

3/98

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Département Métallurgie



PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat

Thème :

***INFLUENCE DE LA VITESSE DE REFOIDISSEMENT SUR
LES PROPRIETES DES FONTES GSC, GSA ET Ft 25.***

Etudié par :

Mr. Abdel Ouahab DEBIECHE

Proposé et dirigé par :

Dr. E. SALIH

Promotion – JUIN 1998 -

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Département Métallurgie

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat

Thème :

***INFLUENCE DE LA VITESSE DE REFOIDISSEMENT SUR
LES PROPRIETES DES FONTES GSC, GSA ET Ft 25.***

Etudié par :

Mr. Abdel Ouahab DEBIECHE

Proposé et dirigé par :

Dr. E. SALHI

Promotion – JUIN 1998 -

ملخص :

إن صناعة القطع الميكانيكية من الحديد الصلب بواسطة القوالب تطرح مشاكل تغير خصائصها الميكانيكية و البنيوية بتغير سمك السطح الداخلي. بهدف دراسة هذا التغير قمنا باختبار الصلابة و قوة التماسك و كذلك دراسة مجهرية على قطعة مدرجة.
الكلمات الدلالية :

الحديد الصلب، الصلابة، قوة التماسك، البنية المجهرية.

Abstract:

The manufacturing of parts from cast iron by molding is subject to problem's change of mechanical and structural properties in relation of the part's thickness.

Our work aims to study this change and in order to achieve it, the mechanical tests have been performed such as: measure of hardness and test of roughness. At the last, the samples in shape of scale have been observed using an optical microscope

Key words :

Cast iron, hardness, roughness, optical structure.

Résumé :

La fabrication des pièces par moulage en fonte brute de coulée pose des problèmes de variation des propriétés mécaniques et structurales en fonction de l'épaisseur des parois.

Dans le but d'étudier cette variation, nous avons effectué des essais de résilience et de dureté ainsi qu'une observation métallographique sur les différentes épaisseurs d'une éprouvette en escalier.

Mot clefs :

Fonte brute de coulée, dureté, résilience, structure métallographique.



Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance et respect
à :*

- ❖ *Mes chers parents.*
- ❖ *Mes frères et sœurs.*
- ❖ *Toute ma famille.*
- ❖ *Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ma formation.*
- ❖ *Tous mes amis.*

DEBIECHE ABDEL OUHAB.

Remerciement



*Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur
MR. : E. SALHI qui par ses orientations a contribué à
la réalisation de ce mémoire.*

*J'exprime ma reconnaissance à tous les enseignants qui ont
contribué à ma formation.*

*J'adresse mes remerciements à l'ensemble des personnel de
la fonderie et de l'atelier mécanique de l' U. F. R de la
S.N.V. I .*

DEBIECHE ABDEL OUAHAB

-INTRODUCTION

-CHAPITRE I :GENERALITES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Définition.....	3
2. Constituants et phases des fontes.....	5
3. Différents aspects du graphites.....	6
4. Désignation de la microstructure du graphite dans la fonte.....	6
5. Diagramme d'équilibre Fe-C.....	7
6. Sensibilité à l'épaisseur des fontes grises.....	13
7. Mécanisme de graphitisation des fontes grises.....	14
8. Comportement des fontes grises en fonction de l'utilisation.....	16

-CHAPITRE II :ETUDE EXPERIMENTALE

1. Elaboration de la fonte.....	17
2. Composition chimique des fontes élaborées par l'U.F.R.....	19
3. Caractéristiques mécaniques des fontes élaborées par l'U.F.R.....	21
4. Eprouvette d'essai.....	22
5. Coulée de l'éprouvette.....	23
6. Usinage de la pièce.....	24
7. Essai de résilience.....	24
8. Essai de dureté.....	27
9. Examen métallographique.....	28
10. Analyse quantitative.....	30
11. Analyse chimique.....	33

-CHAPITRE III :RESULTATS ET INTERPRETATION

1. Analyse chimique.....	35
2. Influence de l'épaisseur sur la structure.....	35
3. Influence de l'épaisseur sur dureté.....	48
4. Influence de l'épaisseur sur la résilience.....	50

-CONCLUSION.....	52
-------------------------	-----------

-REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

-ANNEXE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le développement des techniques que vit actuellement notre époque dans les différents domaines comme l'électronique, la mécanique... etc., demande toujours une utilisation plus large des métaux. L'évolution continue de ces technologies, ainsi que la complication de ces prescriptions que doivent satisfaire les métaux, exigent une connaissance parfaite de leurs structures et propriétés.

Le but de ce projet est de faire une étude d'optimisation de l'épaisseur des pièces en fonte en absence des refroidisseurs lors de la coulée. Dans ce cadre, on s'intéressera à la détermination des propriétés mécaniques et structurales des trois fontes GSC38-15, GSA56-5 et Ft25 élaborée à l'unité de fonderie de rouiba en fonction de l'épaisseur, d'une manière plus précise nous allons étudier la variation de la dureté, de la résilience et celle de la structure en fonction de l'épaisseur d'une éprouvette en escalier moulée en sable.

Une étude similaire a été faite l'année passée par M.HACHOUR visant la détermination des propriétés mécaniques et structurales en fonction de

l'épaisseur. Dans le présent travail, on a essayé d'apporter une correction du pourcentage de silicium dans la composition chimique.

Notre travail a commencé par une étude bibliographique sur les fontes grises, qui pose d'une manière générale leurs propriétés mécaniques, leur composition chimique, ainsi que les différents mécanismes de solidification, bien sûr on passant par leurs élaborations.

Au deuxième chapitre on a donné des descriptions des différentes méthodes expérimentales tel que la dureté, la résilience, ainsi que l'analyse quantitative et qualitative, car tous les produits finis doivent subir ces techniques expérimentales afin de contrôler leurs qualités ainsi que leurs aptitudes aux différentes contraintes.

En fin, au troisième chapitre on a donné des résultats numériques pour les différentes techniques expérimentales sous forme de tableaux et graphes afin d'expliquer et interpréter leur évolution.

CHAPITRE I

GENERALITES

BIBLIOGRAPHIQUES

I.1. DEFINITIONS

I.1.1. *Fonte* :

Les fontes sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone varie théoriquement de 2,17 à 6,67%, outre ces deux éléments elles contiennent essentiellement du silicium, Manganèse, Soufre, et phosphore, dans le cas des fontes non alliées, et de plus de Chrome, Molybdène, Aluminium, dans le cas des fontes alliées [1-2-3] .

Les fontes ont des propriétés mécaniques relativement médiocres et sont souvent utilisées à cause :

- * de leur température de solidification relativement basse.
- * de leur très faible retrait lors de la solidification.

I.1.2. *Fontes grises lamellaires* :

Ce sont des alliages Fe-C-Si qui contiennent des impuretés inévitables du Mn, S et P. Le graphite dans ces fontes partiellement sous forme de lamelles. Ces fontes ont pratiquement des teneurs en carbone comprises entre 3 et 4%, et inférieur à 3% en Si.

I.1.3. *Fontes grises à graphite sphéroïdal* :

Ce sont des fontes dans lesquelles le graphite se trouve sous forme sphéroïdale. Elles sont obtenues par l'addition du Magnésium qui confère au graphite, pendant la cristallisation.

A cause de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, elles sont très utilisées dans diverses branches de l'industrie :

- * Pièces pour l'industrie automobile (engrenages, vilebrequins...).
- * Pièces pour l'industrie chimique et pétrolière (conduites, pompes...).
- * Pièces pour l'industrie lourde (cylindre de laminoirs, pièces pour presses...).

I.1.4. Normalisation des fontes grises :

Normalisation des fontes à graphite lamellaire [NF A 32-101 et 302-102]

La normalisation est basée sur la valeur de la résistance à la traction (R_m). Elle comporte les lettres Ft suivies de la valeur minimale de R_m (daN/mm^2).

Exemple : Ft 25

$$R_m \text{ minimal} = 25 \text{ daN/mm}^2.$$

Normalisation des fontes à graphite sphéroïdal [NF A 32-201]

La fonte grise à graphite sphéroïdal est désignée par FGS suivie de deux nombres indiquant les valeurs minimales de R_m (MPa) et de A%.

Exemple : FGS 370-17

$$R_m \text{ minimal} = 370 \text{ MPa.}$$

$$A \text{ minimal} = 17 \text{ \%}.$$

I.2. CONSTITUANTS ET PHASES DES FONTES [3-4] :

a) **Ferrite** : Elle est constituée par l'insertion, en très faible teneur (%C < 0,02%) du carbone dans le fer (α), à la température ordinaire. Les caractéristiques de la ferrite sont :

- * Relativement douce (HV =90)
- * Très ductile (A =35%)
- * Résilience (K =30)
- * Masse volumique égale à 7,86 gr/cm³.

b) **Cémentite** : C'est un carbure dû à la combinaison du fer et du carbone, de formule chimique Fe₃C. La cémentite est très dure (Hv =600 ÷700), mais fragile, sa charge de rupture à la traction est très élevée (175 ÷200 daN/mm²).

c) **Perlite** : C'est un eutectoïde qui se présente généralement sous forme lamellaire. Chaque grain est formé de lamelles alternées de ferrite et de cémentite dont l'épaisseur et les écarts dépendent de la vitesse de refroidissement.

La perlite est formée de 87% de ferrite et de 13% de cémentite, elle est très dure (HB=200), résistante (Rm=850 N/mm²), et assez ductile (A=10%).

d) **Graphite** : Il est constitué du carbone pur, de densité 2,2 gr/cm³, le système cristallin du graphite est formé de couches à disposition hexagonale non compacte, glissant facilement l'une sur l'autre : de l'une à la suivante. Grâce à

cette structure le graphite joue un rôle lubrifiant qui explique les qualités de frottement et d'usinabilité.

I.3. DIFFERENTS ASPECTS DU GRAPHITE [4] :

Les différents aspects, fonction de la composition chimique, et de vitesse de refroidissement, des traitements thermiques ultérieurs effectués sur les pièces, peuvent être les suivants :

a) **Graphite sphéroïdal** : Le graphite se présente sous l'aspect de petites sphères isolées et régulières. Il résulte du traitement de la fonte liquide par des éléments spéciaux.

b) **Graphite non sphéroïdal** : Il se présente sous plusieurs aspects :

- * Graphite lamellaire.
- * Graphite en rosette.
- * Graphite nodulaire.
- * Graphite vermiculaire.

