	: Analyse de la fonte obtenue	29

B - TECHNIQUES EXPERIMENTALES

IV.5	: Essais mécaniques	32
------	---------------------------	----

CHAPITRE V : Résultats et interprétations

V.1	: Analyse micrographique	36
V.2	: Résultats des essais mécaniques	52

CONCLUSION	65
------------------	----

BIBLIOGRAPHIE	67
---------------------	----

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les nombreuses applications de la fonte sont certainement dues à :

- leur bonne ductilité qui permet l'obtention, par moulage, de pièces de formes compliquées.
- leur bonne usinabilité due à la présence du graphite qui joue le rôle de lubrifiant.
- leur prix de revient relativement peu élevé.
- leur bonne résistance à la corrosion et à l'usure.

La présence du graphite sous forme lamellaire est une caractéristique particulière des fontes grises suivant laquelle varient les propriétés mécaniques de ces fontes. La dimension et la forme des lamelles de graphite sont les facteurs structuraux les plus profondément influencés par la vitesse de refroidissement et la composition chimique.

Ce sujet de fin d'études a pour but d'étudier l'influence de la vitesse de refroidissement (assurée dans la pratique par la variation de diamètre du modèle: 10, 15, 22, 30 et 50 mm) et de la composition chimique (en particulier le silicium) sur la forme, la répartition et les dimensions des lamelles de graphite c'est à dire, sur la structure, donc sur les propriétés mécaniques de la fonte étudiée.

La fonte utilisée a pour composition en éléments principaux

1°- Pour l'étude de la vitesse de refroidissement :

C = 3,20 % et Si = 2,19 %

2°- Pour l'étude de l'influence du taux en silicium :

La teneur du carbone ainsi que les autres éléments sont presque constants, alors que celle du silicium varie de 2,19 à 3,20 % .

L'essentiel de ce travail a porté sur une étude micrographique (forme et taille du graphite) suivie de certains essais mécaniques (traction, résilience, dureté).

)

PARTIE THEORIQUE

Chapitre I

*GENERALITES SUR
LES FONTES*

I - GENERALITES SUR LES FONTES

On désigne par fontes, les alliages fer-carbone dont la teneur en carbone est généralement comprise entre 2,3 et 4 % . Un eutectique se forme au moment de la solidification qui, par décomposition au cours du refroidissement, donne un élément insoluble dans l'austénite constituée soit par du carbone pur (graphite), soit par du carbone combiné ou carbure de fer (cémentite) de formule chimique Fe_3C et contenant 6,67 % de carbone.

La présence de ces carbures dans la fonte était considérée comme une déficience, mais, de nos jours, il a été montré qu'elle lui confère un certain nombre de propriétés très importantes.

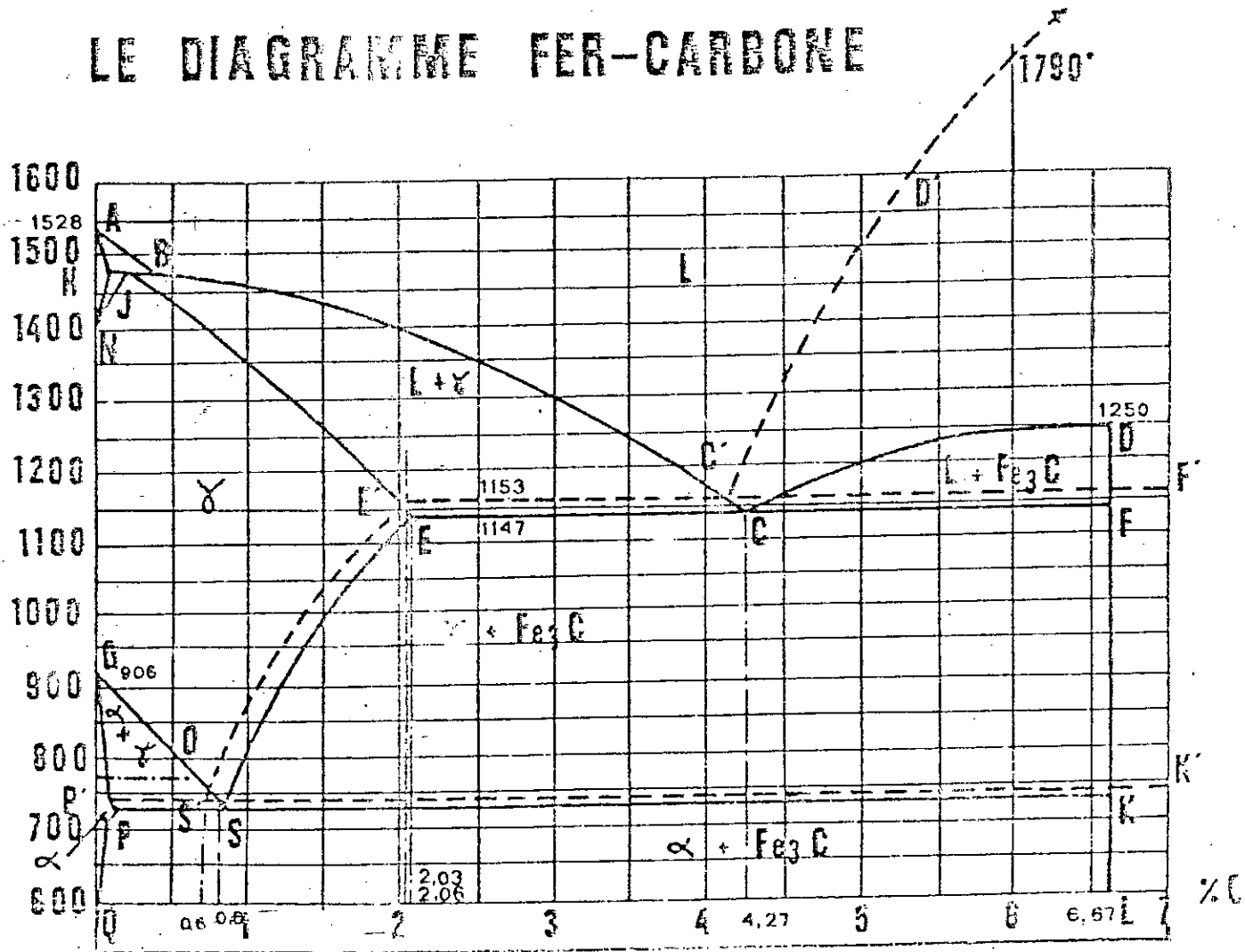
Le mode de solidification de la fonte est conditionné par la vitesse de refroidissement. Si cette dernière est très rapide, la fonte se solidifie puis se refroidit en suivant le diagramme d'équilibre métastable (fer-cémentite). Par contre, si cette vitesse est lente, le processus de refroidissement suivra la diagramme d'équilibre stable (fer-graphite) (voir fig 1).

Il existe plusieurs catégories de fontes. Ces dernières sont classées de la façon suivante :

I.1 - FONTES BLANCHES

Leur teneur en silicium est inférieure à 1,25 % . Elles suivent le diagramme métastable fer-cémentite et ont, à température ambiante, une structure constituée de perlite, lédeburite

LE DIAGRAMME FER-CARBONE



- Fig 1 -

- En continu : diagramme meta-stable
 - En pointé : diagramme stable

et de cémentite dont nous donnerons les définitions plus tard (Cf Ch II.4).

Elles ont une cassure blanche et leur caractéristique la plus importante est leur dureté considérable à l'état brut de coulée (présence de la cémentite), ce qui les dispose aux utilisations demandant de la résistance à l'abrasion; mais ce qui les rend en parallèle inusables et très fragiles.

I.2 - FONTES GRISES

Leur teneur en silicium est habituellement comprise entre 1,25 et 2,75 %. Au cours du refroidissement lent, elles suivent le diagramme stable fer - graphite. Ce type de fonte, à cassure grise, est considéré comme un alliage ternaire: fer - carbone - silicium, et présente une structure constituée de graphite en lamelles et d'une matrice métallique qui, suivant la vitesse de refroidissement et l'analyse chimique, est, soit perlitique, ferritique ou ferrito-perlitique.

Cette gamme de structure confère aux fontes grises, un domaine d'utilisation beaucoup plus vaste que celui des fontes blanches, ainsi que des propriétés très variables.

I.3 - FONTES TRUITEES

Ce sont des fontes mixtes (mi-blanches, mi-grises) dont la plus grande partie du carbone se trouve sous forme de cémentite. Leur structure est constituée de : lédéburite, perlite et de graphite lamellaire.

I.4 - FONTES A GRAPHITE SPHEROIDAL

Ce sont des fontes grises où le graphite est présent sous forme sphéroïdale, et ceci grâce à l'addition du magnésium (Mg) (le plus souvent de 0,03 à 0,07 %) lequel confère au graphite cette forme pendant la cristallisation.

Les caractéristiques mécaniques de la fonte G.S dépendent essentiellement de la matrice dans laquelle la forme sphéroïdale du graphite diminue considérablement la concentration en contrainte (effet d'entaille). Nous aurons donc un gain en résistance, surtout en ductilité. Ces fontes possèdent, en outre les mêmes avantages que présentent les fontes usuelles : bonnes coulabilité et usinabilité, aptitude à amortir les vibrations, haute résistance à l'usure,..etc...

La composition chimique courante d'une fonte à graphite sphéroïdal donnée par la norme française AFNOR est la suivante:
C = 3,4 à 4 %, Si = 2 à 3 %, Mn = 0,1 à 0,8 %, Mg = 0,02 à 0,1%
P < 0,01 % , S < 0,02 % .

Chapitre II

*FONTES GRISES A GRAPHITE
LAMELLAIRE*

La fonte grise est un alliage ternaire Fe-C-Si qui contient comme impuretés inévitables : Mn, P, S. Le carbone, dans ces fontes, est partiellement sous forme de lamelles de graphite.

Pour avoir des indications sur le comportement de la fonte à la solidification et, par conséquent, sur la structure, on utilise la notion de carbone équivalent (Céq) ou l'indice de saturation (Se).

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

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

Ct = teneur en carbone total de la fonte.

Les fontes ayant un équivalent de carbone inférieur à : 4,3 % (Si < 1) sont dites hypoeutectiques.

Les fontes ayant un équivalent de carbone supérieur à : 4,3 % (Si > 1) sont dites hypereutectiques.

II.1- MECANISME DE SOLIDIFICATION

Lors de la coulée du métal dans le moule, le liquide eutectique commence à se solidifier. On assiste donc à la cristallisation de ce liquide.

Le phénomène de cristallisation se produit lorsque le corps passe à un état thermodynamique plus stable correspondant à une énergie libre plus faible.

a- La surfusion :

C'est la différence entre la température de fusion T_f et celle à laquelle se produit la cristallisation T_c (voir fig 2).

Le degré de surfusion croît avec l'augmentation de vites-

se de refroidissement et la cristallisation s'effectue à une température plus basse que celle qui correspond à la solidification à l'état d'équilibre.

Le degré de surfusion est déterminé par la nature et la pureté du métal.

L'aptitude à la surfusion est proportionnelle à la pureté du métal.

La cristallisation commence par la formation des germes, constituant ainsi des centres de cristallisation et se poursuit avec leur développement et la multiplication de leur nombre.

b- Germination homogène :

Elle concerne le métal pur :

Le développement d'un germe n'est possible qu'à partir d'une taille définie depuis laquelle sa croissance entraîne une diminution de l'énergie libre.

Au cours de la cristallisation, le passage d'un certain volume du métal à l'état solide entraîne une diminution de l'énergie libre (l'énergie libre du métal solide étant plus faible que celle du liquide). Mais la formation d'un joint fait augmenter cette énergie (énergie superficielle en excès).

Cette variation générale peut être représentée par l'expression suivante : $\Delta E = - V * \Delta e + S * \alpha$

où : V = volume du germe

S = sa surface

α = coefficient de la tension superficielle entre les phases solide et liquide.

$\Delta e = (E_1 - E_2)$ où E_1 et E_2 sont les énergies libres des unités de volume respectives des phases liquide et solide.

En assimilant le germe à une sphère, l'expression de l'énergie libre totale peut être mise sous la forme :

$$\Delta E = - \frac{4}{3} * \pi R^3 m \Delta e + 4 * \pi R^2 m \alpha$$

où : R = rayon du germe

m = nombre de germes.

La représentation de ΔE en fonction de la taille des cristaux (fig 3) montre que lorsque la dimension d'un germe en formation est inférieure à une dimension critique (sur la figure $R_{K1}, R_{K2}, R_{K3}, R_{K4}$), l'énergie libre du système augmente du fait que le terme de l'énergie libre superficielle est supérieur à celui de l'énergie libre volumique. Par conséquent, un germe de taille supérieure à R_{K1} devient stable et apte à se développer puisque l'augmentation de sa taille entraîne la diminution de l'énergie libre du système.

c- Germination hétérogène :

Les métaux industriels présentent toujours un grand nombre d'additions variées (inclusions non métalliques, oxydes..) qui, fort heureusement, facilitent la germination car l'addition possède une température de fusion plus élevée que le métal de base. Par conséquent, elles se solidifient plus rapidement que ce dernier. Alors, les centres de cristallisation sont d'autant plus nombreux (on admet facilement que le grain est plus fin) que le nombre d'additions est plus grand, et la cinétique de solidification est plus rapide.

l'énergie libre du métal pendant la germination en fonction de la taille des cristaux et du degré de surfusion

On comprend ainsi que le graphite se forme à l'extrémité solide d'une lamelle d'austénite en contact avec le liquide. A chaque lamelle de l'austénite formée, correspond une lamelle de graphite qui, pour son développement, exige une diffusion des atomes de carbone du liquide qui l'entoure.

La phase austénite se développe plus vite et enrobe la lamelle de graphite. De nouveaux germes de graphite apparaissent aux extrémités des lamelles de l'austénite. Rapidement cernés par l'austénite, ils se développent radialement surtout, en recevant des atomes de carbone. Ainsi, on atteint le stade de l'enveloppement total du cristal de graphite.

II.3- PROPRIETES STRUCTURALES DE LA FONTE GRISE

Quand il s'agit d'étudier les propriétés et, plus particulièrement, les caractéristiques mécaniques des fontes, on doit avoir présent à l'esprit qu'elles dépendent beaucoup plus directement de la structure de l'échantillon ou de la pièce examinée que de sa composition chimique.

Il suffit, pour illustrer cette affirmation, de rappeler, qu'à partir d'une même poche de coulée, on peut obtenir, en jouant sur la vitesse de refroidissement dans le moule, toutes les variétés des fontes allant de la fonte blanche jusqu'à la fonte grise à graphite grossier.

Ce sont donc beaucoup plus les caractéristiques structurales que les caractéristiques chimiques qu'il faut considérer dans l'étude des propriétés utiles des fontes.