I.4. DESIGNATION DE LA MICROSTRUCTURE DU GRAPHITE DANS LA FONTE [NF A 32-100] :

On désigne le graphite suivant sa forme, sa répartition et ses dimensions (Annexe 1).

I.5. DIAGRAMMES D'EQUILIBRES Fe-C [4, 5] :

Les alliages fer-carbone sont de deux types ; les uns contiennent du carbone libre (graphite), et correspondent à un état stable ; les autres contiennent le carbone sous forme d'une combinaison Fe_3C ou cémentite et correspondent à un état métastable.

On doit donc considérer deux diagrammes d'équilibres Fe-C :

- * Diagramme Fer-cémentite.
- * Diagramme Fer-graphite.

I.5.1. *Diagramme Fer-cémentite :*

La figure 1-1 représente le tracé de ce diagramme pour les teneurs en carbone inférieures à 6,67%. En étudiant les divers points, ainsi que les lignes de transformations :

- A : (1539 °C) point de fusion du fer pur.
- D : (1600 °C) point de fusion de la cémentite.
- N (1392 °C) et G (910 °C) : points de transformation polymorphe du fer.
- B : (0,15% C) marque la solubilité limite du carbone dans la phase liquide en équilibre avec le fer δ à la température du palier péritectique.
- H : (0,1% C) marque la stabilité limite du carbone dans le fer

δ à 1499 °C.

- I : (0,16% C) marque la stabilité limite du carbone dans l'austénite (γ) à 1499 °C.
- E : (2,14% C) marque la stabilité limite du carbone dans l'austénite à la température du palier eutectique (1147 °C).
- S : (0,8% C) marque la stabilité limite du carbone dans la ferrite Fe(α).
- BC : Liquidus qui matérialise le début de la cristallisation de l'austénite (γ) à partir du liquide.
- ECF : Solidus qui correspond à la cristallisation de l'eutectique appelé lédéburite (Led).
- HIB : palier qui marque la transformation péritectique.
- AH : solidus qui limite l'existence du liquide et les cristaux de la ferrite δ (au-dessous).

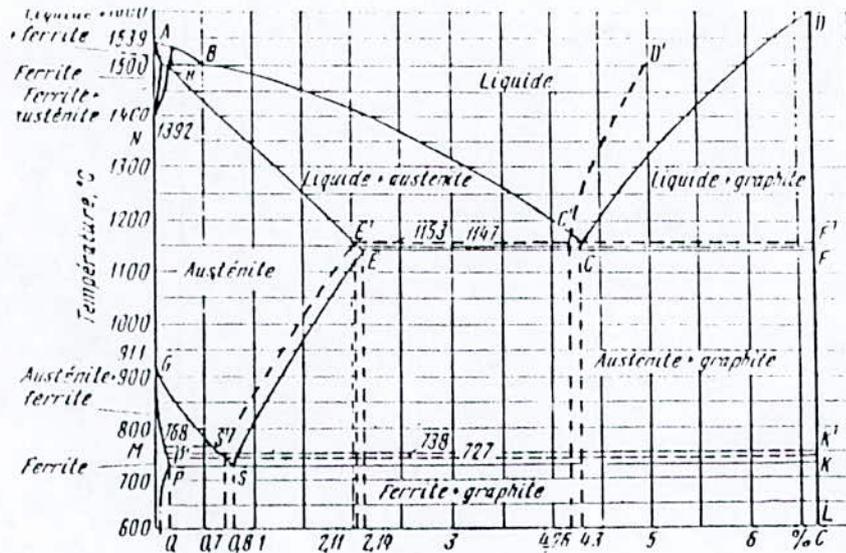


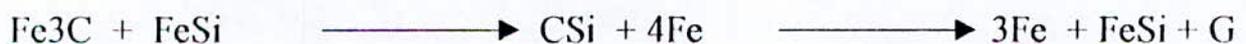
Figure I-2. Diagramme fer-graphite.

I.5.3. DIAGRAMME D'EQUILIBRE PSEUDO-BINAIRE Fe-C-Si

L'influence d'une impureté X sur l'équilibre des phases des alliages Fe-C sont décrites complètement par les diagrammes ternaires Fe-C-X [1, 3]

Nous nous limiterons, dans le cadre de la présente étude, à présenter l'influence de l'addition du silicium dans les fontes grises sur le diagramme d'équilibre Fe-C.

Le silicium exerce une influence directrice essentielle sur le passage du système métastable au système stable. Il favorise la précipitation du carbone sous forme du graphite selon la réaction :



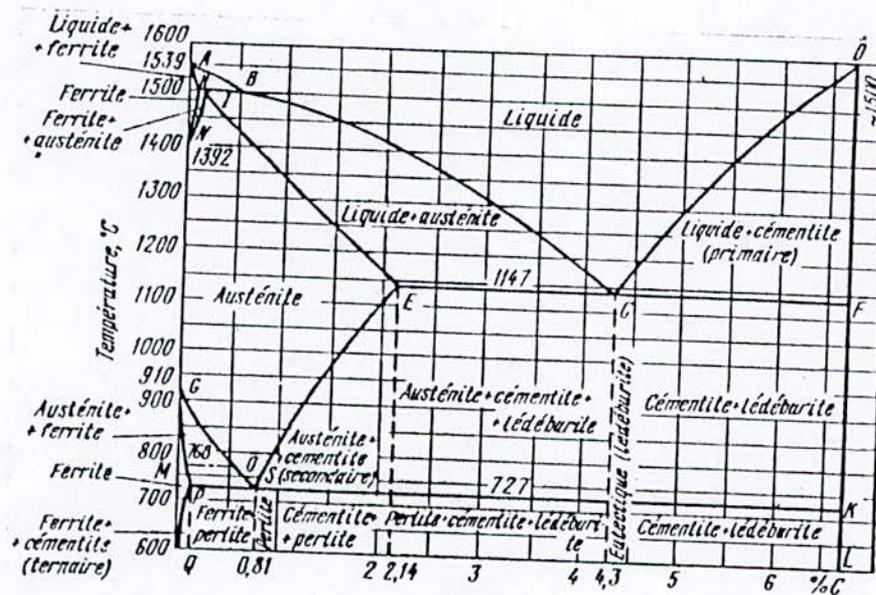


Figure I-1. Diagramme fer-cémentite

I.5.2. Diagramme fer-graphite:

Le diagramme fer-graphite est analogue au diagramme fer-cémentite, voir figure 1-2.

La formulation d'une phase stable de graphite dans la fonte peut se produire soit par précipitation immédiate du graphite à partir de la solution solide (ou liquide), soit par décomposition irréversible de la cémentite



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, de l'intervalle de solidification qui est moins grand.

Dans la figure 1-3, trois diagrammes Fe-C correspondant à des teneurs en silicium de 0%, 2% et 4% sont présentés.

De là nous pouvons remarquer que le silicium :

- * Déplace les températures eutectoïde et eutectique vers le haut et déplace le taux de carbone vers la gauche.

- * Modifie l'allure générale du diagramme.

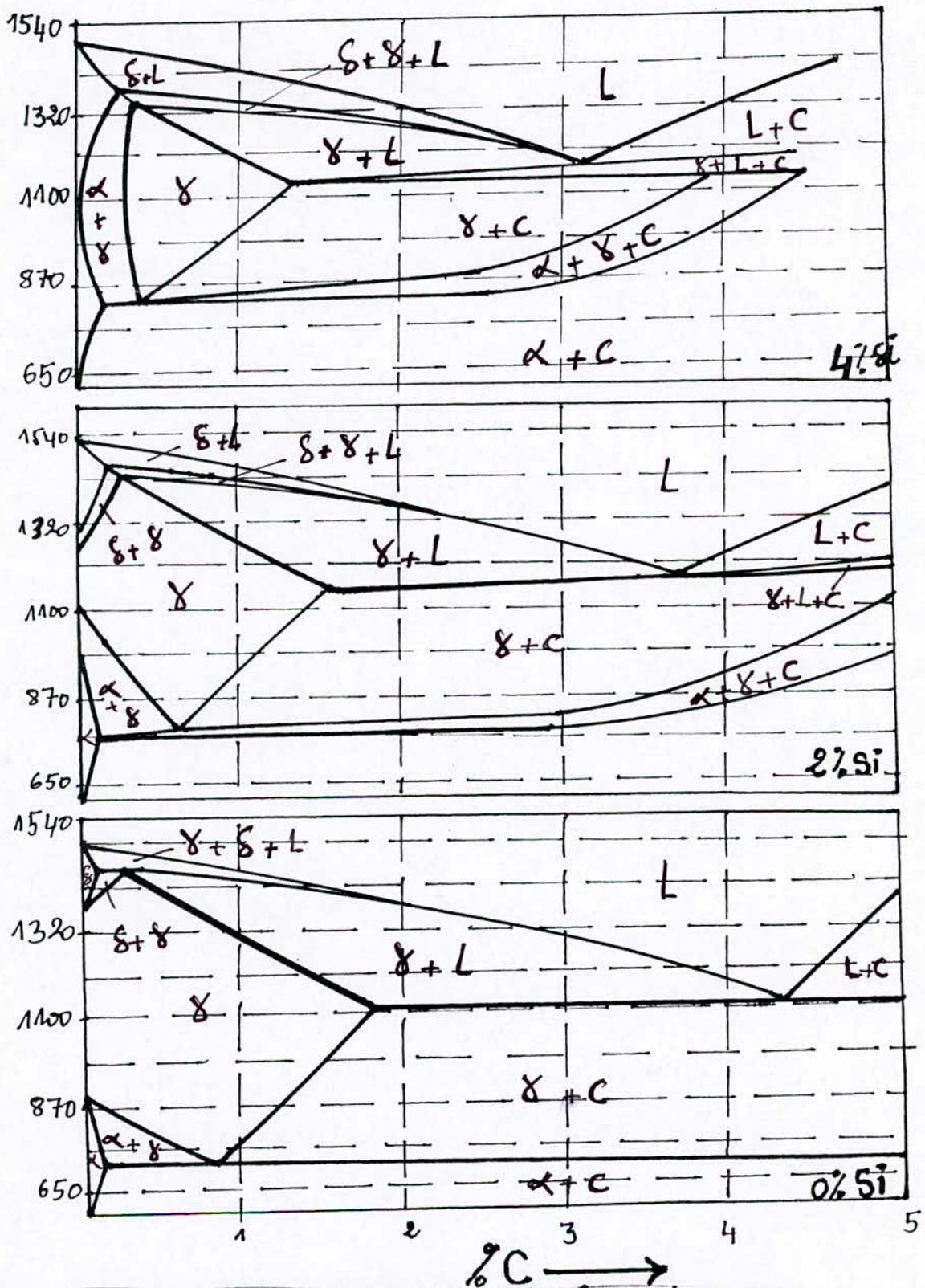


Figure I-3. Diagramme de solidification fer-carbone pour les teneurs en Si de 0%, 2% et 4% [5].