II.4- PROPRIETES ET ROLES DES CONSTITUANTS

Les propriétés des fontes dépendent très largement des caractères des lamelles de graphite qui sont présentes avec un nombre, des formes et dimensions variables dans une matrice perlitique, ferrito-perlitique ou ferritique, ainsi que de la vitesse de refroidissement (Cf Ch V.a).

a- **La ferrite** : est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer C-C ou C-F-C. Elle est peu dure et de faible résistance. Par contre, elle est ductile et facilement usinable. Mais ses caractéristiques sont considérablement modifiées par le silicium, élément toujours présent en quantité notable dans la fonte.

b- **La cémentite** : (carbure de fer Fe_3C) est une combinaison chimique de fer et de carbone, de densité élevée (7,82), de grande dureté (Brinell : 700 à 800 environ). Elle est stabilisée par le soufre, le manganèse, le cobalt et le magnésium alors que le silicium, l'aluminium et le nickel facilitent sa décomposition dans les fontes et les aciers.

c- **La perlite** : l'étude micrographique de la perlite a montré que les lamelles qui la constituent sont formées alternativement de ferrite et de cémentite. Un calcul simple*, confirmé par l'expérience, montre que la composition de la perlite est : 87 % de ferrite et 13 % de cémentite. La perlite apparaît après un refroidissement relativement long et ses caractéristiques dépendent de sa finesse. Sa dureté Brinell varie de 200 à 300 . Belaieff a donné une formule empirique liant la finesse de la

* En utilisant la règle des segments inverses.

perlite à sa dureté : HB . $\Delta o = 80$

Δo ($\mu.m$) = distance entre deux lamelles consécutives de cémentite.

Le silicium produit le relâchement et la ferritisation de la perlite.

d- **La steadite** : elle se forme si le taux de phosphore dans la fonte est très élevé. C'est un constituant d'inclusions solides, dures et d'eutectiques phosphoreux ternaires. Il est souvent réparti en réseaux autour des cellules eutectiques. Sa dureté varie de 400 à 600 HB.

e- **Le graphite** : c'est le résultat de décomposition de la cémentite à un réseau hexagonal stratifié. On distingue six (6) formes de graphite (voir fig 5) :

La forme 1 correspond au graphite lamellaire. Cette forme est classée en cinq (5) types A, B, C, D, E tels que :

- . type A : graphite en lamelles réparties uniformément.
- . type B : graphite en rosette.
- . type C : graphite en lamelles grossières.
- . type D : graphite interdendritique sans orientation préférentielle ou de surfusion.
- . type E : graphite interdendritique orienté.

Les types A, B, D et E se rencontrent dans les fontes grises lamellaires hypoeutectiques. Par contre, le type C se trouve dans les fontes grises hypereutectiques.

Tel qu'il est présent dans les fontes, le graphite est plus ou moins ramifié, plus ou moins fin et plus ou moins abondant en fonction de divers facteurs explicités ci-après (voir

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

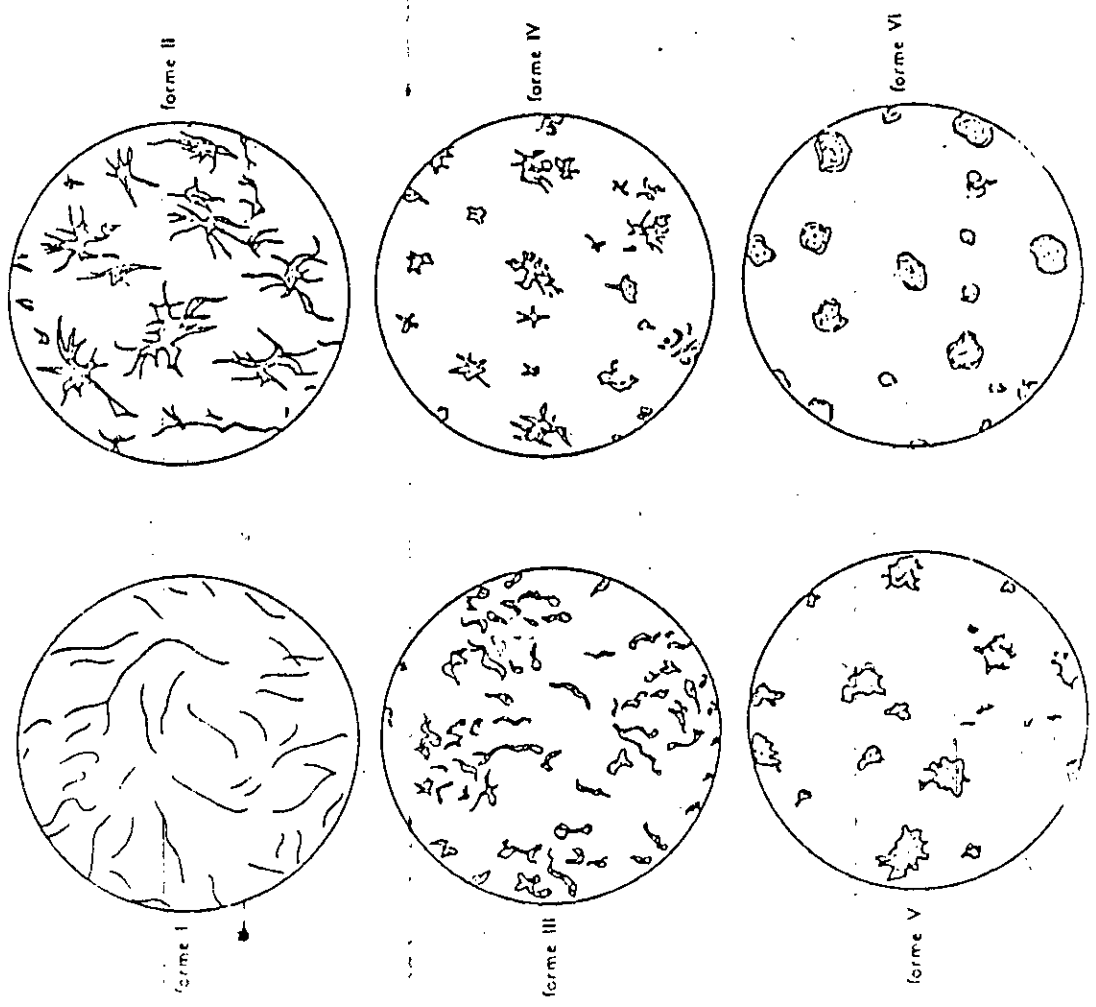


PLANCHE 2. — Diagrammes de référence pour la répartition du graphite (forme



Fig 5 : Formes et types de graphite

Ch II.5). Il en résulte une influence importante sur l'effet d'entaille dans la matrice et, par conséquent, sur les propriétés mécaniques.

II.5- FACTEURS INFLUANTS SUR LA STRUCTURE ET LES PROPRIETES

Les propriétés des fontes sont déterminées, avant tout, par leur structure, laquelle dépend d'une série de facteurs de fabrication qu'il appartient au fondeur de fixer, compte tenu de sa technique propre.

a- Histoire thermique du métal liquide

L'action de surchauffe sur la structure des fontes grises est qu'elle provoque d'abors un affinement du graphite qui, de grossier, devient moyen, puis fin. En augmentant la surchauffe, le graphite continue à s'affiner et prend, par conséquent, la forme D (interdendritique); forme accompagnée souvent de ferrite mal répartie dans la matrice, ce qui est défavorable. En l'augmentant encore, la fonte devient truitée puis blanche.

b- Influence du traitement d'inoculation

Ce dernier consiste à ajouter au métal liquide, au niveau de la poche de coulée, ou du chenal, un produit graphitisant à base de silicium ou de graphite, en petite quantité, car il ne s'agit pas d'une addition d'un élément d'alliage. Cette opération modifie notablement la structure ainsi que les propriétés en agissant sur le graphite.

Les propriétés les plus touchées par ce traitement sont :

- la résistance (qui augmente)
- la profondeur de trempe (qui diminue)

d'où la faveur d'obtenir une fonte grise.

c- Composition chimique

Les éléments les plus souvent présents dans les fontes sont : C, Si, P, Mn et S.

1- **Le carbone** : c'est un élément qui influe notablement sur les propriétés de la fonte. Plus la teneur en carbone total est élevée, plus il se forme du graphite et, par conséquent, les propriétés mécaniques (telles que la résistance à la traction...) seront plus faibles. Donc la teneur en carbone d'une fonte grise doit être d'autant plus basse que les résistances mécaniques recherchées sont élevées.

Le carbone améliore également la coulabilité de la fonte grise.

La quantité de graphite est proportionnelle à celle du carbone. Donc l'étude de l'influence du carbone (sur les propriétés mécaniques de la fonte grise) nous ramène à l'étude de l'influence du graphite.

Notons, à ce sujet, que la caractéristique remarquable d'une fonte est sa facilité de mise en oeuvre et ses remarquables propriétés de fonderie. Or, les fontes à faible teneur en carbone (3 %) retassent considérablement en même temps que leur coulabilité diminue, et ce, malgré l'amélioration de la résistance. C'est pourquoi, généralement, on n'abaisse pas la teneur en carbone pour une fonte à moins de 2,8 % .

2- **Le silicium** : la présence de silicium est toujours nécessaire dans les fontes grises. Notamment pour la précipitation

du carbone en graphite. Les fortes teneurs en silicium entraînent une diminution de l'intervalle de solidification (par diminution de la température du début de solidification et augmentation de celle de la fin).

Le silicium accroît la coulabilité de la fonte et réduit sa tendance aux tapures. La teneur en silicium et celle en carbone doivent varier dans le sens inverse afin d'amoindrir les propriétés mécaniques par une teneur de carbone graphitique élevée.

Les figures 6, 7,8 montrent que le silicium modifie l'allure générale du diagramme et déplace le point de l'eutectique Fe-C vers la gauche.

3- **Le soufre** : est un élément apporté surtout par le coke lors de la fusion ainsi que par les retours de la vieille fonte Il est particulièrement actif concernant les propriétés des alliages fer-carbone. Il gêne la graphitisation et augmente la dureté de la fonte, donc la fragilise. C'est pourquoi, pour des fontes qui doivent présenter des résistances mécaniques élevées la teneur en soufre ne doit pas dépasser 0,15 % .

4- **Le manganèse** : son rôle primordial est de neutraliser l'effet du soufre par formation d'inclusions de type MnS qui ont un rôle négligeable.

Le manganèse influe peu sur la structure. Il affine la perlite, ce qui élève la résistance à la traction.

5- **Le phosphore** : dans les fontes industrielles courantes, la teneur en phosphore est comprise entre 0,03 et 1,2 % . Ce

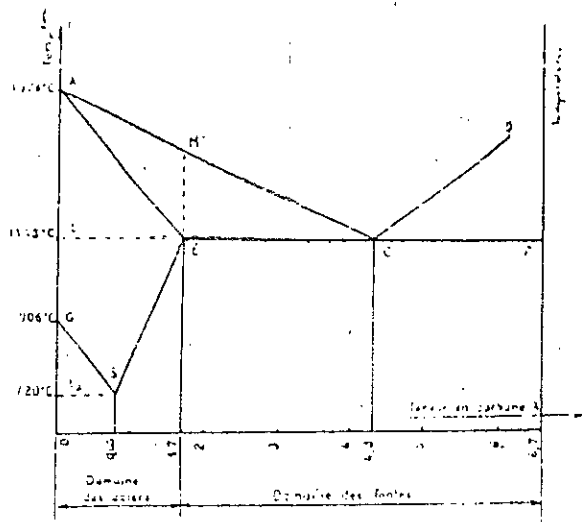


FIG. 6 — Diagramme de solidification de l'alliage fer-carbone théorique.

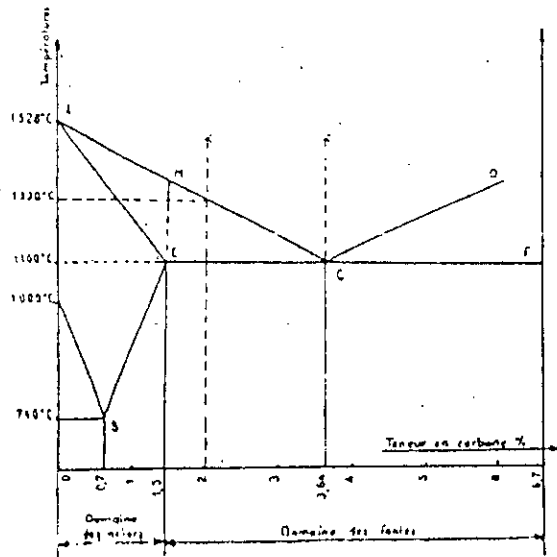


FIG. 7 — Diagramme de solidification de l'alliage fer-carbone à 2 % de silicium.

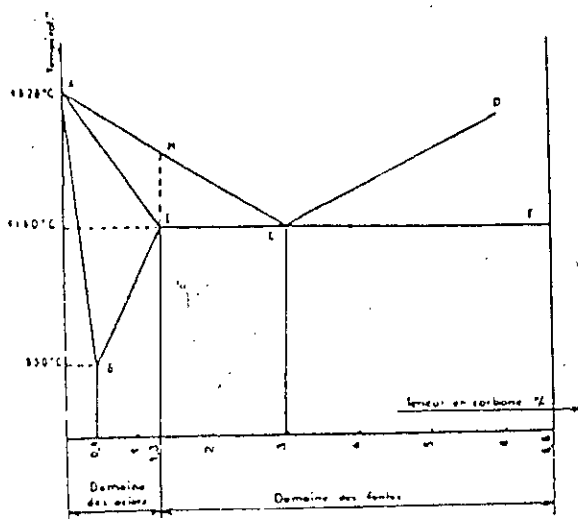


FIG. 8. — Diagramme de solidification de l'alliage fer-carbone à 4 % de silicium.

qui amène à distinguer entre les fontes hématites ($P < 0,15 \%$) et les fontes phosphoreuses ($P > 1 \%$). Le phosphore, contrairement au manganèse, déplace l'eutectique fer-carbone vers la gauche.

Le phosphore, élément graphitisant, améliore très sensiblement la coulabilité de la fonte et augmente, légèrement, la résistance mécanique.

Une forte teneur du phosphore dans la fonte entraîne la formation d'inclusions solides dures d'un eutectique phosphoreux Fe P et, par suite, accroît la dureté et la fragilité de la fonte grise en augmentant la résistance mécanique.

L'influence du phosphore sur les propriétés mécaniques de la fonte est plus remarquable si le pourcentage du carbone est bas.

d- Influence des conditions de refroidissement

Pour un alliage donné, les conditions de refroidissement sont régies par les facteurs suivants :

1- **Température de coulée** : pour les fontes grises, elle se situe dans l'intervalle $1.300 \text{ }^{\circ}\text{C} - 1.400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, et est connue par une bonne coulabilité : aptitude à bien remplir le moule et à se conformer aux détails de l'empreinte.

2- Vitesse de refroidissement :

Elle dépend des facteurs suivants :

a- **Métal** : * différence de température entre le métal et le moule au moment de la coulée.

* conductivité thermique.

b- Moule : * épaisseur et nature des parois (métalliques, sable vert ou étuvé).

* température du moule.

* position des attaques.

c- Pièce : * épaisseur variable.

* présence de surfaces convexes ou concaves.

* présence d'angles rentrants ou sortants.

La sensibilité aux dimensions, c'est à dire la variation des caractéristiques mécaniques (structure) avec la vitesse de refroidissement, constitue l'une des propriétés les plus importantes des fontes, et qui est une conséquence des variations de grossissement du graphite ou de sa finesse.