I.6. SENSIBILITE A L'ÉPAISSEUR DES FONTES GRISES

Les caractéristiques mécaniques et la structure métallographique dépendent de la composition chimique et de la vitesse de refroidissement.

La vitesse de refroidissement varie en sens inverse avec l'épaisseur de la pièce, on peut obtenir plusieurs structures différentes dans une même pièce, et notamment des régions trempées ou blanches aux points refroidis rapidement tels que les angles des pièces.

Une étude a été faite par Schwars et Wath [9] en 1933, sur des éprouvettes en escalier, montre la variation des propriétés mécaniques (la dureté et la résistance à la traction) en fonction des diamètres des éprouvettes coulées avec une fonte de composition (3,1 – 3,5)%C, 1,90%Si, 0,75%P, 0,45%Mn et 0,02%S (voir figure 1-4).

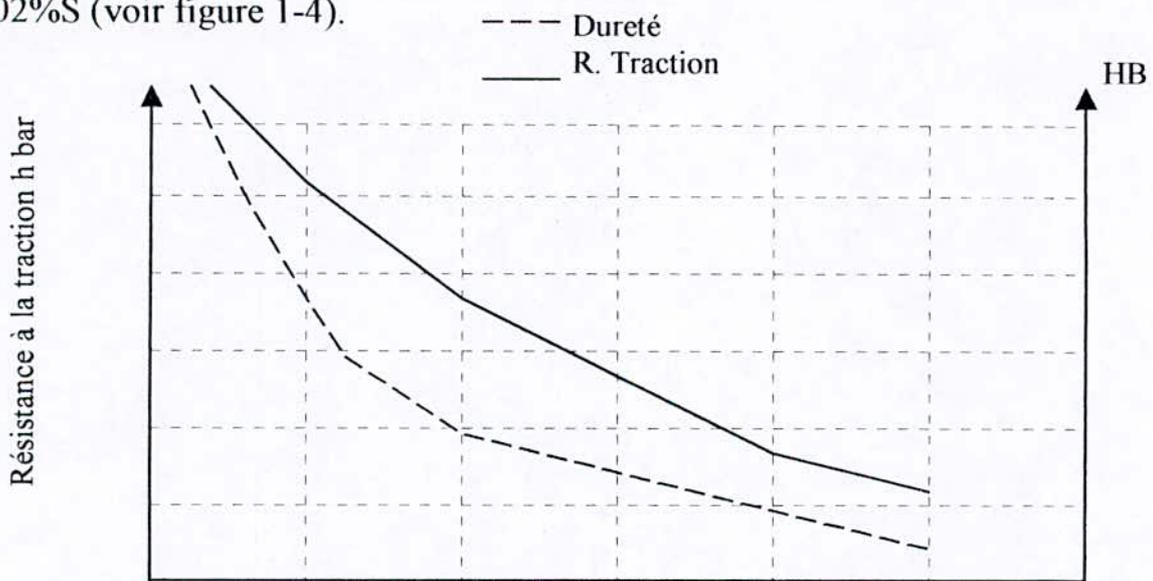


Figure 1-4. Courbes de variation de la résistance à la traction et la dureté en fonction des diamètres des éprouvettes [9].

1.7. MÉCANISMES DE GRAPHITISATION DES FONTES GRISES

[1, 2, 3] :

1. 7.1. Mécanisme de graphitisation sphéroïdale :

La naissance des germes du graphite s'effectue dans l'austénite primaire, sans contact direct avec le liquide.

La croissance de ces germes s'effectue par migration du carbone diffusant depuis le métal encore liquide jusqu'au sphéroïde, en traversant l'enveloppe d'austénite qui l'enrobe. Si l'austénite est homogène, la migration des atomes de carbone vers le germe du graphite commençant à croître est isotrope, c'est à dire qu'elle s'opère avec une vitesse uniforme et radialement dans toutes les directions, ce qui engendre évidemment une forme sphérique, mais la croissance du graphite nécessite l'existence d'un espace progressivement libéré ce qui est déterminé par une auto-diffusion des atomes de fer dans le sens opposé à celui des atomes de carbone. Cette libération se trouve confirmée par le fait que quand un sphéroïde touche au cœur de sa croissance une inclusion il l'enveloppe en perdant sa forme arrondie.

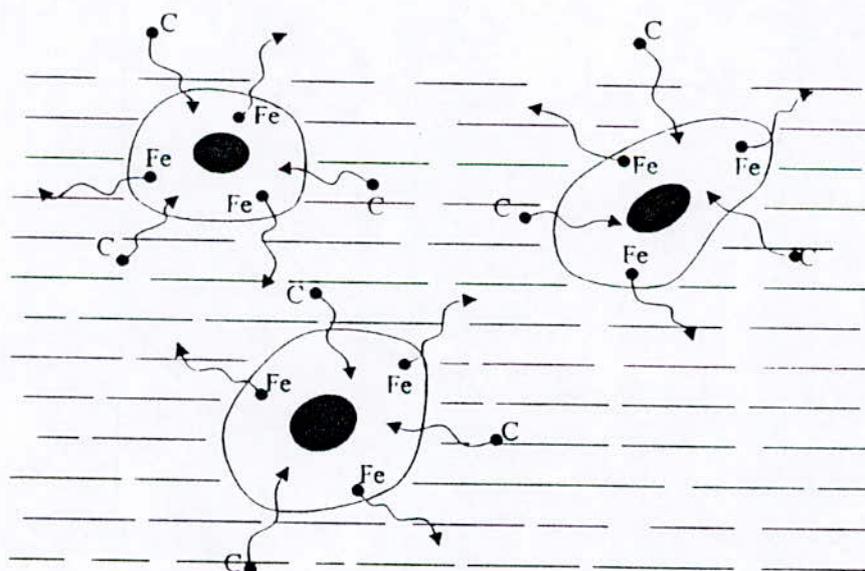


Figure 1-5. Mécanisme de graphitisation sphéroïdale.

17.2. Mécanisme de graphitisation lamellaire :

Il semble d'après l'état de recherche effectuée à ce jour sur le mécanisme de graphitisation lamellaire, que les germes du graphite prennent naissance dans le métal liquide sursaturé en carbone.

Le développement du graphite enlève du carbone au liquide voisin, créant ainsi autour de ces germes une zone de faible concentration de carbone, d'où la naissance de l'austénite qui enrobe les lamelles du graphite (figure 1-6-a).

De nouveaux germes du graphite apparaissent aux extrémités des cellules d'austénite, ils se développent surtout radialement en servant des atomes de carbone, à partir du liquide, sur le front de cristallisation (figure 1-6-b).

Le développement du graphite s'accompagne par la croissance radiale d'austénite qui l'enveloppe, une fois que l'enveloppement est terminé, toute croissance ultérieure n'est plus possible que par diffusion du carbone à travers l'enveloppe de l'austénite (figure 1-6-c).

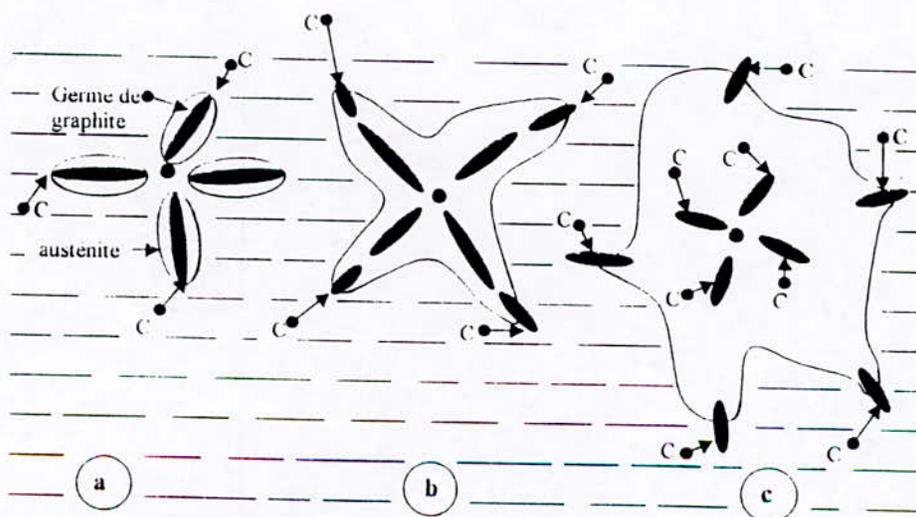


Figure 1-6. Mécanisme de graphitisation lamellaire.

I.8. COMPORTEMENT DES FONTES GRISES EN FONCTION DE L'UTILISATION [7][8]*

a) **Résistance à l'usure** : l'aptitude du frottement d'un matériau dépend de ses caractéristiques mécaniques (dureté), de sa compression et de sa structure.

Le graphite qui est un autolubrifiant, fait diminuer les risques de jonction intermétallique par formation d'un manteau protecteur. Mais la nature de la matrice qui enrobe le graphite a également un rôle très important à jouer, il ne faut pas que cette matrice se déforme sous l'effet de la pression des pièces qui s'appuient sur elles dans son mouvement de glissement.

b) **Coulabilité** : la très bonne coulabilité des fontes permet l'obtention des pièces minces. La coulabilité est augmentée par la présence du phosphore pour des teneurs de 1,5 à 1,7%.

c) **Usinabilité** : la fonte grise présente la meilleure aptitude à l'usinage.

Il existe aussi plusieurs propriétés envisagées comme :

- * La résistance à la corrosion.
- * La résistance à la chaleur.
- * La résistance à la traction

CHAPITRE II

ETUDE

EXPERIMENTALE

II.1. ELABORATION DE LA FONTE [3] :

Dans l'unité de fonderie (U. F. R) de la société nationale des véhicules industriels (S. N. V. I) de Rouiba , l'élaboration de la fonte passe par les étapes suivantes :

- * Préparation des matières premières (charges).
- * Fusion de la charge.
- * Analyse chimique.
- * Maintien dans un four à induction.
- * Réajustement de la composition chimique, plus une deuxième analyse chimique.
- * Traitement de sphéroïdisation.

II.1.1. *Préparation des matières premières (charges) :*

Les charges sont classées selon les types et l'analyse chimique. parmi les charges, on peut citer :

- * Les retours de fonderie (masselottes, des jets de coulée...).
- * Les lingots de la fonte neuve.
- Les paquets d'aciers doux.

II.1.2. *Fusion de la charge :*

Les constituants de la charge doivent être enfournés dans le four électrique à arc selon un ordre bien défini :

- * Chutes de tôles sur la sole afin de la protéger des chocs mécaniques lors de la charge.
- * Les lingots de la fonte neuve.
- * Retours de fonderie.

- * Au-dessus, seront disposées des ferrailles légères.

Au niveau de la fonderie de Rouiba, deux fours électriques à arc sont utilisés pour la fusion de la fonte, leurs caractéristiques sont :

- * capacité : 10 tonnes
- * puissance : 21 MVA
- * production horaire : 6 tonnes / h.

II.1.3. Analyse chimique :

L'analyse chimique de la fonte est effectuée à l'aide d'un spectromètre de masse, sur des médailles coulées et trempées à l'eau.

II.1.4. Maintien et réajustement :

Afin de faire l'analyse chimique, la fonte liquide est transférée du four à arc au four à induction pour réajuster la teneur de quelques éléments. Parmi les matières d'addition on cite :

- * le graphite (99% C) : utilisé pour réajuster la teneur du carbone.
- * le ferro-silicium (80% Si) : utilisé pour réajuster la teneur du silicium.
- * le ferro-manganèse (60% Mn) : utilisé pour réajuster la teneur du manganèse.

II.1.5. Traitement de sphéroïdisation :

Ce traitement est effectué en poche selon la méthode « sandwich » avec du ferr-silico-magnésium dont la composition chimique est la suivante :

Alliage	Mg %	Si %	Ce %	Al %	Fe %
Fe-Si-Mg	6	4,6	1,5	0,8	50

Tableau II.1. Composition chimique de Fe-Si-Mg.

Ce maintien en poche, de la fonte liquide après traitement et avant coulée doit être limité à 20 minutes au maximum afin d'éviter la dégénérescence.

II.2. COMPOSITION CHIMIQUE DES FONTES ELABOREES PAR L'U.F.R [9] :

La composition chimique des fontes grises devra être fixée en fonction de la structure métallographique et des caractéristiques recherchées ainsi que l'épaisseur des moules.

a) Carbone : C'est un élément graphitisant, sa teneur ne doit pas dépasser certaines limites (2,8 – 4)%. Il a pour effet d'améliorer la coulabilité, augmente la dureté, la charge à la rupture et la limite élastique tout en diminuant l'allongement.

b) Silicium : C'est un élément graphitisant, sa teneur dans la fonte ne dépasse pas 3,5%. Il agit dans le même sens que le ralentisseur du refroidissement en modifiant la teneur en carbone et la vitesse de refroidissement.

c) **Manganèse** : C'est un élément antigrafitisant comme tous les éléments qui forment des carbures plus stables que Fe_3C . Sa teneur dans la fonte grise varie de 0,45 à 0,9%. Il forme avec le soufre des inclusions de MnS . Le manganèse a peu d'influence sur la structure et les propriétés des fontes ; il affine quelque peu la perlite et augmente la dureté.

d) **Soufre** : Le Soufre gêne la graphitisation et augmente la dureté de la fonte qui devient de plus en plus fragile lorsque la teneur en soufre augmente. C'est pourquoi pour l'obtention des fontes grises avec des bonnes propriétés mécaniques, on doit effectuer un traitement de désulfuration qui ramène sa teneur dans les fontes GS inférieure à 0,05%.

e) **Phosphore** : Le Phosphore accroît la coulabilité de la fonte à la fois par déplacement de l'eutectique (même effet que le Silicium) et par abaissement du point de fusion donc facilite la coulée.

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, la fragilité des fontes grises et augmente légèrement ses résistances mécaniques.

f) **Cuivre** : Elément graphitisant à la solidification aux basses teneurs en silicium. Il empêche la formation des carbures libres. Sa teneur doit être inférieure à 0,05% pour les fontes GS ferritiques.

Le Cuivre améliore les propriétés mécaniques (la dureté et la résistance au choc).

II.3. CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES FONTES LABORÉES PAR L'U.F.R :

La qualité des fontes est définie par leurs caractéristiques mécaniques, géométriques et physiques. Le tableau (2-1) montre les caractéristiques mécaniques des fontes élaborées par l'U.F.R.

Nuance	Résistance à la traction daN/mm ²	Limite élastique daN/mm ²	Allongement %	Résilience daJ/cm ²	Dureté HB	Microstructure
GSC 38-15	38	27	15	15	137-170	Ferrito-perlitique, ferrite à 90%, pas de carbure
GSA 56-5	56	39	5	0,8	200-260	Perlite, ferrite+carbone libre
Ft 25	26-36	-	-	-	187-225	Perlite avec ferrite<5% carbure<5%

Tableau II.1 Caractéristiques des fontes élaborées par l'U.F.R.[6]

Du tableau on remarque que l'allongement des fontes grises à graphite lamellaire est presque nulle.

La comparaison entre GSA et GSC montre qu'une augmentation du pourcentage de perlite implique une augmentation de la résistance à la traction, la limite élastique et la dureté, avec une diminution de la résistance et l'allongement.

II.4. EPROUVETTE D'ESSAI :

Nous savons qu'un matériau qui a une faible épaisseur se refroidit rapidement qu'un matériau à une forte épaisseur. Cela bien sûr est lié au dégagement rapide de la chaleur pour les épaisseurs faibles.

Concernant notre travail, qui est la détermination de la variation des propriétés mécanique et de la structure en fonction de l'épaisseur des éprouvettes en fonte grise, nous avons réalisés une éprouvette en escalier à plusieurs épaisseurs (figure II.1)

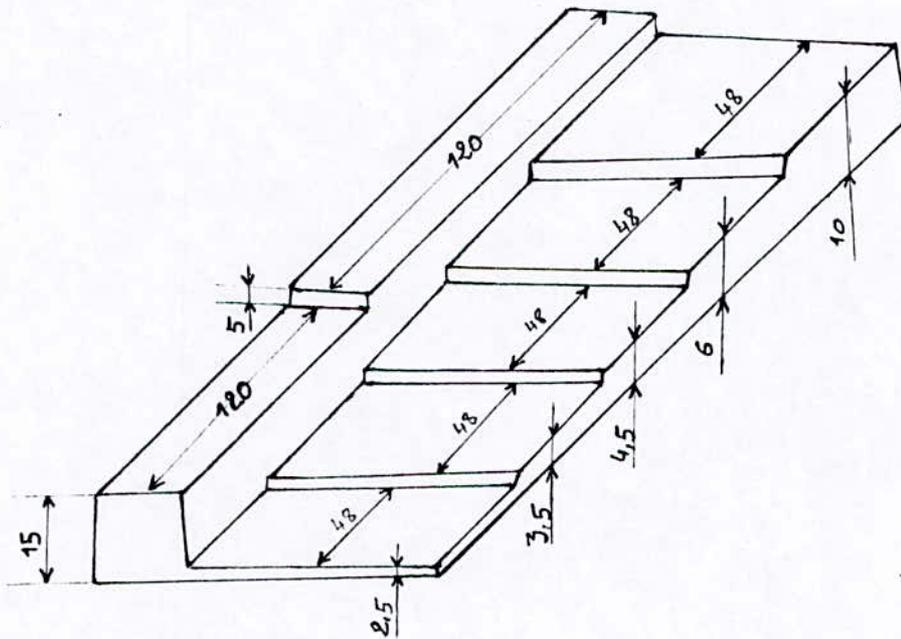


Figure II.1. Eprouvette « escalier » sélectionnée pour l'étude.

II.5. COULÉE DE L'ÉPROUVETTE :

II.5.1. *Sable de moulage :*

Le sable qu'on a utilisé pour le moulage a la composition chimique suivante :

- * Sable Silicate (80 à 85%) qui est pratiquement infusible au contact du métal en fusion.

- * Argile (10 à 12%) : son rôle est de lier les grains de silice entre eux et empêche le moule de se désagréger après l'enlèvement du modèle.

- * Noir minéral (3 à 4%) : brûle au contact du métal en fusion et donne ainsi au moule la porosité et la perméabilité nécessaires à l'évacuation des gaz.

Les propriétés du sable de moulage sont :

- * humidité : 3,7%.
- * perméabilité : 140 à 150%.
- * cisaillement : 255,6 à 312,4 g/cm².
- * compression : 908,8 à 979,8 g/cm².

II.5.2. Moulage :

Le moulage utilisé pour notre éprouvette en escalier à l'unité de fonderie de Rouiba est manuel qui s'effectue avec deux châssis l'un supérieur et l'autre inférieur dont les opérations sont les suivantes :

- * positionnement du châssis inférieur qui contient le modèle.
- * Le remplissage avec le sable.
- * serrage du sable à l'aide d'un vibreur.
- * positionnement du châssis supérieur, remplissage avec le sable qui est entassé.
- * réparation du canal de coulée.
- * fixation des deux châssis.
- * coulée de l'éprouvette en escalier.

II.6. USINAGE DE LA PIECE :

Après le démoulage, on a enlevé les canaux de coulée à l'aide d'une tronçonneuse, puis on a effectué un grenailage pour enlever les grains de sable restant.