Les courbes de H. LAPLANCHE peuvent être utilisées directement à la prévision d'une structure de fonte (fig 9).

3- surfusion et inoculation :

On sait que les liquides cristallisent difficilement en l'absence de tout germe de cristallisation. Au contraire, si une particule solide existe à un instant donné au sein du liquide, le retard à la solidification ou surfusion cesse et les cristaux solides se déposent sur l'impureté existante qui agit comme germe de cristallisation (Cf Ch II.1).

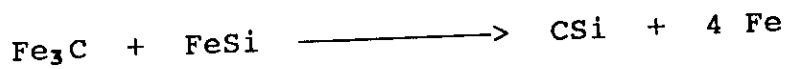
Le liquide eutectique dans les fontes présente, lui aussi le phénomène de surfusion et d'inoculation. Il éprouve moins de difficultés à se solidifier. Le degré de surfusion est ainsi réduit. C'est pourquoi, on accélère la graphitisation à partir de la phase liquide par introduction d'inoculants comme les

ferro-silicium à 70 - 80 % en Si, ainsi que d'autres éléments d'addition (Al, Ni, Cu, ...) qui forment des centres supplémentaires de cristallisation lesquels entraînent la formation du graphite.

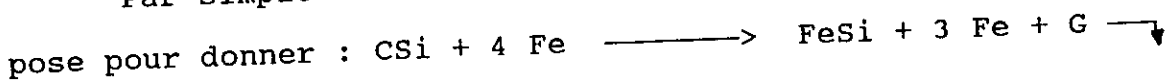
* Examinons le cas des fontes inoculées aux ferro-silicium: Des zones riches en silicium se forment. Le fer diffuse vers ces zones et, par dilution, fait baisser leur titre en silicium et on assiste à la formation de FeSi.

En conséquence de la diffusion du fer, ces zones voient leur périphérie devenir moins riche en fer, c'est à dire plus riche en carbone. Il s'y forme alors de la cémentite (Fe₃C).

A l'interface des zones FeSi et Fe₃C se produit la réaction :



Par simple dilution, le produit de la réaction se décompose pour donner :



Les germes apparus serviraient à leur tour d'amorces secondaires de nouveaux germes de graphite.

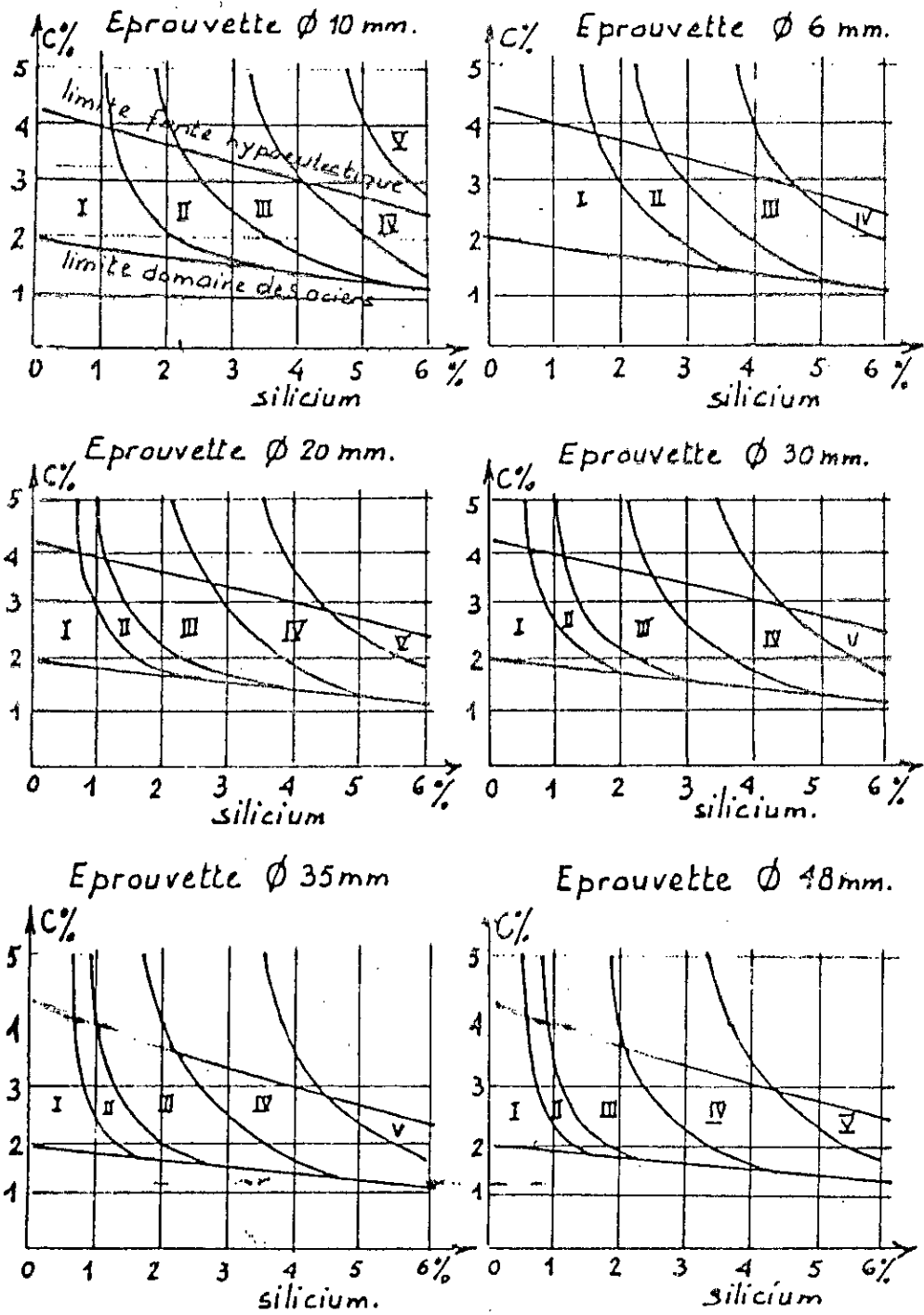


Fig 9 : Relation structure - composition - massivité de pièce moulée
d'après H. LAPLANCHE

Chapitre III

*CARACTERISTIQUES MECANIKUES
ET UTILISATIONS DES FONTES
GRISES*

Les caractéristiques mécaniques des fontes sont mesurées par des essais normalisés. Parmi eux, la résistance à la traction qui est la base de la classification des différentes fontes grises.

La résistance à la traction d'une fonte grise est d'autant plus grande que la matrice est plus résistante et que le graphite est moins abondant (Cf Ch V.2 b).

En ce qui concerne la matrice, la perlite est nettement le constituant le plus résistant par comparaison à la ferrite trop douce et à la cémentite trop fragile.

III.1-RESISTANCE MECANIQUE DES FONTES

Le graphite agit sur la résistance à la traction par un effet d'entaille conduisant à des concentrations de contrainte en bout de fissures. L'existence permanente de ces entailles explique bien la rupture fragile de la fonte grise (lors de l'essai de traction) (Cf Ch V.2 b).

Ainsi, pour qu'une fonte grise ait une bonne résistance à la traction, il faut qu'elle soit de matrice perlitique avec le moins de graphite possible, réparti de manière homogène et en lamelles fines (type A, B ou E). La résistance à la traction des fontes grises est comprise entre : 10 et 40 daN / mm².

III.2-DURETE DES FONTES GRISES

Elle varie dans de larges limites :

- Fonte blanche : 400 à 600 HB selon le pourcentage de C .
- Fonte grise perlitique : 170 à 270 HB suivant la finesse de la perlite.

- Fonte grise ferritique : 100 à 150 HB.

La dureté de la fonte dépend, avant tout, de la matrice, de la forme et de la distribution du graphite ainsi que de l'eutectique phosphoreux. L'augmentation de 0,1 % du phosphore augmente la dureté de trois (03) unités Brinell.

III.3-AUTRES PROPRIETES ET PRINCIPALES UTILISATIONS

Les fontes grises ferritiques ont une capacité d'amortissement des vibrations élevée ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion.

Notons aussi leur bonne tenue au frottement et leurs qualités de fonderie remarquables (faible retrait, bonne coulabilité, température de coulée faible).

Les utilisations de la fonte grise sont très variées.

Rappelons les plus traditionnelles :

- Bâtiment (sanitaires, baignoires, radiateurs,...) grâce à leur résistance à la corrosion.
- Fours et chaudières (échangeurs de chaleur, cuves, creusets,.....) grâce à leur résistance à la chaleur et aux chocs thermiques.
- Supports de ponts, machines-outils, cylindres des laminaires, matrice d'emboutissage,..) grâce à leur rigidité (allongement faible) et leur résistance mécanique.
- Nombreuses pièces d'automobile (blocs moteurs, chemises).

PARTIE PRATIQUE

Chapitre IV

*ELABORATION DE LA FONTE
GRISE ET TECHNIQUES
EXPERIMENTALES*

A - ELABORATION DE LA FONTE GRISE

Le cubilot est l'un des plus anciens appareils de fusion. Il est caractérisé par son rendement important.

IV.1- PARAMETRES DU CUBILOT

(voir schéma n° 10)

- Hauteur :

* Pour que la température des charges solides passe de la température ambiante à celle de fusion, il faut que le chemin qu'elles parcourent, de la partie supérieure (gueulard) à la zone de fusion, soit suffisamment long.

* Pour permettre aux gouttelettes métalliques d'atteindre la température optimale, compte tenu du contact rapide qu'elles ont avec le coke, il faut que la hauteur du ruissellement soit suffisante. C'est pourquoi cette hauteur peut atteindre 10 mètres.

- Diamètre :

Il est fixé par la production horaire désirée. La production horaire moyenne est d'environ 75 Kg / dm² de section. Alors :

$$Ph = \frac{75 \cdot \pi \cdot D^2}{4} \approx 60 \cdot D^2 \text{ Kg / h} \quad (D \text{ en dm})$$

La charge du cubilot destinée à élaborer la fonte se compose :

- 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 retour provenant des pièces mécaniques usées : 60 Kg.
- du coke : dont la combustion fournira la chaleur nécessaire à la fusion du métal : 60 Kg.
- de la castine : pour transformer les cendres du coke en scories fusibles vers 1.400 °C : 30 Kg.
- de briquettes de ferro-silicium de 55 à 85 % de silicium : leur nombre varie suivant leur pourcentage en silicium (7 briquettes pour ceux à 55 % pesant 1,8 Kg chacune), et dont la masse totale est 12,6 Kg.

IV.2- ANALYSE DES SABLES DE MOULAGE

Le moule contient deux types de sable :

- Sable de contact : c'est un mélange de :
 - * 33 % de vieux sable,
 - * 40 % de sable neuf,
 - * 25 % de clarsol,
 - * 2 % d'eau.
- Sable de remplissage : il est utilisé pour remplir tout le volume du châssis. Pour des raisons économiques , on utilise généralement en fonderie 50 à 90 % de sable vieux.

Guelard.

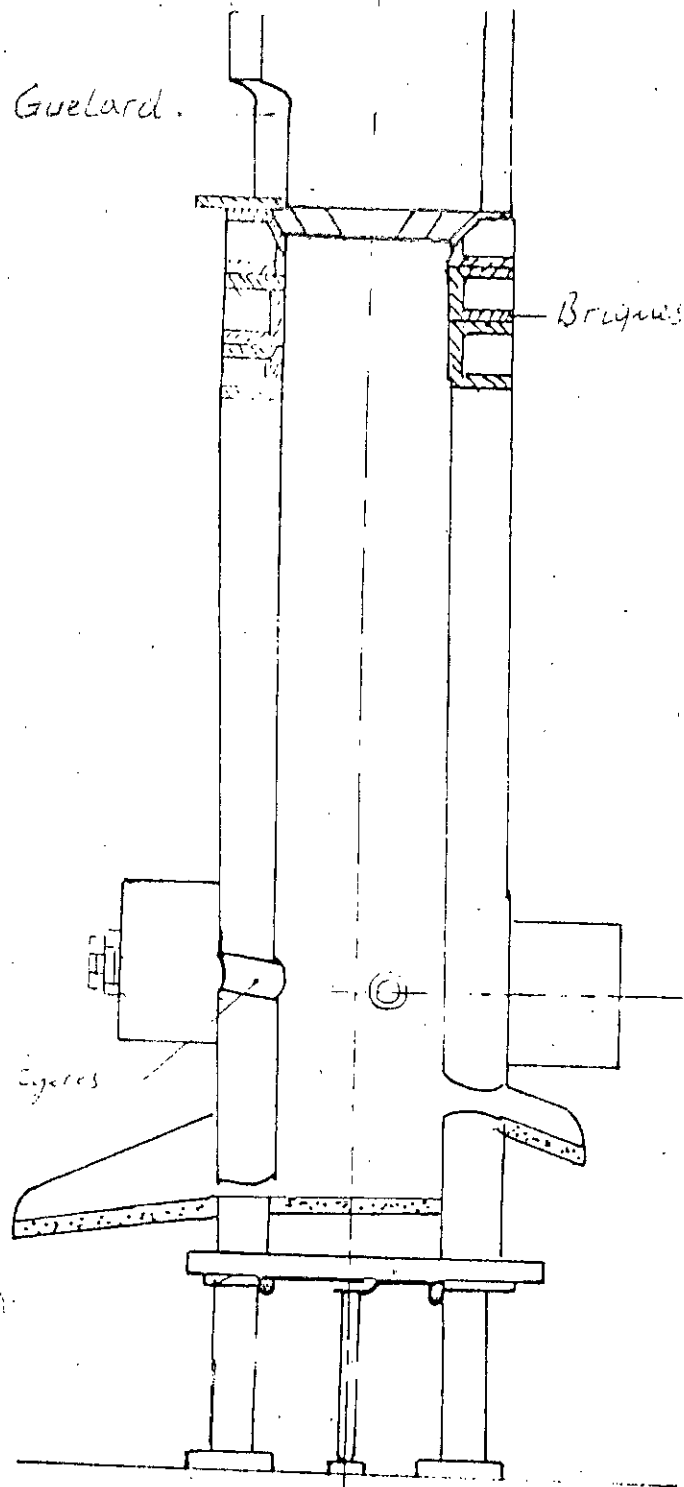


Fig 10 : Schéma du eubitot

E.N.F. (hauteur : 4,5 m, diamètre : 1,1 m)

IV.3- MODELE

Les modèles sont des éprouvettes en forme de barreaux cylindriques de différents diamètres : 10, 15, 22, 33 et 50 mm et de même longueur: 110 mm.

On a fait varier le taux en silicium par ajout de différentes quantités de silicium pur, en poudre, dans la poche de coulée, sachant que la composition en cet élément n'est pas fixée au préalable.