Le découpage des échantillons est effectué à l'aide d'une scie électrique sous lubrification d'eau afin d'éviter tout risque d'échauffement et donc modification de la structure.

II.7. ESSAI DE RESILIENCE

L'essai consiste à rompre, d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie W absorbée dont on déduit la résilience [10]

$$K = \text{Résilience} = \frac{\text{Énergie absorbée par rupture (en joule)}}{\text{Section de l'éprouvette (cm}^2\text{)}}$$

Le mouton pendule est composé d'une masse en forme de disque oscillant autour d'un axe horizontal. Abandonnée sans vitesse initiale d'une hauteur de chute h_0 , cette masse frappe l'échantillon au point le plus bas de sa course et remonte d'une certaine hauteur h_1 (figure II.2.).

A l'aide d'un index, on mesure la hauteur h_1 connaissant la distance du centre de gravité à l'axe et l'angle de remontée. On déduit l'énergie de rupture et la résilience K qui est le quotient du travail absorbé (W) lors de la rupture sur la section rompue de l'éprouvette de section (S).

$$K = \frac{W}{S} \quad (1)$$

$$W = P(h_0 - h_1) \quad (2)$$

$$\text{Soit } K = \frac{P(h_0 - h_1)}{S} \quad (3)$$

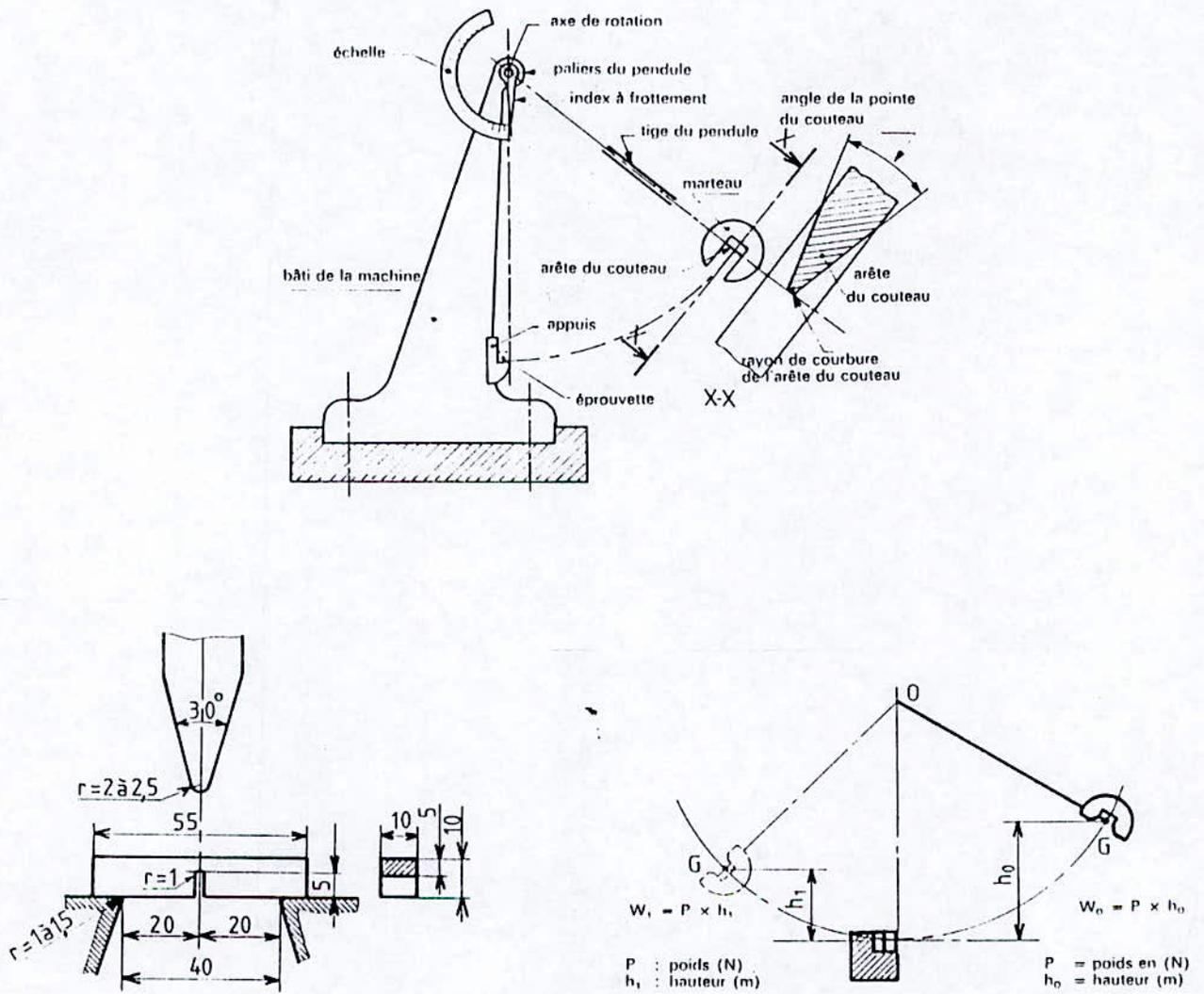


Figure II.2. Machine et principe de l'essai de résilience.

II.8. ESSAI DE DURETÉ :

La dureté est la propriété d'un corps de s'opposer à sa pénétration par un autre corps. C'est un essai qui se fait par contact de la couche superficielle. Toute dureté est indiquée par un nombre spécifié du genre d'essai exécuté. Il existe trois méthodes principales d'essais de dureté[10].

- * Méthode Brinell.
- * Méthode Vickers
- * Méthode Rockwell.

L'essai qu'on utilise dans notre étude est l'essai Brinell. Le principe consiste à imprimer dans la pièce sous une charge constante P une bille en acier trempé ou en carbure de tungstène (figure II.3) et à mesurer après enlèvement de la charge, l'empreinte laissée à la surface du métal. La dureté Brinell notée HB est le rapport entre l'effort appliqué P à la bille de diamètre D et la surface S de l'empreinte obtenue :

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4)$$

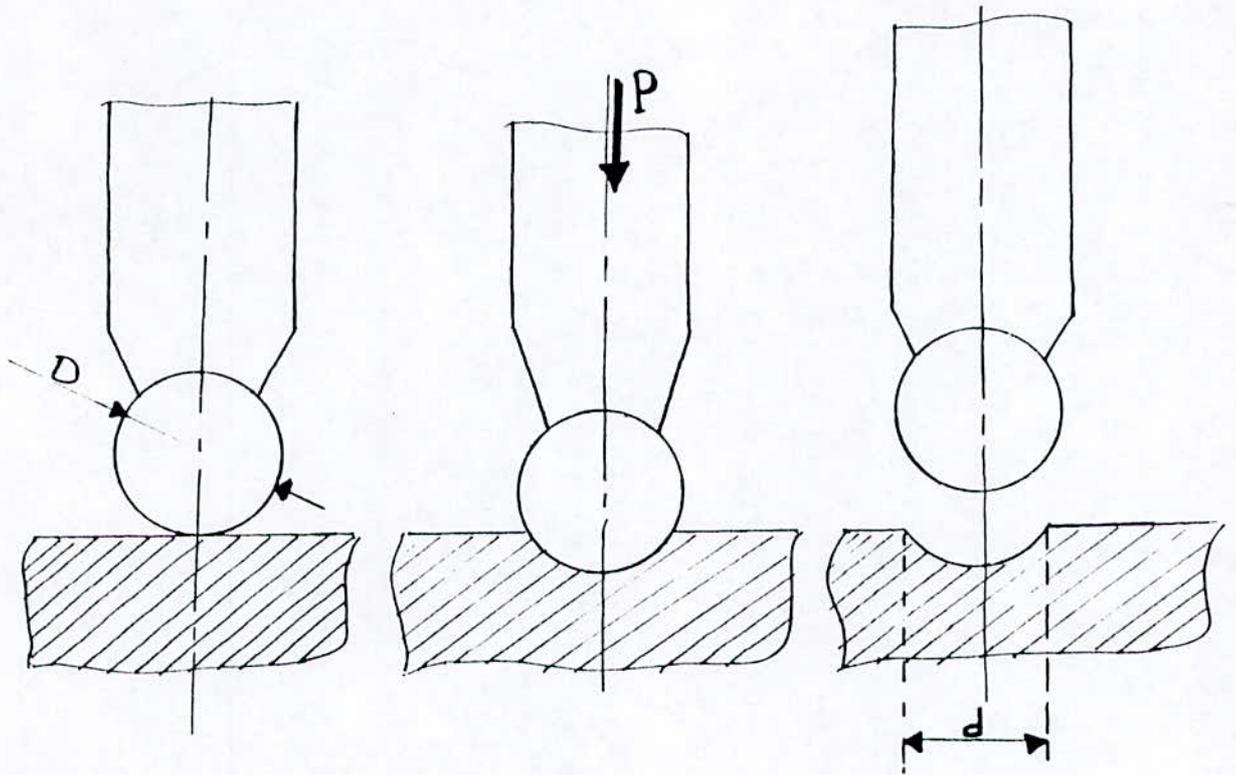


Figure II.3. Principe de l'essai de dureté.

II.9. EXAMEN METALLOGRAPHIQUE

Un examen métallographique nous permet d'écrire qualitativement et quantitativement les différents constituants métallographiques, leur nature et leur répartition. [11].

Une opération de micrographie comprend : le polissage, l'attaque et l'examen au microscope suivi de prise des photos.

II.9.1. Polissage :

Après un enrobage des échantillons à l'aide de la résine, on passe au polissage, qui consiste à réaliser des sections planes et convenablement polies, qui ne présentent aucune rayure.

Le polissage se fait en deux étapes : le prépolissage et le polissage fin.

Le prépolissage s'effectue sur les papiers abrasifs émeris de plus en plus fin (120, 320, 400, 1200) sous arrosage d'eau. Le sens du polissage est changé de 90° après le passage d'un papier au suivant.

Le polissage fin s'effectue sur un disque à feutre mouillé légèrement à l'aide d'un lubrifiant.

II.9.2. Attaque :

L'attaque a pour but de révéler les joints des cristaux et différencier les constituants de l'alliage. La méthode consiste à tremper la face à attaquer dans le réactif (Nital 4%) pendant 10 à 15 seconde.

II.9.3. Examen au microscope :

L'observation microscopique des échantillons attaqués permet d'identifier la nature de différentes phases existantes dans la matrice et de déterminer leur proportion. Dans notre étude nous avons photographié 3 plages à chaque épaisseur pour les 3 fontes avec un grossissement de 100. Pour les faibles épaisseurs (2,5 et 3,5) la prise des photographies se fait aussi à des grossissements de 200 et 500.

II.10. ANALYSE QUANTITATIVE [6] :

Pour caractériser de manière précise l'état d'un matériau métallique et connaître son évolution ou son comportement dans des conditions particulières, nous devons maîtriser son état structural d'une part et déterminer les relations existantes entre les paramètres de la structure et les grandeurs mécaniques, physiques ou chimiques d'autre part.

La structure d'un alliage est généralement constituée de plusieurs phases qui se distinguent par :

- *leur nature physico-chimique et leur caractéristiques mécaniques.

- * les proportions des différentes phases.

- * la taille et l'orientation des différents constituants.

II.10.1. *Analyse de la forme* :

L'analyse de la forme contient deux aspects de phases :

Phase dispersée et phase non dispersée.

phases dispersées :

Dans le cas de particules de forme sphérique, la forme est analysée par le taux de sphéroïdisation, si le taux de sphéroïdisation

($T_s\%$) est supérieur à 80% on conclue que le constituant est considéré sphéroïdal.

On définit $T_s\%$ par :

$$T_s\% = \frac{N_s}{N_t} * 100 \quad (5)$$

Les nombres N_s et N_t sont respectivement le nombre de particules de forme sphéroïdale et le nombre totale de particules.

phase non dispersée :

Pour une structure lamellaire ou granulaire, on doit décrire la finesse des lamelles.

II.10.2. Analyse de la taille :

Soit n le nombre de particules dans une aire A . On définit le nombre de particules par unité d'aire par :

$$N_A = \frac{n}{A} \quad (6)$$

Soit l_i le diamètre d'une section d'une particule i ; on considère 6 classes de diamètre (l_1 le plus faible, l_6 le plus grand).

lasse	l_i	n_i	$N_{\Delta i}$
1	$0 < l_i < l_1$	n_1	$N_{\Delta 1}$
...
6	$l_5 < l_i < l_6$	N_6	$N_{\Delta 6}$

Tableau II.1. Répartition de la taille.

Le diamètre moyen des sections des particules est :

$$\bar{l} = \frac{\sum N_{\Delta i} l_i}{\sum N_{\Delta i}} \quad (7)$$

Le diamètre moyen des particules est :

$$L = \frac{\pi}{2} \bar{l} \quad (8)$$

Le nombre de particules par unité de volume est :

$$N_V = \frac{\sum N_{\Delta i}}{L} \quad (9)$$

A partir des valeurs de n_i et l_i , on trace :

- + les histogrammes ($n_i = f(l_i)$) : qui donnent la distribution des tailles des grains pour chaque épaisseur.
- + Les courbes ($L=f(e)$) : qui donnent la variation du diamètre moyen des particules en fonction d'épaisseur..
- + les courbes ($n_t = f(e)$) qui donnent la variation du nombre de nodule du graphite en fonction d'épaisseur par mm^2 .

II.10.3. Fraction volumique :

On applique la méthode de comptage systématique qui consiste à superposer, sur la photographie à analyser, un papier calque sur lequel on trace une grille de réseau carré. Les dimensions de la maille du réseau dépendent de l'agrandissement de la photographie. La fraction volumique de la phase dispersée est le rapport du nombre de nœuds du réseau tombant sur une particule de la phase sur le nombre totale des nœuds du réseau.

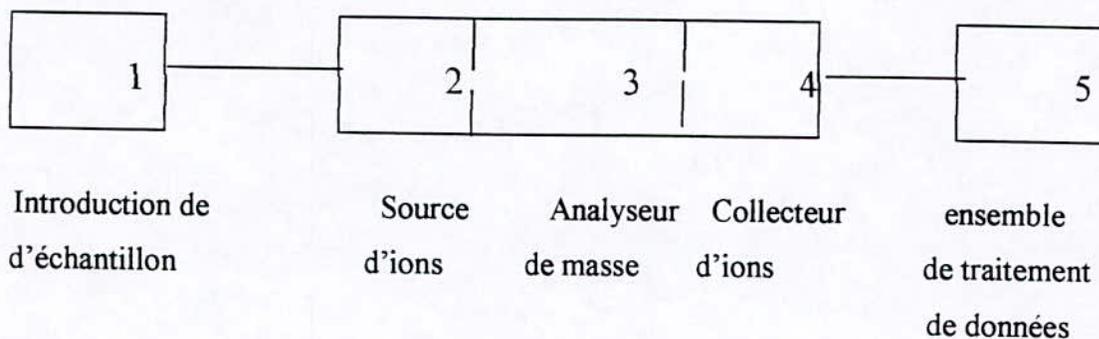
II.11. ANALYSE CHIMIQUE

L'analyse chimique de nos échantillons a été fait à UFR de Rouiba, à l'aide d'un spectromètre de masse [12].

Le principe de fonctionnement d'un spectromètre de masse repose sur l'action d'un champ électromagnétique sur une particule chargée afin, en particulier, d'en déterminer le rapport masse/charge.

Le spectromètre de masse permet de mesurer la masse d'un ion et de déterminer son abondance.

La figure ci-dessous présente un schéma de principe d'un spectromètre de masse dont ces parties sont :



- * Un système d'introduction qui permet de faire entrer l'échantillon à analyser dans le spectromètre de masse.
- * Une source d'ion qui a pour rôle d'ioniser l'échantillon, d'extraire et de transmettre les ions dans la partie analyseur de l'instrument.
- * Le but de l'analyseur est de trier les ions en fonction de leur rapport masse/charge; ce tri est réalisé par l'application et le balayage d'un champ magnétique ou électrique.
- * Un détecteur qui est constitué d'un collecteur et d'un ensemble électronique de mesure et d'amplification des signaux associés aux ions de différentes masses séparés par l'analyseur.
- * Un ensemble informatique de traitement de données est associé à l'ensemble de détection.

CHAPITRE III

RESULTATS

ET INTERPRETATIONS

III-1-ANALYSE CHIMIQUE

Le tableau ci-dessous présente la composition chimique des trois fontes étudiées dans notre projet.

Eléments	C %	Si %	Mn %	S %	P %	Cu %	Mg %
GSC 38-15	3.40	2.68	0.35	0.025	0.04	0.1	0.071
GSA 56-5	3.46	2.44	.071	0.065	0.055	0.23	0.065
Ft 25	3.06	1.80	0.73	0.012	0.045	0.15	0

Tableau III-1 :Composition chimique des trois fontes proposées pour l'étude.

Si on compare la composition chimique des trois fontes, on remarquera que :

- La teneur de Mn dans la fonte GSA est supérieure que celle obtenue dans la fonte GSC.
- Les teneurs du C et du Si dans la fonte Ft25 sont inférieures à celles obtenues dans les fontes GSA et GSC.

III.2- INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR SUR LA STRUCTURE :

III.2.1 : la matrice :

Pour les trois fontes, on remarque la présence de deux phases, l'une perlitique qui domine la structure des fontes à faible épaisseur, et l'autre ferritique. La variation des pourcentages des deux phases est liée à la vitesse de

refroidissement. Pour les fontes GSA et GSC on remarque la présence des carbures qui disparaissent pour les fortes épaisseurs.

Les résultats obtenus concernant l'évolution des phases de la matrice, le graphite et les carbures sont représentés sur le tableau ci-dessous:

E(mm)	2.5	3.5	4.5	6	10	15	20
Ferrite %	-	-	-	-	18.29%	24.41%	31.61%
Perlite %	-	-	-	-	67.46%	60.52%	50.39%
Graphite %	8.95%	9.40%	9.70%	10.45	11.21%	13.50%	17.97%
Carbure %	-	-	-	-	3.04%	≈2 %	<1%

Tableau III. 2: Evolution des phases de la matrice en fonction de l'épaisseur de la fonte GSA.

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessus sont calculés pour les fortes épaisseurs, néanmoins il est difficile de les calculés pour les faibles épaisseurs à cause de la finesse de la structure

On remarque à partir du tableau une diminution du taux de perlite et du carbure accompagné d'une augmentation du taux de ferrite avec l'épaisseur. Cela est dû au fait qu'une faible vitesse de refroidissement favorise la diffusion du carbone, qui provoque la formation et la croissance des germes du graphite. L'origine du graphite est provoquée par la décomposition de l'austérite qui permet une augmentation du taux de ferrite. Au début la ferrite obtenue par cette décomposition à une forme d'auroles entourant des sphéroïdes du graphite.

Aux faibles épaisseurs, sous l'effet de la vitesse de refroidissement, la croissance des germes du graphite déjà formé dans la phase liquide sera stoppée après une certaine durée de début de solidification, le carbure reste dans l'austérite, se recristallise sous forme de cémentite en lamelle alternée avec la ferrite pour donner la perlite.