IV.4- ANALYSE DE LA FONTE OBTENUE

Pour l'analyse chimique, les résultats suivants ont été obtenus grâce au spectromètre :

Tableau 1-a : Résultats d'analyse de la fonte de coulée

Eléments	1° Coulée	2° Coulée	3° Coulée
C %	3,200	3,200	3,210
Si %	2,190	2,590	2,670
Mn %	0,700	0,680	0,720
S %	0,225	0,205	0,220
P %	0,212	0,217	0,220
Mg %	0,000	0,000	0,000
Ni %	0,030	0,037	0,017
Cr %	0,019	0,067	0,066
Mo %	0,067	0,060	0,067
Cu %	0,223	0,217	0,211
Pb %	0,026	0,016	0,012
Al %	0,006	0,003	0,005
Céq	4,001	4,136	4,173

Tableau 1-b : Résultats d'analyse de la fonte de coulée

Eléments	4° Coulée	5° Coulée	6° Coulée
C %	3,200	3,200	3,220
Si %	2,890	3,050	3,200
Mn %	0,750	0,660	0,760
S %	0,227	0,225	0,231
P %	0,215	0,223	0,222
Mg %	0,000	0,000	0,000
Ni %	0,049	0,066	0,049
Cr %	0,079	0,056	0,027
Mo %	0,014	0,026	0,023
Cu %	0,236	0,219	0,220
Pb %	0,016	0,018	0,014
Al %	0,002	0,007	0,009
Céq	4,235	4,291	4,361

Remarque : La première coulée est utilisée pour étudier l'influence de la vitesse de refroidissement. Cinq (05) éprouvettes de différentes épaisseurs (10, 15, 22, 33 et 50 mm) ont été utilisées. Toutes les coulées sont utilisées pour mettre en évidence l'influence du silicium sur la forme, la répartition et les dimensions des lamelles de graphite, donc sur les caractéristiques mécaniques de la fonte coulée en cinq éprouvettes de 22 mm de diamètre.

Nous remarquons que la fonte obtenue par la première coulée, jusqu'à la cinquième, est une fonte hypoeutectique (Céq < 4,3); tandis que celle obtenue par la sixième coulée est une fonte hypereutectique (Céq > 4,3).

B - TECHNIQUES EXPERIMENTALES

a- **Micrographie** : l'étude micrographique des surfaces métalliques faite par réflexion avec un microscope métallographique: elle a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques.

L'échantillon destiné à l'observation métallographique a d'abord été prélevé de l'éprouvette coulée, puis enrobé à froid avec de la résine avant d'être soigneusement poli.

b- **Polissage** : le polissage a été effectué en trois étapes :

- * Polissage grossier : avec papier émeri : 180-320-600
- * Polissage fin : avec papier émeri : 1.000
- * Finition à l'aide d'un feutre de pâte diamantée et d'un lubrifiant.

c- **Attaque** : une fois la surface de l'échantillon devenue plane et brillante, nous avons procédé à une attaque chimique à froid à l'aide de nital à 5 % pendant 15 secondes. Ce dernier agit par coloration superficielle, différenciant ainsi les divers constituants (perlite, ferrite,...).

Observation : Pour mettre en évidence les inclusions non métalliques (telles que le graphite), l'échantillon est observé sans attaque.

d- **Examen micrographique des échantillons et photographie** :

L'examen microscopique et la photographie ont été effectués à l'aide d'un microscope métallographique (JENAPOL 250 CF) qui comprend un appareil photographique. Des photographies ont été prises sur les divers échantillons, avant et après attaque et suivant le grossissement désiré.

IV.5- ESSAIS MECANIQUES

Nous avons effectué certains essais mécaniques sur les éprouvettes coulées afin de déterminer quelques caractéristiques mécaniques qui sont :

- L'aptitude à la déformation plastique ou élastique pour essai de traction.
- La résistance à la pénétration d'une pièce dure à une pression constante (dureté).
- La résistance au choc (résilience).

a- Essai de traction

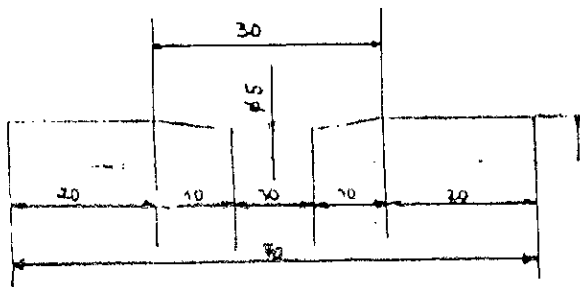
Cet essai est effectué sur les éprouvettes de formes et de dimensions normalisées (AFNOR : A 32 - 101) prélevées des pièces coulées (fig : 11 a-b-c-d-e).

Tableau 2 : Diamètres des éprouvettes avant et après usinage

Diamètre brut de coulée mm	10	15	22	33	50
Diamètre de l'éprouvette de traction usinée mm	5	8	12,5	20	30

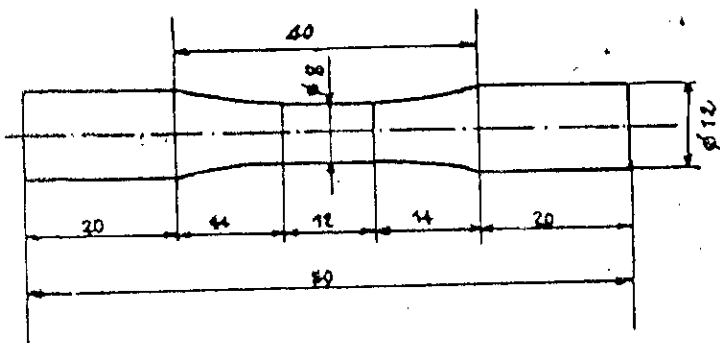
L'essai de traction consiste à exercer un effort continu suivant l'axe de l'éprouvette.

Cet essai définit un ensemble de caractéristiques (déjà citées) dont la plus importante est la limite élastique exprimée en daN / mm² et qui est la contrainte minimale qui produit une déformation permanente du métal.



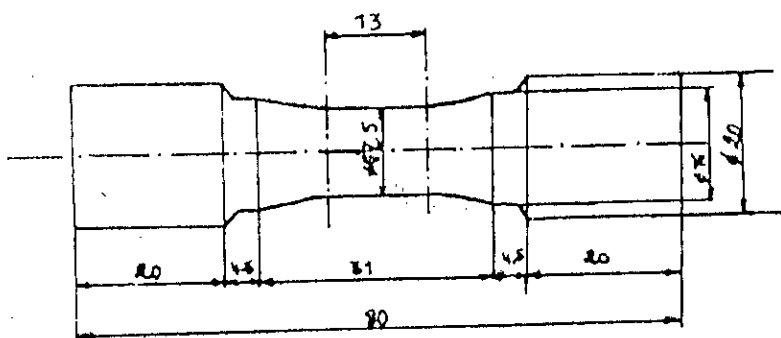
Eprouvette usinée à partir du barreau de 15 mm de ϕ .

- a -



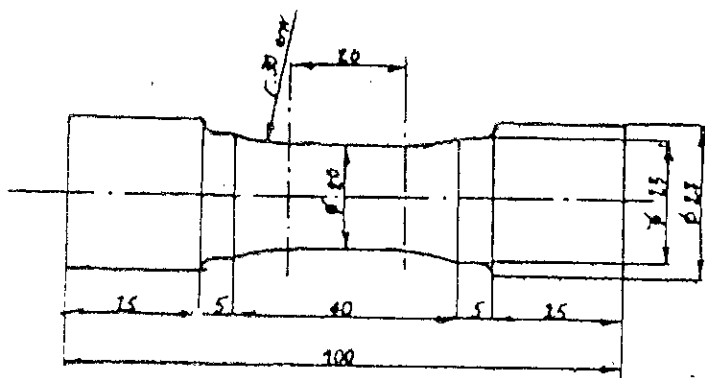
Eprouvette usinée à partir du barreau de 15 mm de ϕ .

- b -



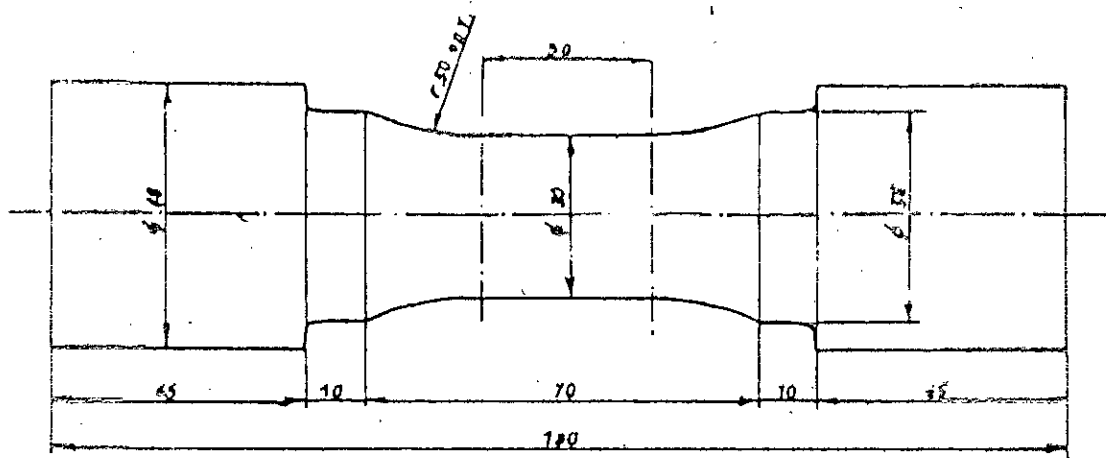
Eprouvette usinée à partir du barreau de 22 mm de ϕ .

- c -



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

- d -



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

- e -

Fig 11. a. b. c. d. e : Eprouvettes normalisées de traction. (A 32-101)

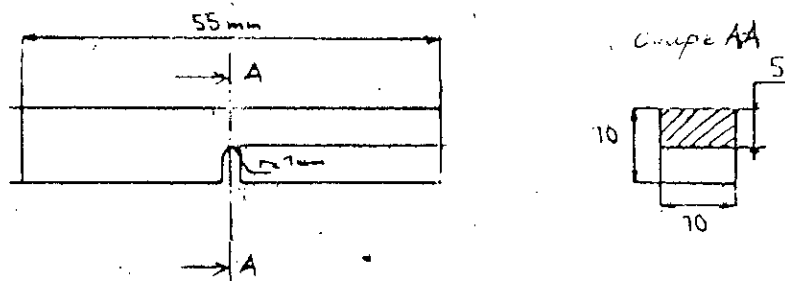


Fig 12 : Eprouvette normalisée de résilience (A 03-156)

b- Essai de résilience

Il a pour but de mettre en évidence les propriétés de ténacité du métal et consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule l'éprouvette entaillée en U (en son milieu) (fig 12) et reposant sur deux appuis.

On détermine l'énergie W absorbée dont on déduit la résilience K qui est l'énergie exprimée en J / cm² nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette.

c- Essai de dureté

La dureté est la résistance qu'un corps oppose à la pénétration par un autre corps plus dur que lui. La dureté est d'autant plus grande que la pénétration du corps est plus faible. C'est un essai rapide et non destructif.

Méthode de Brinell : elle consiste à mesurer une empreinte laissée par une bille extra-dure de 10 ou 15 mm de diamètre correspondant à des charges de 300 à 750 Kg.

La dureté Brinell est définie par : $HB = P / S$.

P = charge de l'effort exercé.

S = surface de l'empreinte.

$$S = \frac{\pi \cdot D}{2} \left[D - \left(D^2 - d^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

D = diamètre de la bille.

d = diamètre de l'empreinte.

Chapitre V

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

V.1 - ANALYSE MICROGRAPHIQUE

a- Morphologie du graphite

Elle est mise en évidence par observation, au microscope optique, des différents échantillons sans attaque.

En fonction des diamètres des éprouvettes et du taux en silicium dans la fonte, on a étudié la forme et la distribution du graphite et tiré, par suite, des renseignements sur les dimensions des lamelles (car ces dernières sont intimement liées aux types et aux formes du graphite).

Dans les tableaux 3 et 4 sont regroupés les résultats obtenus (se référer à la figure 5).

1° coulée :

Tableau 3 : Forme et distribution du graphite pour différentes épaisseurs de moule

Diamètres mm		10	15	22	33	50
Morphologie	Forme	I - II	I - II	I - II	I	I
	Répartition	A - D	A - B	A	A	A

Coulées 1, 2, 3, 4, 5 et 6 :

Tableau 4 : Forme et distribution du graphite pour différents taux en silicium

Taux en silicium		2,19	2,59	2,67	2,89	3,05	3,20
Morphologie	Forme	I - II	I	I	I	I	I
	Répartition	A	A	A	A	A	A - C

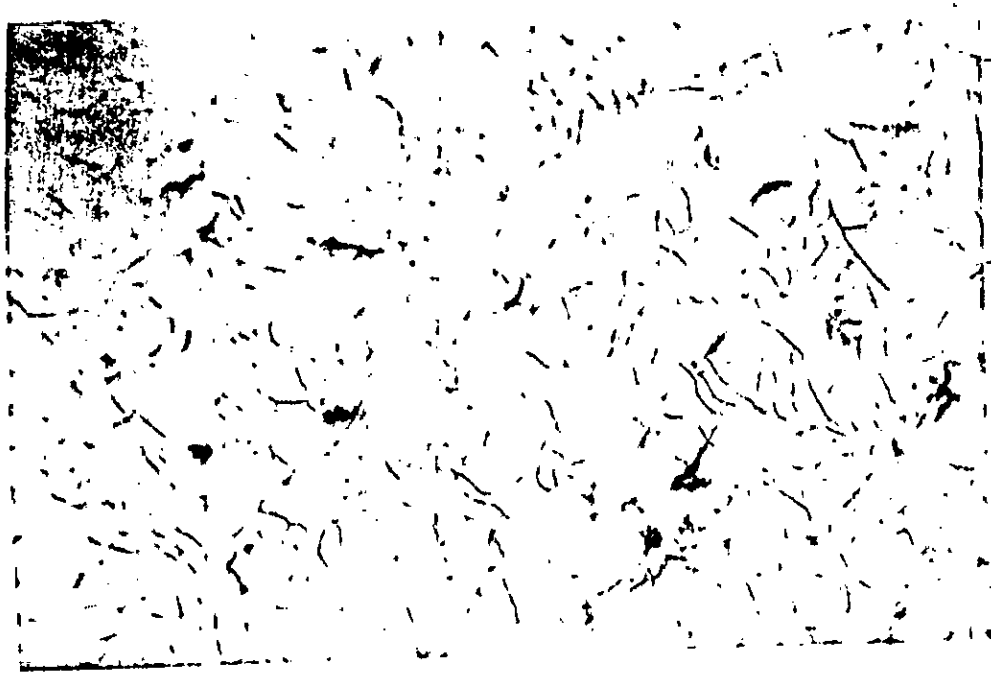


graphite lamellaire

matrice métallique

Gx-100

micrographie n° 1
(sans attaque)



lamelles
de
graphite

matrice
métallique

Gx-100

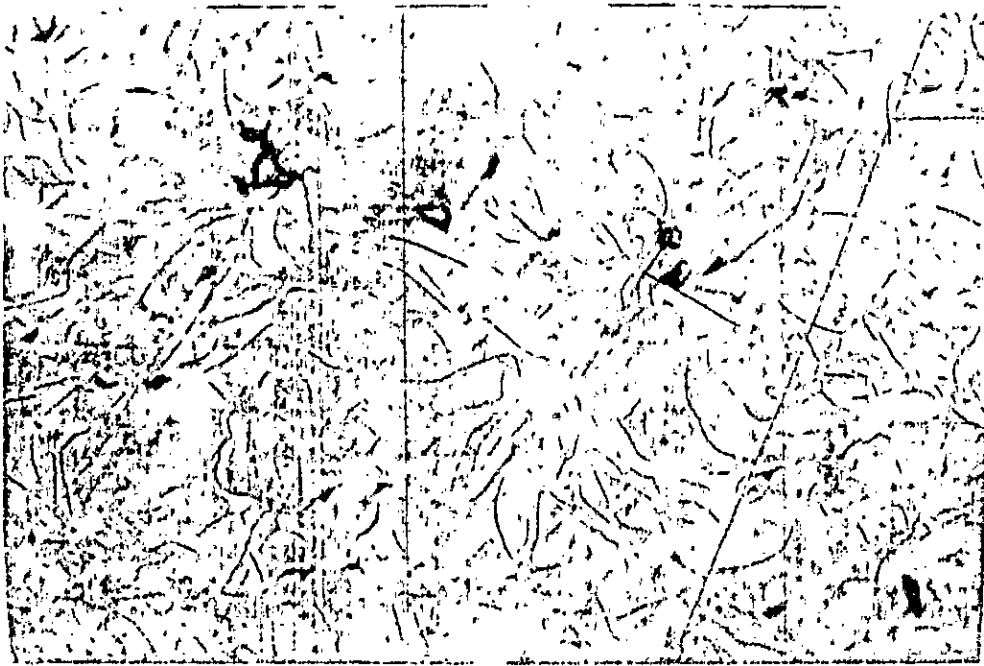
micrographie n° 2
(sans attaque)



lamelle de
graphite

micrographie n° 3
(sans attaque)

Gx100



lamelles
de graphite

matrice
métallique

micrographie n° 4
(sans attaque)

Gx100



matrice
métallique

lamelles
de gra-
phite

micrographie n° 5
(sans attaque)

G x 100



lamelles de graphite

Micrographie n° 6

Gx100



lamelles de gra-
phite.

Micrographie n° 7

Gx100



Lamelles de graphite.

Micrographie n° 8
(sans attaque)

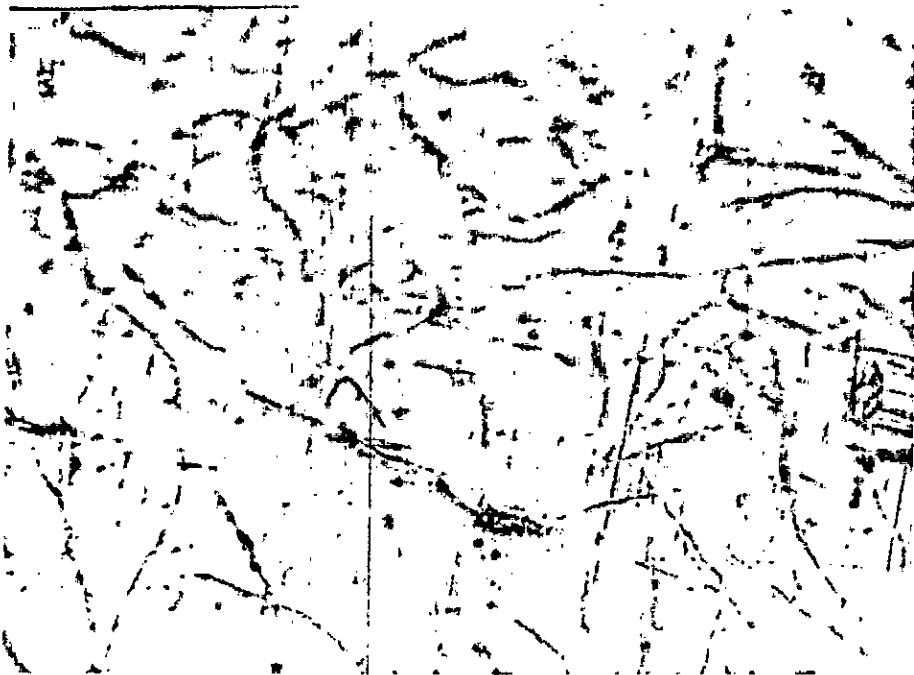
G_x 100



Lamelles de graphite.

micrographie n° 9
(sans attaque)

G_x 100



Lamelles
de
graphite

micrographie n° 10
(sans attaque)

Gx100



Lamelles
de
graphite

micrographie n° 11
(sans attaque)

Gx100

b- Microstructure

Après l'attaque, on a examiné la structure de chaque éprouvette. Les constituants suivants ont été observés :

- le graphite,
- la perlite,
- la ferrite (en petite quantité),
- quelques ilôts d'eutectiques phosphoreux.

Les tableaux 5 et 6 présentent les différentes structures des éprouvettes.

1° coulée :

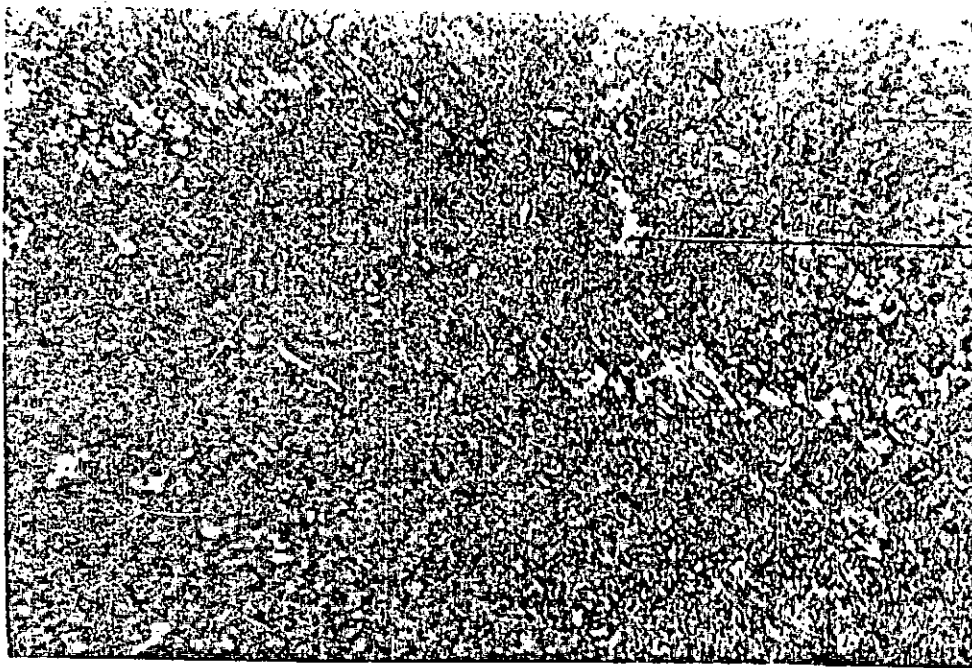
Tableau 5 : Structure de la matrice en fonction des diamètres des éprouvettes

Diamètre mm	10	15	22	33	50
Structure	perli- tique	perli- tique	perli- tique	ferrito- perli- tique	ferrito- perli- tique

Coulées 1, 2, 3, 4, 5 et 6 :

Tableau 6 : Structure de la matrice en fonction des taux en silicium

%Silicium	2,19	2,59	2,67	2,89	3,05	3,20
Structure	perli- tique	perli- tique	perli- tique	ferrito- perli- tique	ferrito- perli- tique	ferrito- perli- tique

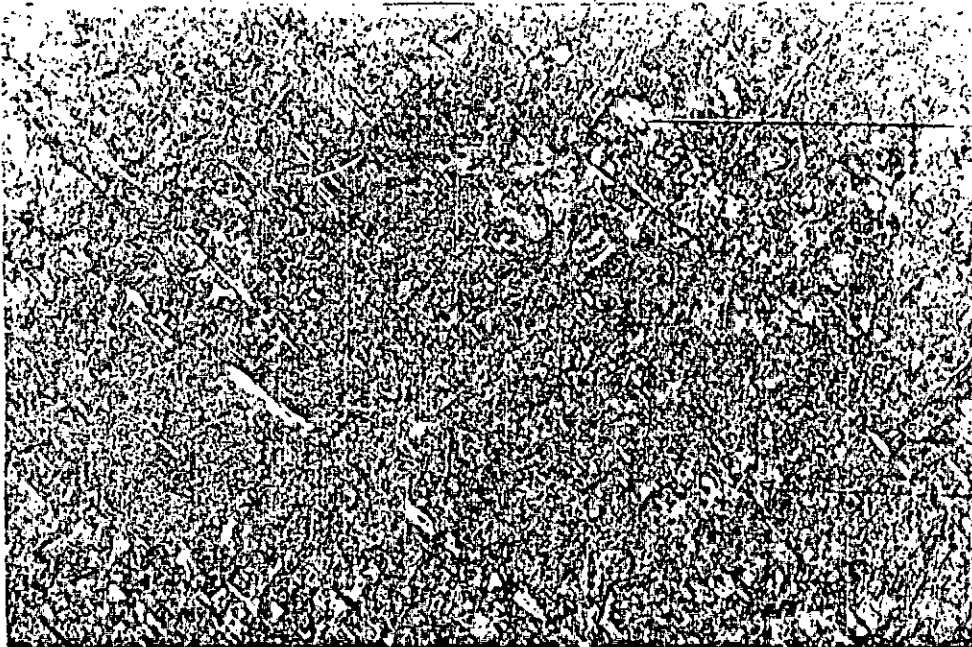


perlite

ferrite

micrographie n° 12

Gx250

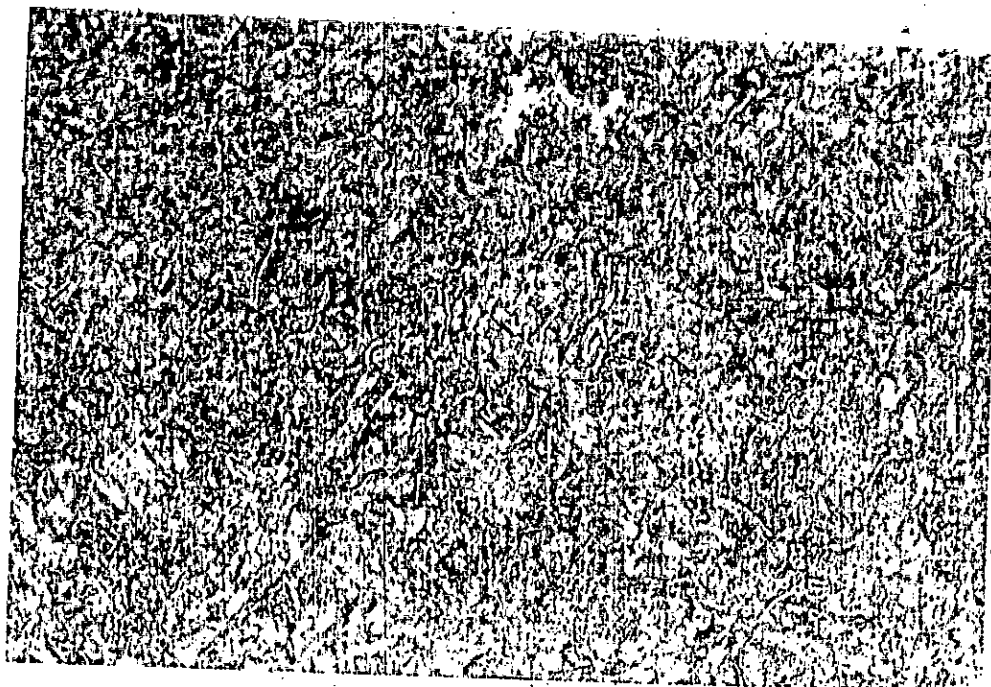


ferrite

perlite

micrographie n° 13

Gx250



micrographie n° 14
(attaque au Nitral 5%)

Gx250



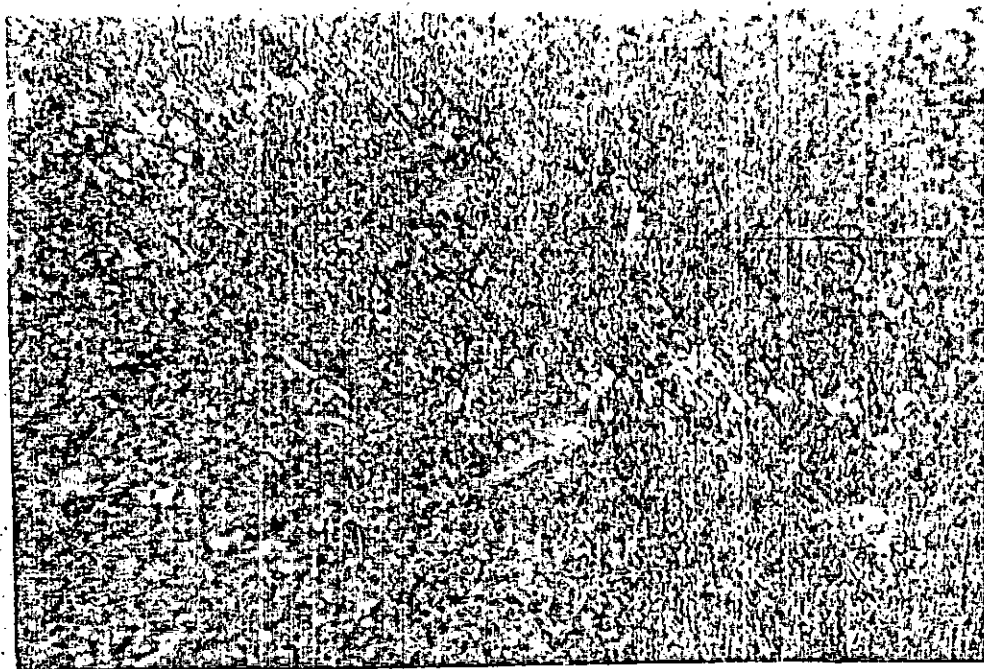
micrographie n° 15
(attaque au Nitral 5%)

Gx250



G. 259

micrographie n° 16
(attaque au Nitral 5%)

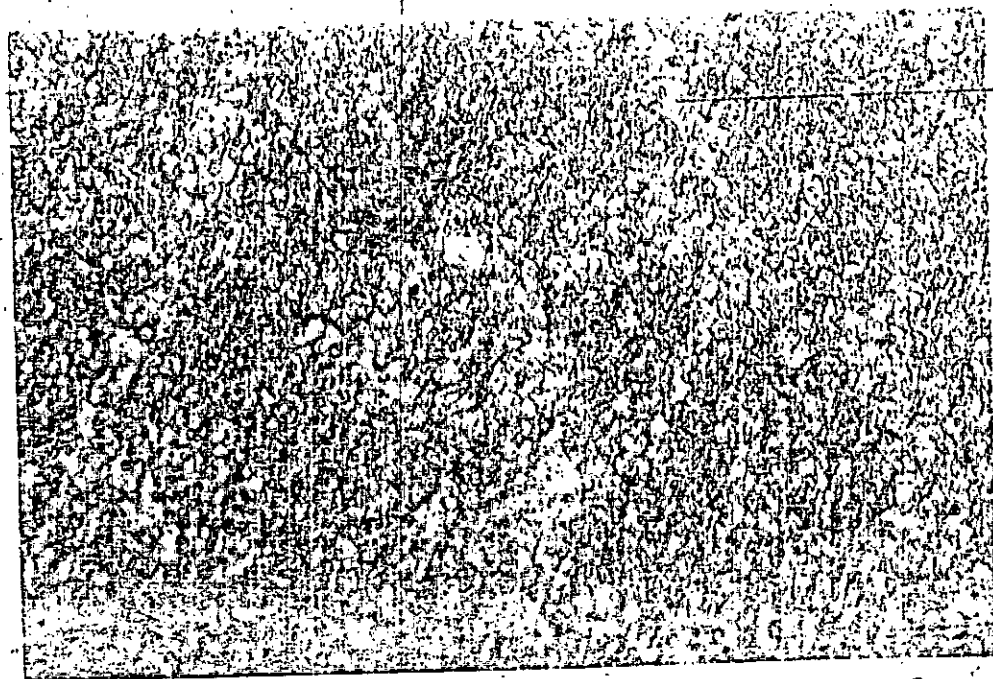


— pearlite

— ferrite

micrographie n° 17
(attaque au Nitel 5%)