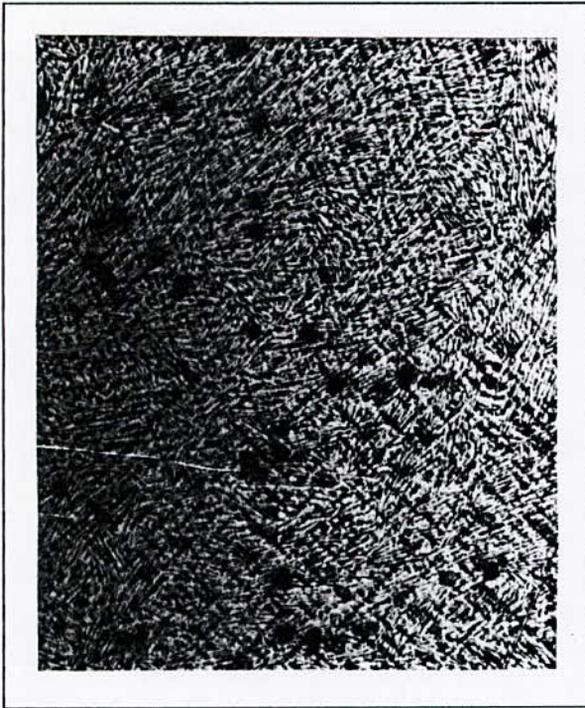


Fig III.1 : fonte GSC brut de coulée, épaisseur 2,5 mm G×100

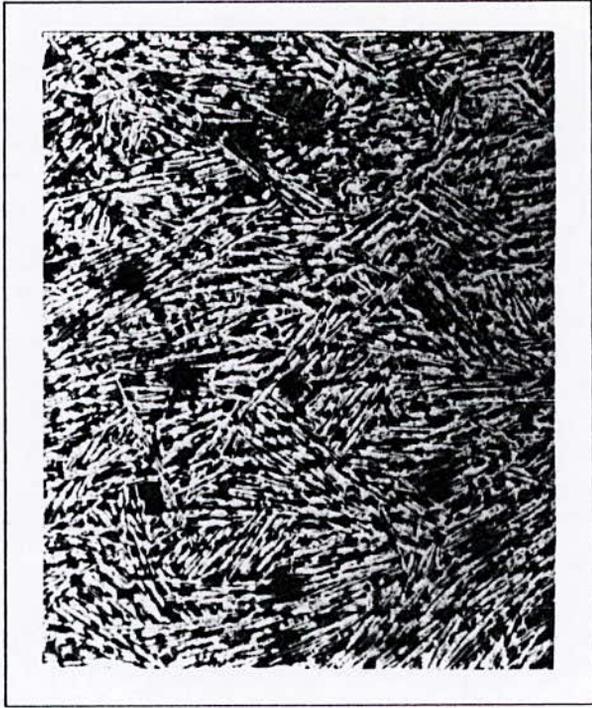


Fig III.2 : fonte GSC brut de coulée, épaisseur 2,5 mm G×200

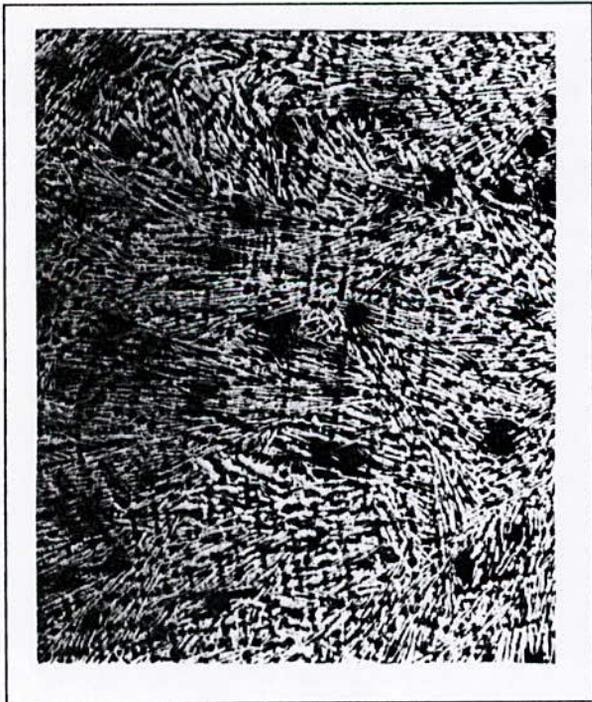


Fig III.3 : fonte GSC brut de coulée, épaisseur 3,5 mm G×100



Fig III.4: fonte GSC brut de coulée, épaisseur 6 mm G×200



Fig III.5: fonte GSA brut de coulée, épaisseur 2,5 mm G×100



Fig III.6: fonte GSA brut de coulée, épaisseur 4,5 mm G×100



Fig III.7: fonte GSA brut de coulée, épaisseur 10 mm G×100



Fig III.8: fonte GSA brut de coulée, épaisseur 20 mm G×100



Fig III.9: fonte GSA brut de coulée, épaisseur 20 mm G×200

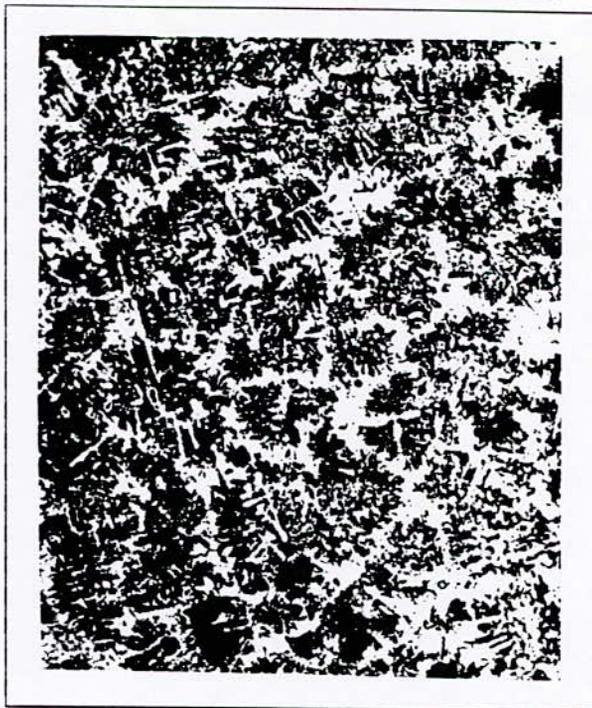


Fig III.10: fonte Ft 25 brut de coulée, épaisseur 2,5 mm sans attaque G×100

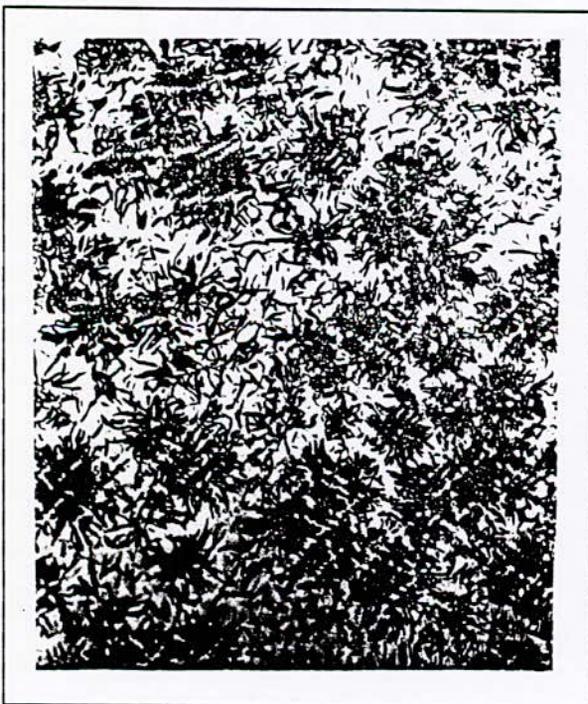


Fig III.11: fonte Ft 25 brut de coulée, épaisseur 3,5 mm sans attaque G×100

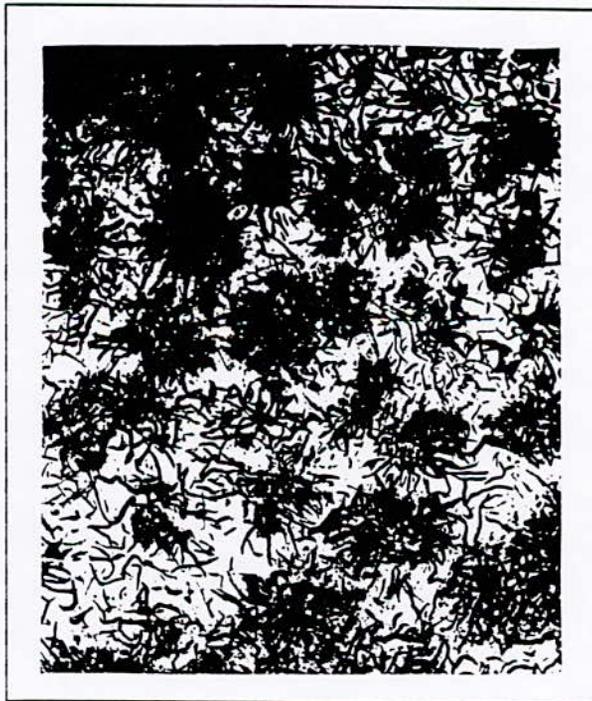


Fig III.12 : fonte Ft 25 brut de coulée, épaisseur 4,5 mm sans attaque G×100

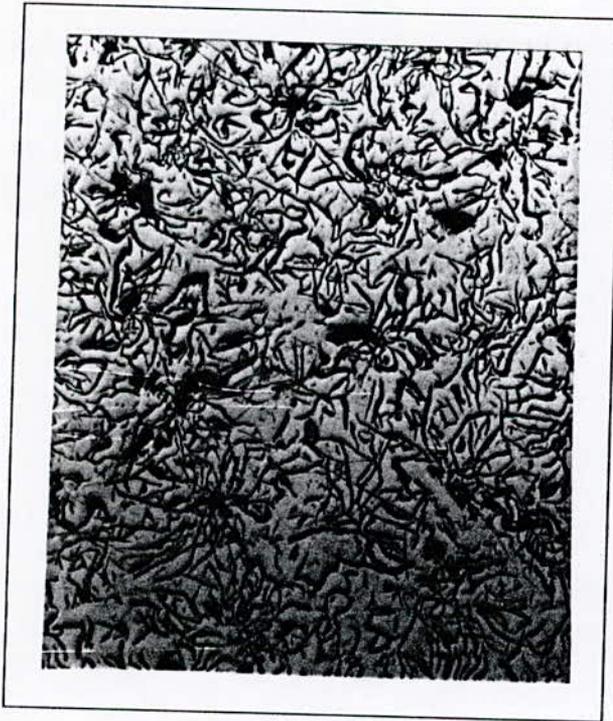


Fig III.13 fonte Ft 25 brut de coulée, épaisseur 15 mm sans attaque G×100



Fig III.14 fonte Ft 25 brut de coulée, épaisseur 20 mm sans attaque G×100



Fig III.15 fonte Ft 25 brut de coulée, épaisseur 20 mm avec attaque G×500

III-2-2- La morphologie du graphite :

Pour caractériser le graphite observé dans les différentes structures obtenues, il est nécessaire de fournir des indications sur la forme, la répartition et la dimension des particules du graphite. A cet effet, on fait une comparaison des photos obtenues pour les différentes structures avec les images types données par la norme NF A 32-100 (voir annexe).