Gx250



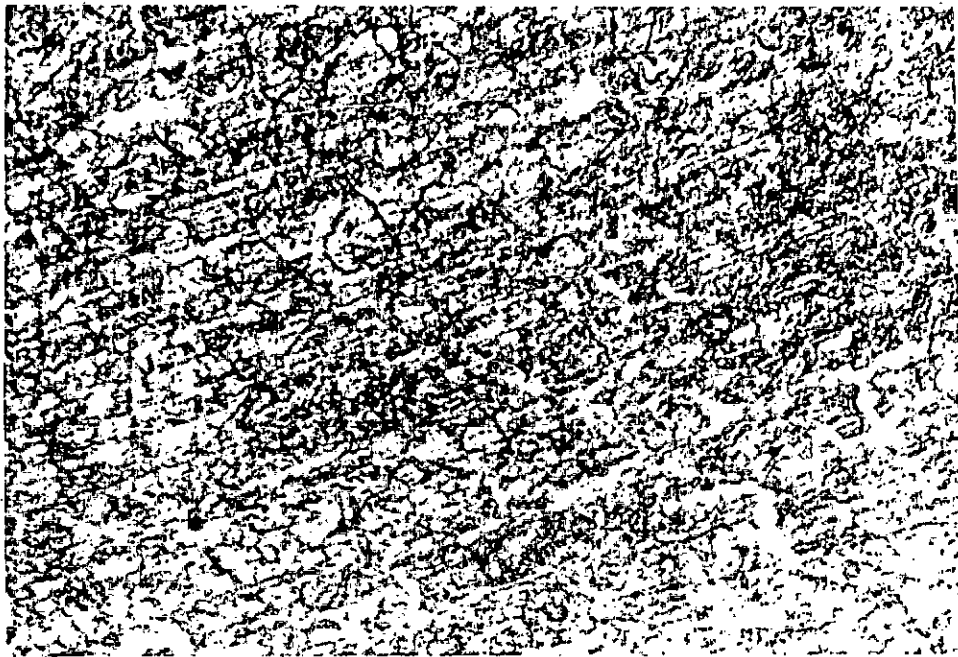
— ferrite

— pearlite

— eutectique
phosphoreux

micrographie n° 18
(attaque au Nitel 5%)

Gx250



— perlite

— ferrite

micrographie n° 21
(attaque au Nital 5%)

Gx250



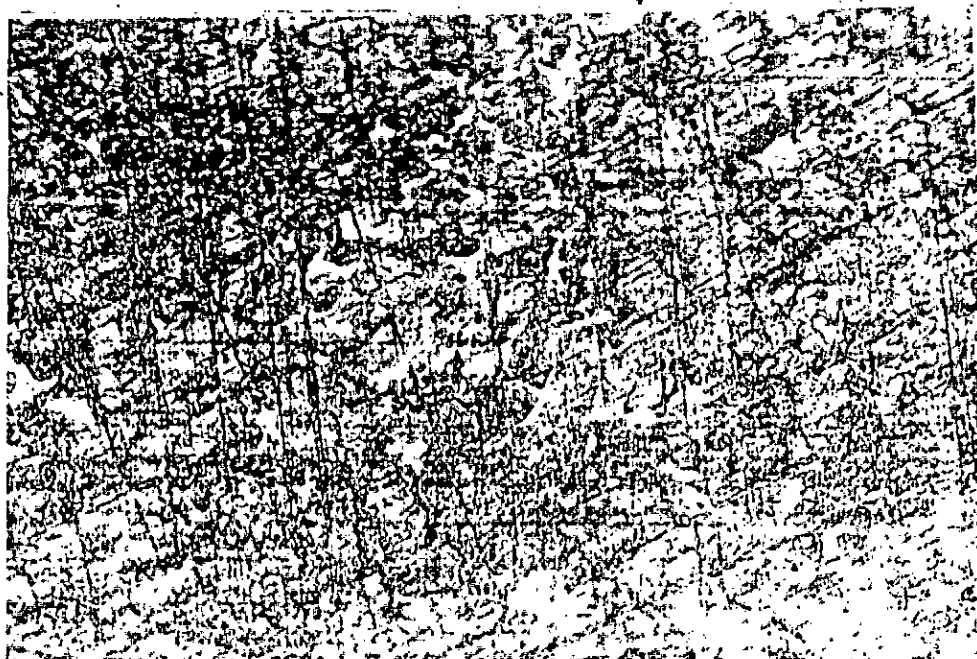
— ferrite

— perlite

— eutectique
phospho-
reux

micrographie n° 22
(attaque au Nital 5%)

Gx250

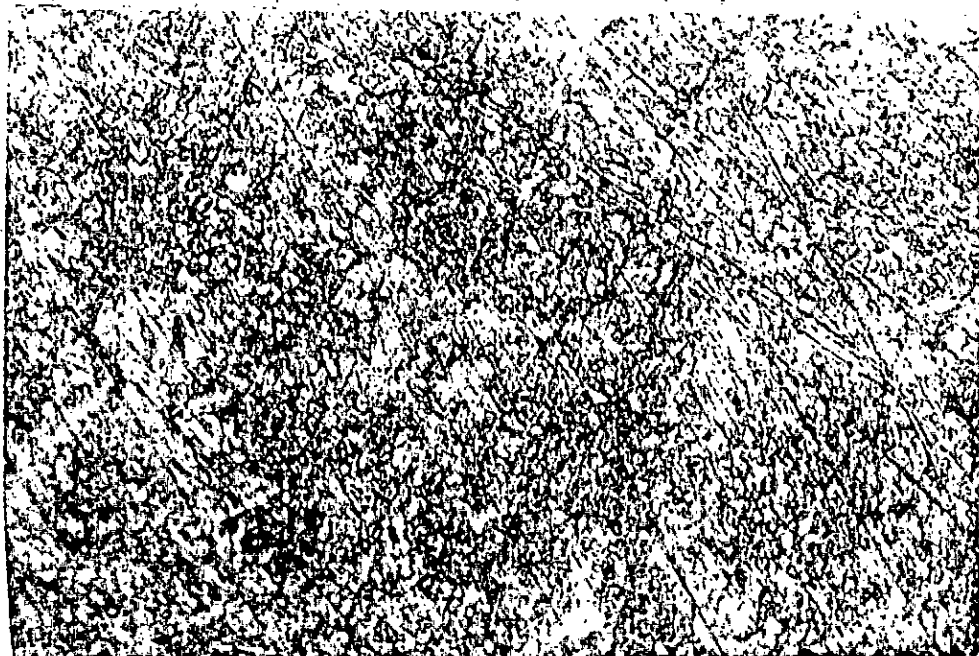


pearlite

ferrite

micrographie n° 19
(attaque au Nital 5%)

Gx250



ferrite

eutectique
phospho-
reux

pearlite

micrographie n° 20
(attaque au Nital 5%)

Gx250

INTERPRETATION

1- Forme et taille du graphite : micrographies n° 1 à 11

Le tableau 3 montre la présence de trois différents types de graphite (A, B et C); ceci en fonction des diamètres des éprouvettes.

La longueur, l'épaisseur et les dimensions des lamelles varient d'un type à l'autre, donc la présence de ces 3 types de graphite montre bien la variation de ces trois facteurs en fonction des diamètres des éprouvettes.

La forme du graphite D caractérisant les faibles sections montre que la durée de transformation du liquide en graphite est assez courte, ce qui correspond effectivement à une grande vitesse de refroidissement (les lamelles sont courtes car elles n'ont pas eu le temps suffisant pour se développer).

L'hétérogénéité de la répartition du graphite (forme B : graphite en rosette) (micrographie n°) est due à la présence des impuretés (telles que les inoculants: le Si dans notre cas utilisé principalement pour varier la composition).

Si l'on compare la morphologie du graphite dans les éprouvettes de même diamètre (22 mm), mais de composition différente (résultats obtenus par les micrographies n° 6 à 11 et représentés dans le tableau 4), nous constatons que cette morphologie ne varie pas beaucoup :

* graphite de forme A

* graphite de forme C caractérisant les fontes hypereutectiques et retrouvé effectivement pour l'éprouvette à 3,25%

de Si lequel est un élément graphitisant dont la présence, en quantité notable, facilite non seulement l'apparition de ces lamelles, mais aussi leur évolution en épaisseur.

2- Matrice : micrographies 12 à 22

Les observations microscopiques des échantillons attaqués (au nital 5 %) révèlent une multitude de structures et une évolution constante de la matrice en fonction du diamètre du moule et du taux en silicium.

Pour des échantillons présentant des différences de diamètre, la structure est perlitique pour les grandes vitesses de refroidissement (faibles diamètres). Ceci est prévu par les diagrammes de LAPLANCHE. Mais en se rapprochant des fortes sections, la ferrite commence à apparaître et la structure devient ferrito-perlitique.

Nous constatons l'existence des eutectiques phosphoreux qui tendent à stabiliser la perlite dans leur voisinage.

Concernant les échantillons de même diamètre mais de différentes compositions (en silicium), la structure est la même pour les échantillons de 2,19 - 2,59 et 2,67 de silicium (structure perlitique). Mais quelques îlots de ferrite apparaissent au fur et à mesure que le pourcentage de silicium augmente. Ces îlots sont plus abondants pour l'échantillon à 3,20 % de silicium car ce dernier relâche considérablement la perlite et produit sa ferritisation. La fonte est devenue presque ferritique.

V.2 - RESULTATS DES ESSAIS MECANIQUES

a- Essai de dureté Brinell :

Tableau 7 : Dureté en fonction du diamètre du modèle

Diamètre de l'éprouvette mm	Dureté HB
10	222
15	211
22	205
33	181
50	163

Tableau 8 : Dureté en fonction du pourcentage de silicium

Pourcentage de silicium	Dureté HB
2,19	205
2,59	189
2,67	180
2,89	162
3,05	135
3,20	122

Dans le tableau 7 sont données les duretés correspondant aux différentes épaisseurs du modèle. La variation de la dureté (voir fig 13) est due, principalement, à l'influence de la vitesse de refroidissement. On remarque que l'augmentation de la vitesse de refroidissement affine simultanément la structure du

ESSAI DE DURETE

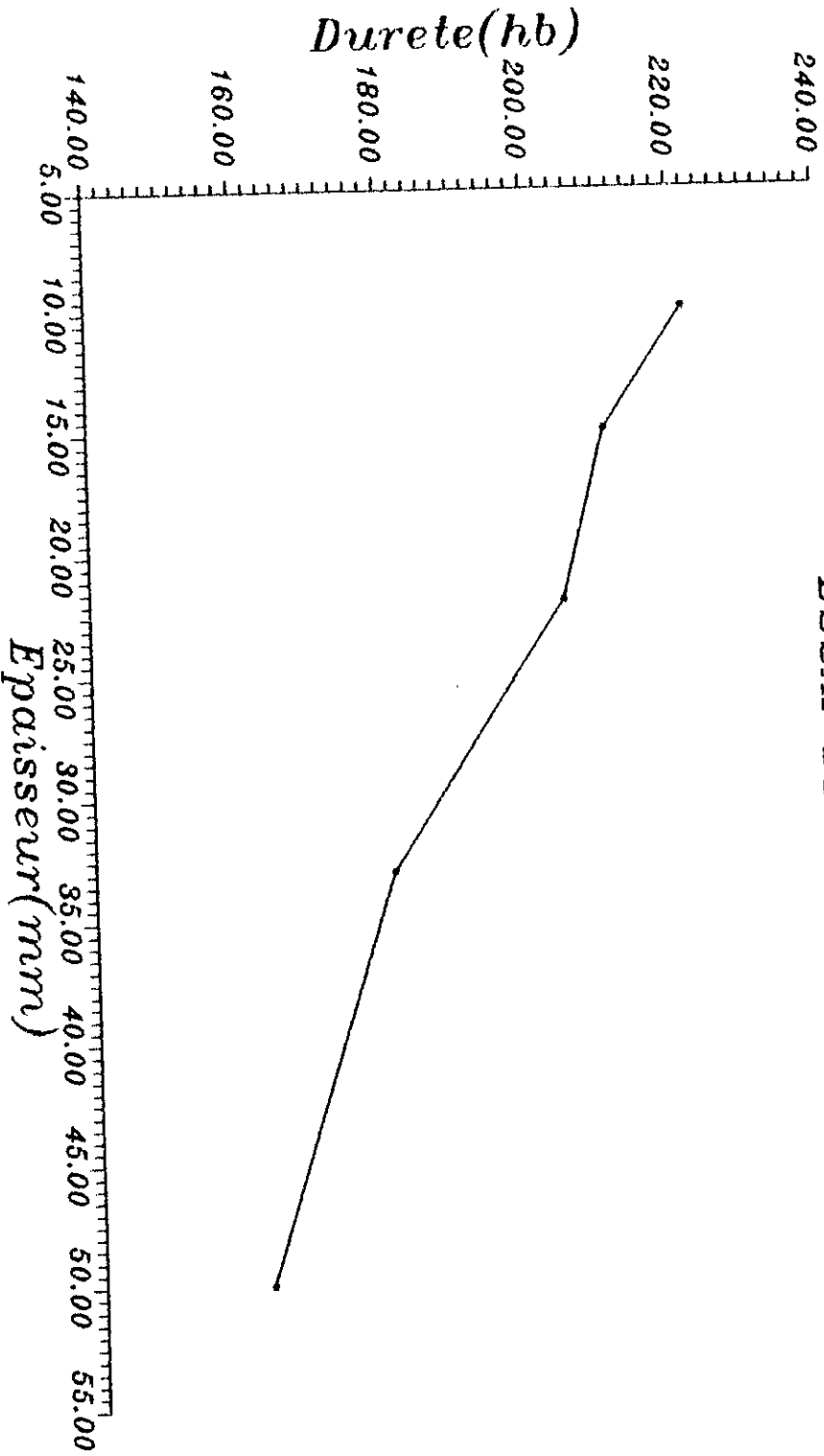


Figure - 13 -

graphite et de la matrice, ce qui augmente la dureté.

La structure est affinée par la forte vitesse de refroidissement car cette dernière ne laisse pas le temps suffisant au carbone pour diffuser. Donc, les lamelles de ferrite et de cémentite qui constituent notre structure seront plus fines (voir constituants de la fonte Ch II.4).

Le tableau 8 regroupe les valeurs de la dureté en fonction du taux en silicium pour les éprouvettes de même diamètre (22 mm); et la figure 14 présente cette variation.

Notons que les inclusions de graphite influent peu sur la dureté dont les valeurs sont déterminées essentiellement par la matrice métallique de la fonte. La ferrite étant peu dure, son apparition, pour les éprouvettes à forts taux en silicium, fait diminuer considérablement la dureté.

b- Essai de traction :

Tableau 9 : Résistance à la traction en fonction des diamètres des éprouvettes

Diamètre de l'éprouvette mm	Résistance à la traction daN/mm²
10	21,92
15	20,76
22	17,76
33	16,30
50	15,08

ESSAI DE DURETE

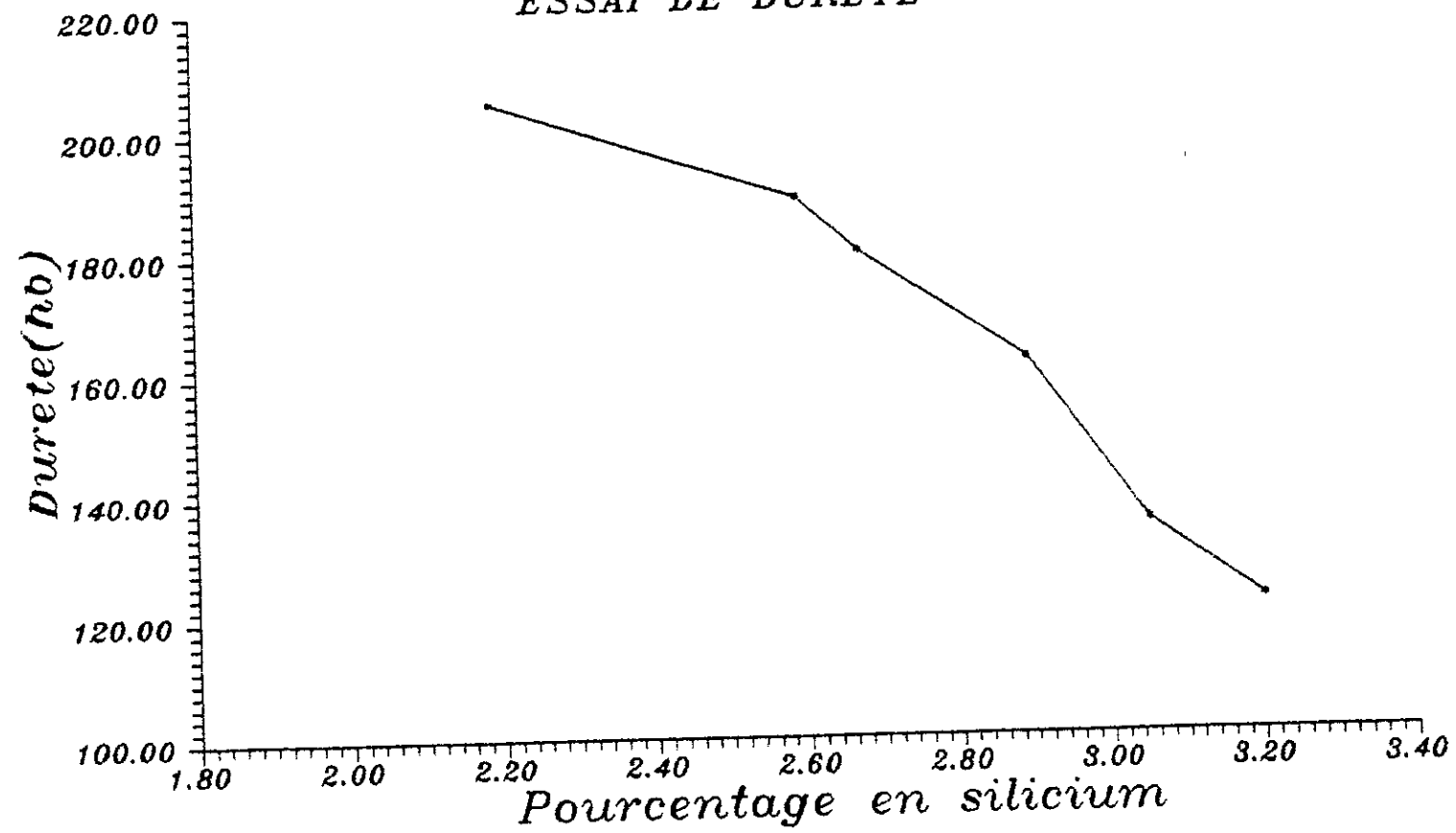


Figure- 14 -

Tableau 10 : Résistance à la traction en fonction du pourcentage de silicium

Pourcentage de silicium	Résistance à la traction daN/mm ²
2,19	17,76
2,59	16,51
2,67	15,98
2,89	13,02
3,05	12,17
3,20	11,00

Dans le tableau 9 sont reportées les valeurs de la résistance à la traction correspondant aux éprouvettes coulées dans des modèles de différents diamètres.

On remarque bien que, lorsque le diamètre augmente, la résistance à la traction diminue sensiblement de 21,19 daN/mm² à 15,08 daN/mm² (fig 15). Cette diminution est dûe essentiellement à l'influence de la vitesse de refroidissement qui a un effet remarquable sur les dimensions des lamelles de graphite comme expliqué précédemment (essai de dureté).

Le tableau 10 contient des valeurs de la résistance correspondant à des éprouvettes ayant différentes teneurs en silicium, et la figure 16 présente la variation de cette résistance en fonction du taux en silicium.

Cette résistance diminue remarquablement si la teneur en silicium augmente car l'élévation de la teneur en cet élément joue le même rôle que la diminution de la vitesse de refroidis-

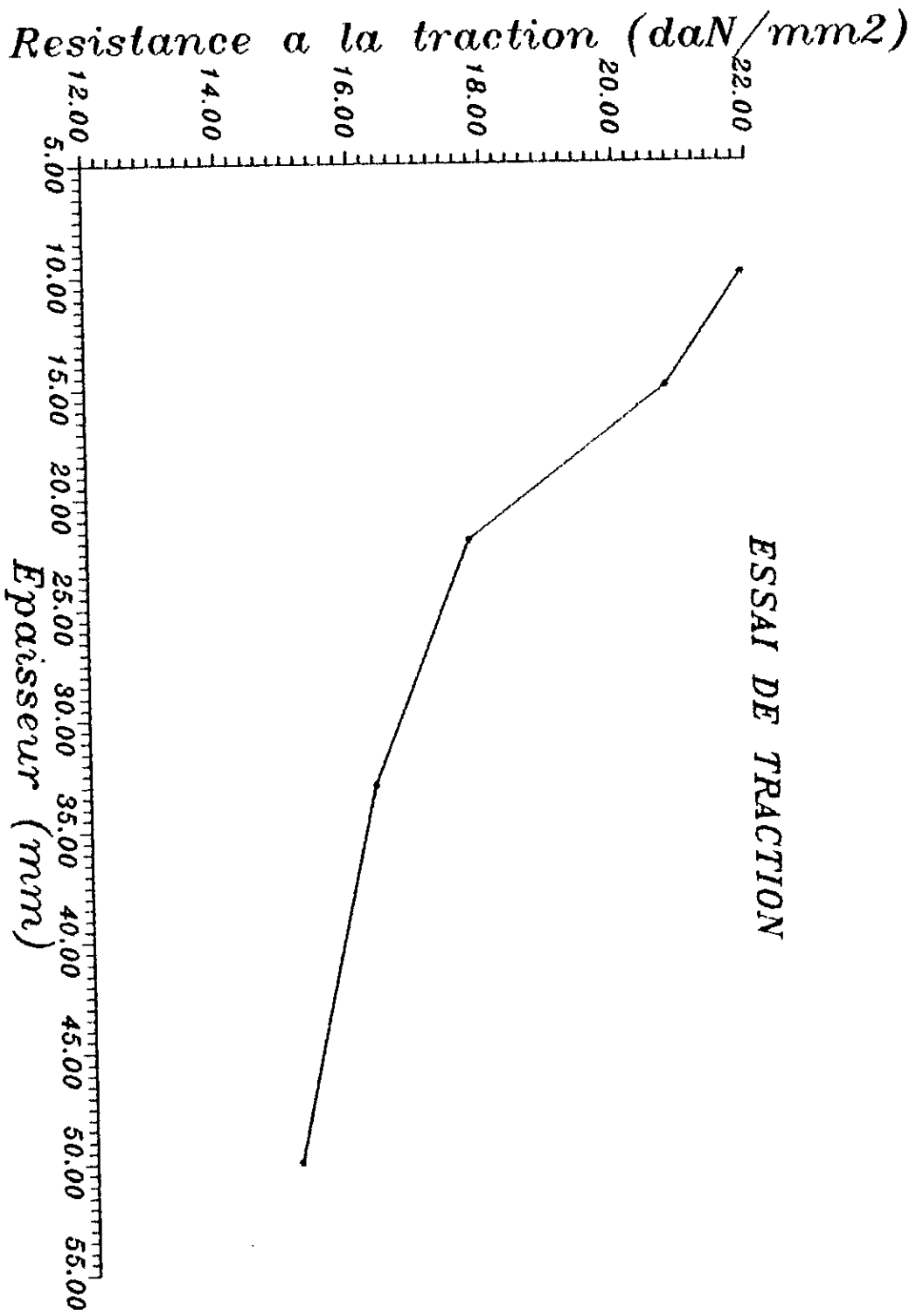


Figure- 15 -

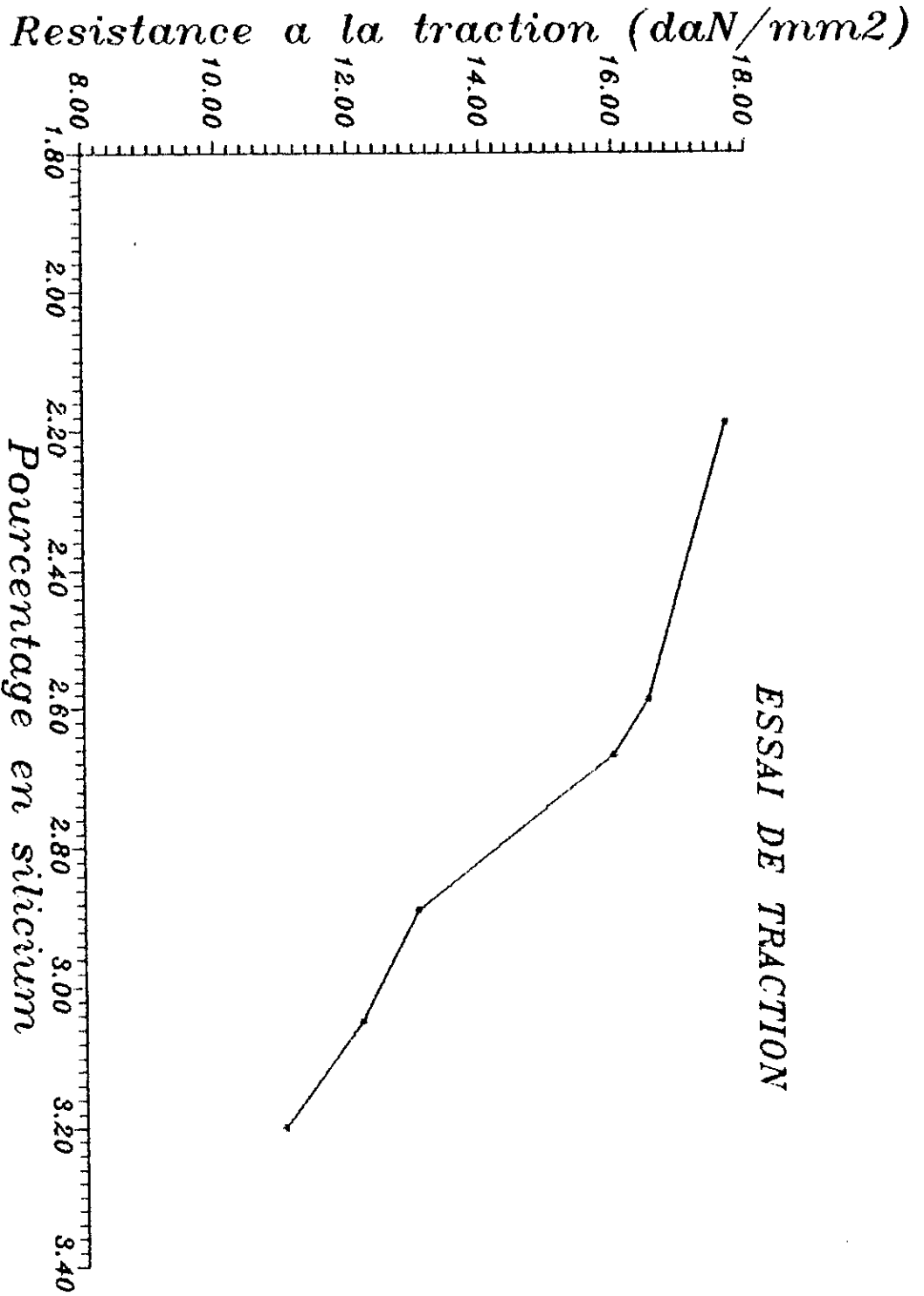


Figure - 16 -

sement (elle fait augmenter les dimensions des lamelles du graphite). De plus, le graphite est la cause d'une multitude "d'effets d'entaille" dans la masse de la fonte.

L'effet d'entaille est caractérisé par le fait qu'une solution de continuité (trou) dans une pièce soumise à un effort mécanique, a pour résultat de modifier, localement, la répartition des contraintes (celles-ci étant alors concentrées au voisinage de la solution de continuité).

Schématiquement, l'effet d'entaille peut être représenté comme indiqué sur la figure 17 sur laquelle chacune des pièces est supposée être soumise à un effort de traction d'égale intensité P .

En 1, la section est continue et les contraintes unitaires sont égales, en tout point, à $n = P / s$ (elles sont représentées par de petites flèches).

En 2, la section totale soumise à la traction a toujours pour valeur " s ", mais elle est discontinue du fait du trou.

Un calcul des contraintes unitaires le long de l'axe xx' montre qu'elles ont des valeurs variables. Elles sont maximales au bord du trou (représentation schématisée par de petites flèches). On dit qu'il y a une concentration des contraintes au voisinage du trou.

L'expérience montre que la variation de la valeur des contraintes unitaires est d'autant plus rapide, toutes choses égales, que la valeur du rayon de courbure de la solution de contrainte est plus faible (fig 17-3). Et comme la moyenne des

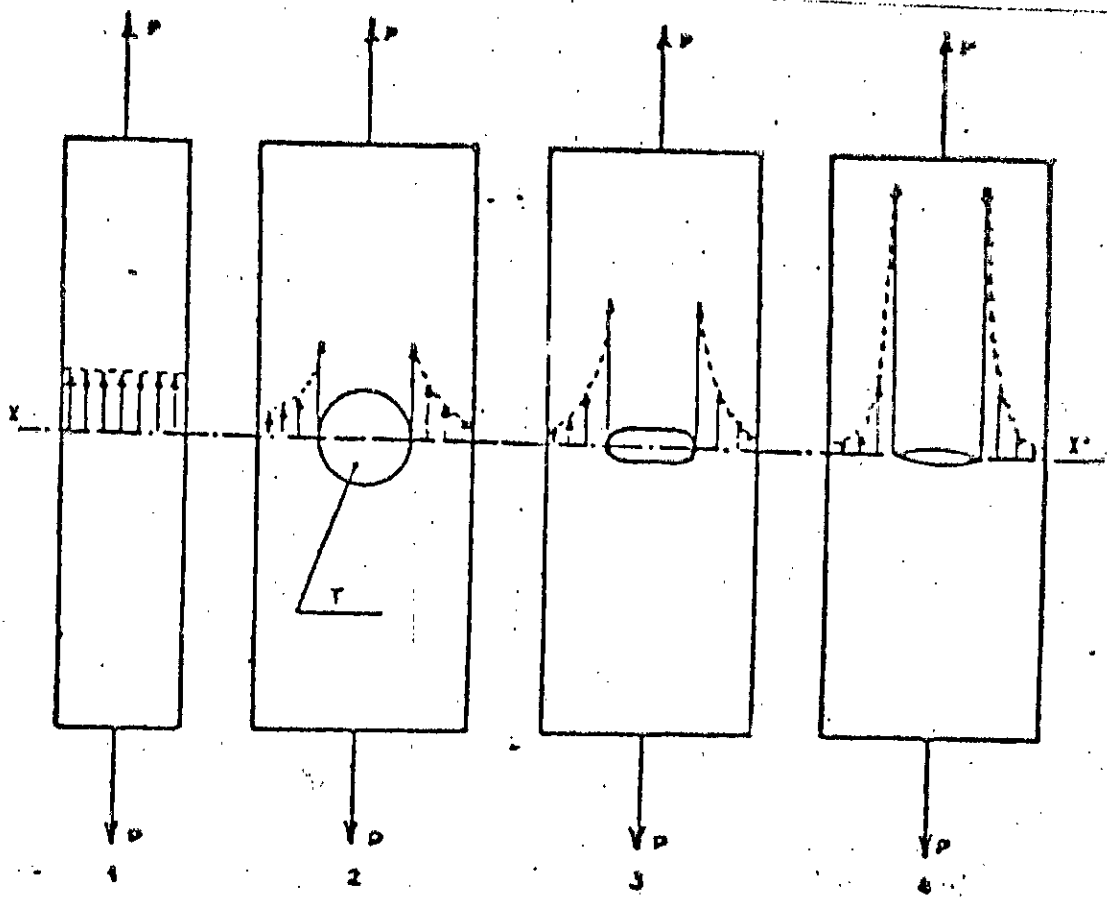


Fig 17: - Au droit de la ligne XX' , chacune des éprouvettes présente la même section droite.

contraintes unitaires est constante et égale à P/s , la valeur de la contrainte voisine du trou est relativement plus grande que le rayon de celui-ci est plus faible.

La variation atteint son maximum quand le rayon est nul; c'est à dire, quand le trou présente des contours effilés (fig 17-4). C'est également dans ce cas que, pour une valeur donnée de P , la contrainte unitaire au bord du trou atteint sa valeur maximale.

Lorsque, du fait de la présence d'un trou, la contrainte maximale atteint la valeur R_r de la résistance de rupture, la pièce casse alors que la valeur du rapport P/s exprimant celle de la contrainte moyenne est encore fort éloignée de R_r .

De ce qui précède, il résulte que, pour chaque particule de graphite formant un trou dans la matrice de la fonte, il y aura concentration des contraintes au droit de chacun de ces trous.

c- Essai de résilience :

Tableau 11 : Résilience en fonction des diamètres des éprouvettes

Diamètre de l'éprouvette mm	Résilience d_{aj} / cm^2
10	0,32
15	0,32
22	0,32
33	0,38
50	0,41

Tableau 12 : Résilience en fonction du pourcentage de silicium

Pourcentage de silicium	Résilience d_{aj} / cm^2
2,19	0,32
2,59	0,41
2,67	0,41
2,89	0,41
3,05	0,48
3,20	0,48

Le tableau 11 contient les valeurs de la résilience correspondant à chaque diamètre et la figure 18 représente sa variation en fonction du diamètre. ~~(et de la teneur en silicium).~~

On remarque que les valeurs de la résilience varient sensiblement, elle ^{est} même constante pour les diamètres 10, 15 et 22. Ceci est parfaitement attendu car cet essai n'est pas comparatif pour les matériaux de même composition en carbone (qui est constant dans notre cas) et qui est l'élément essentiel pour classer une structure (acier, fonte blanche, fonte grise,...). Cependant cet essai nous renseigne sur le comportement au choc d'une structure donnée (ductile, fragile).

La variation de la résilience en fonction du pourcentage de silicium est représentée par la figure 19.

D'après les valeurs obtenues, on peut dire que la fonte grise est fragile car elle présente de faibles valeurs de résilience. Cette fragilité est cependant moins importante si les lamelles du graphite sont plus épaisses. Ceci est du au fait que la résilience varie dans le sens contraire de la dureté.

ESSAI DE RESILIENCE

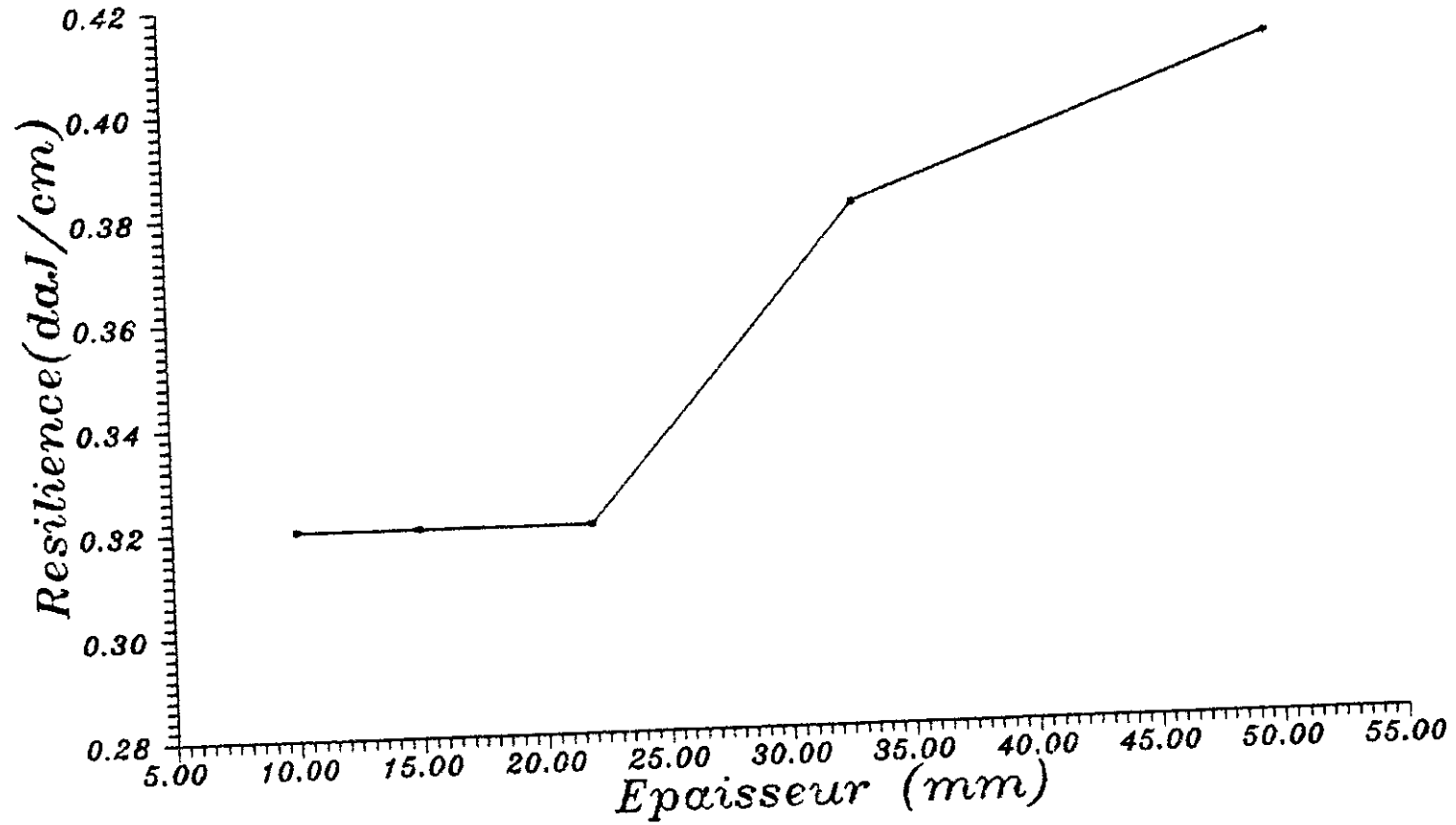


Figure- 18 -

ESSAI DE RESILIENCE

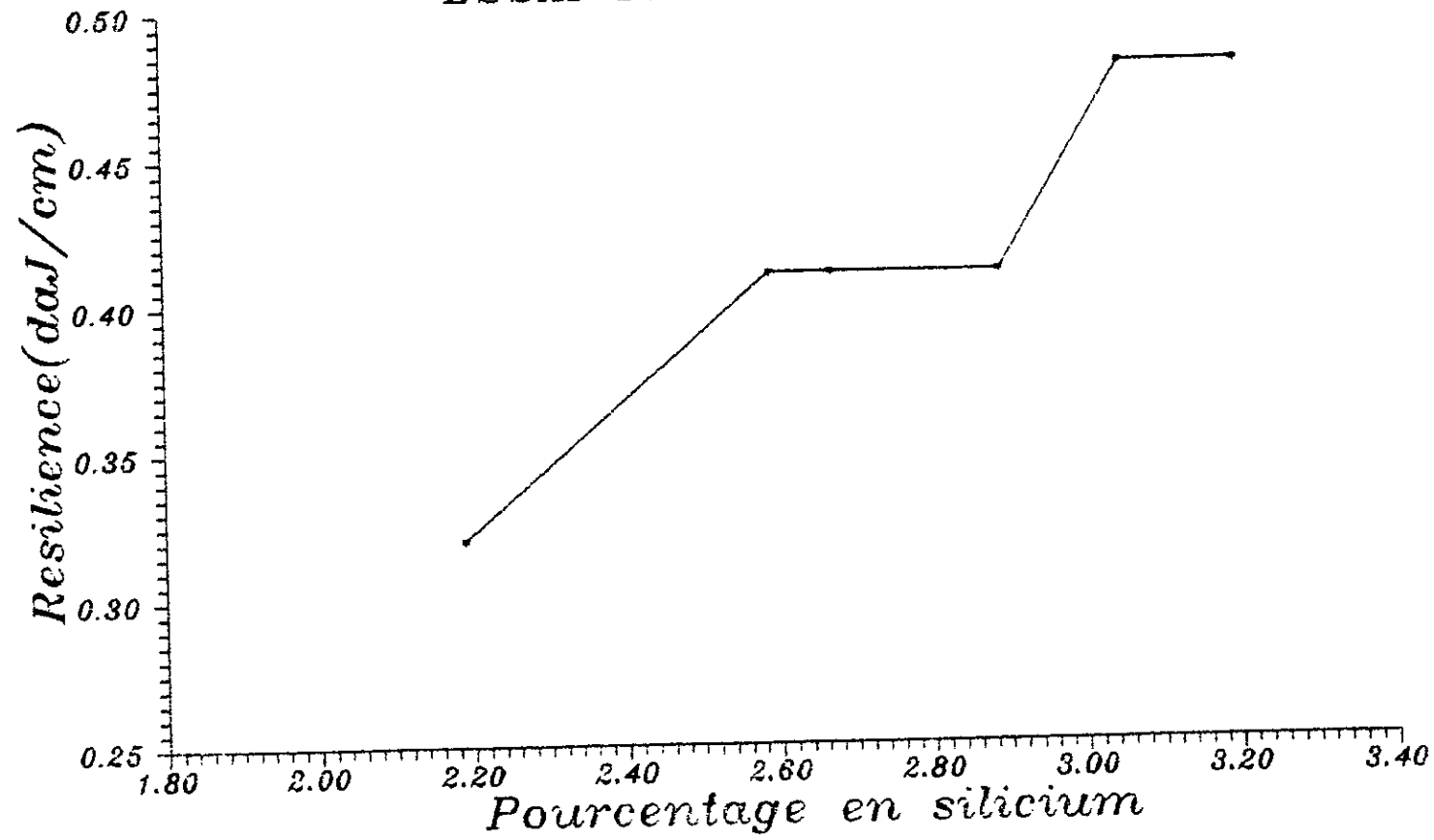


Figure- 19 -

CONCLUSION

La conclusion que nous pouvons tirer à partir de cette étude est la suivante :

Le silicium, ainsi que la vitesse de refroidissement influent sur la structure et donc sur les propriétés mécaniques de la fonte grise.

A - Influence du silicium :

Les propriétés varient comme suit en fonction du taux en silicium :

- 1 - La dureté diminue avec l'augmentation des quantités de silicium.
- 2 - Les valeurs de la résistance à la traction sont inversement proportionnelles aux taux de silicium.
- 3 - La résilience varie dans le même sens que le pourcentage du silicium.

Tandis que la structure devient plus ferritique si le silicium est présent en quantité assez importante.

B - Influence de la vitesse de refroidissement :

Elle agit différemment sur les caractéristiques mécaniques de la fonte :

- 1 - La dureté augmente avec l'augmentation de la vitesse de refroidissement.
- 2 - La résistance à la traction fait de même.
- 3 - La résistance au choc (résilience) varie discrètement dans le même sens que la vitesse de refroidissement.

La ferrite est présente en plus grande quantité si la vitesse de refroidissement est ^{moins} importante.

En jouant donc sur ces deux facteurs, on peut changer la structure et varier la forme du graphite, sans faire appel aux traitements thermiques qui peuvent conduire, parfois, à des surprises non souhaitables.

BIBLIOGRAPHIE

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

- 1 - C. CHAUSSIN, G. HILLY - Métallurgie, Dunod; 1976.
- 2 - J.C. MARGERIE - Technique de l'ingénieur, (M 380-1) -
(M 380-16).
- 3 - J. BARDALIS, G MEDER - Précis de métallurgie: Elaboration,
structure, propriétés et normalisa-
tion; 1988.
- 4 - M. GEIER - Métallurgie de fonderie, Tomes 1 & 2; 1976.
- 5 - LAKHTINE - Métallurgie et traitement thermique des métaux,
1986.
- 6 - ANDRE, ROOS, BENARD MILET - Précis de métallurgie appliquée
- 7 - H. LEBRETON - Fondeur de fonte, Dunod; 1966.
- 8 - A.F.N.O.R. - Fonderie, Paris, 4° Edition; 1987.
- 9 - C.S. BARRET - Structure des métaux.
- 10- I. TUDOR - Métallurgie physique.
- 11- A. ROOS - Précis de métallurgie appliquée.