Les différentes caractéristiques du graphite sont définies par :

- Les chiffres romains pour la forme.
- Les lettres majuscules pour la répartition.
- Les chiffres arabes pour la dimension.

Les résultats de cette étude sont résumés sur le tableau III-3 :

ÉPAISSEUR (mm)		2.5	3.5	4.5	6	10	15	20
GSC 38-15	forme	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI
	répartition	E	E	E	E	E	E	E
	Indice de dimension	7	7-6	7-6	7-6	5	5-4	5-4
GSA 56-5	forme	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI
	répartition	E	E	E	E	E	E	E
	Indice de dimension	7	7	7	6	6	6	6-5
Ft25	forme	I	I-III	I-III	I-III	I-III	I-III	I-III
	répartition	-	B	B-D	A- B-C	A-B	A-B	A-C
	Indice de dimension	-	4	5-4	5-4	5-4	5-4	4-3

Tableau III-3 : Morphologie du graphite.

D'après l'observation des structures des trois fontes pour les différentes épaisseurs et les résultats obtenus sur le tableau III-3, on remarque que :

Pour la fonte GSC le graphite est sphéroïdal (forme VI) de répartition E et indice de dimension varie de 7 pour les faibles épaisseurs à 4 pour les grandes épaisseurs.

Pour la fonte GSA, le graphite a la même forme et répartition que dans la fonte GSC, mais l'indice de dimension varie de 7 à 5.

Pour la fonte Ft25 le graphite a une forme en rosette pour les faibles épaisseurs et une forme lamellaire uniformément répartie pour les grandes épaisseurs. Les dimensions du graphite varient proportionnellement avec l'épaisseur, elles sont plus larges et longues pour les grandes épaisseurs que celles pour les faibles épaisseurs.

Les résultats obtenus concernant la phase graphique (densité des nodules) pour les fontes GSC et GSA sont représentés sur la figure III-18. L'examen de cette figure confirme la relation qui existe entre la vitesse de refroidissement, et la densité des nodules du graphite qui en résultent. On observe bien une croissance régulière de la densité des nodules au fur et à mesure de l'augmentation de l'épaisseur.

L'examen de la figure III-19, montre que la taille moyenne réelle du graphite croît avec l'augmentation de l'épaisseur, de plus on remarque que cette taille est grande dans la fonte GSA par rapport à celle de la fonte GSC.

A partir des histogrammes représentés sur les figures III-16 et III-17, on remarque que la plus parts des sphéroïdes du graphite existent pour une telle structure ont une taille proche à la taille moyenne.

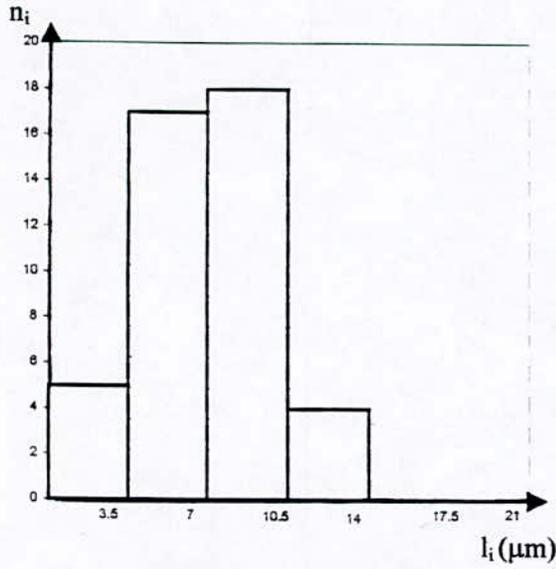
INTERPRETATION :

Pour les fontes GSC et GSA les dimensions du graphite augmentent avec l'épaisseur, cela est dû à la diminution de la cinétique de refroidissement. Les germes du graphite sont plus grands et plus denses que la durée de transformation est élevée.

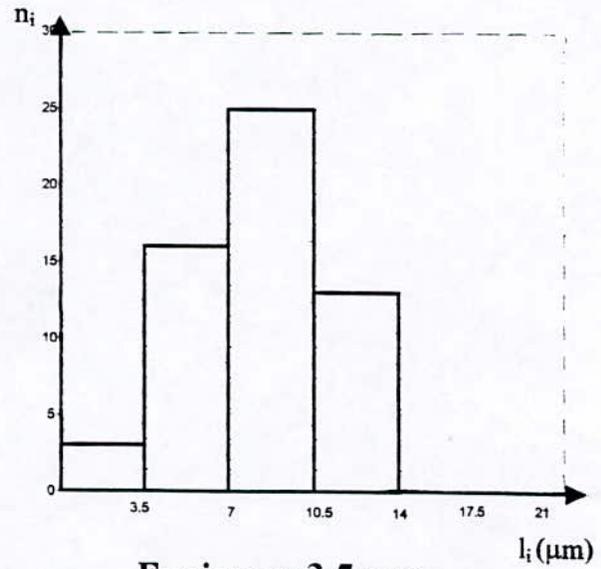
Comme les sphéroïdes, les lamelles du graphite changent leurs formes et répartitions. Elles sont plus larges et longues en fonction de l'augmentation de la

vitesse de refroidissement. cette croissance des germes est définie par deux processus :

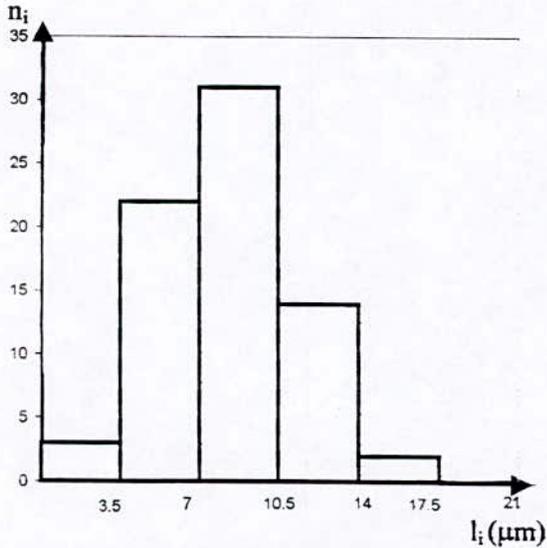
- Précipitation du carbone dans la phase liquide pour former du graphite, ce type de diffusion contrôle la longueur des lamelles.
- Précipitation du carbone dans la phase austénitique pour la formation par grossissement des anciens graphites, ce type contrôle la longueur des lamelles.



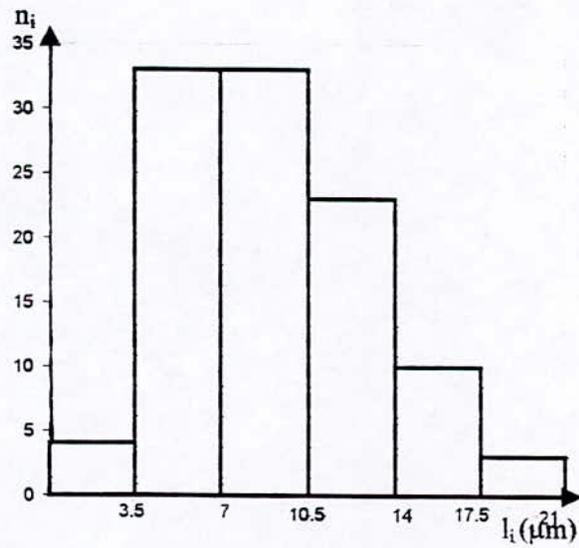
Epaisseur 2.5 mm



Epaisseur 3.5 mm

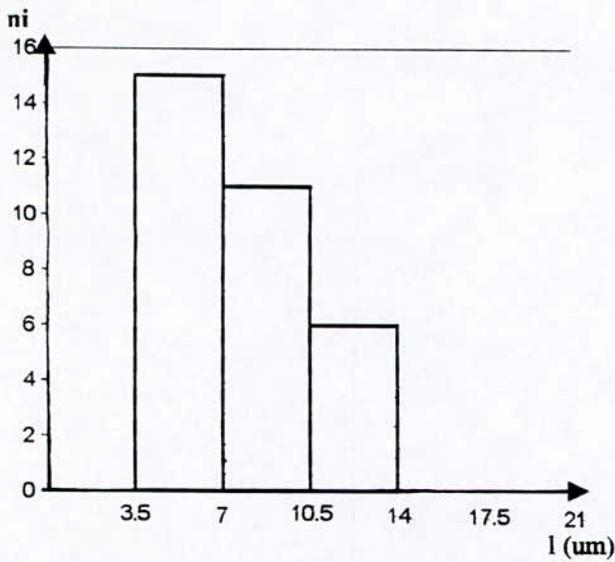


Epaisseur 6 mm

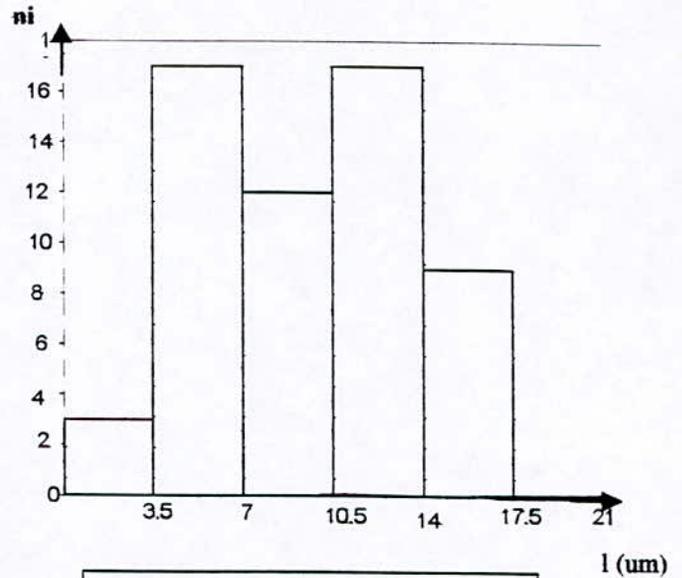


Epaisseur 20 mm

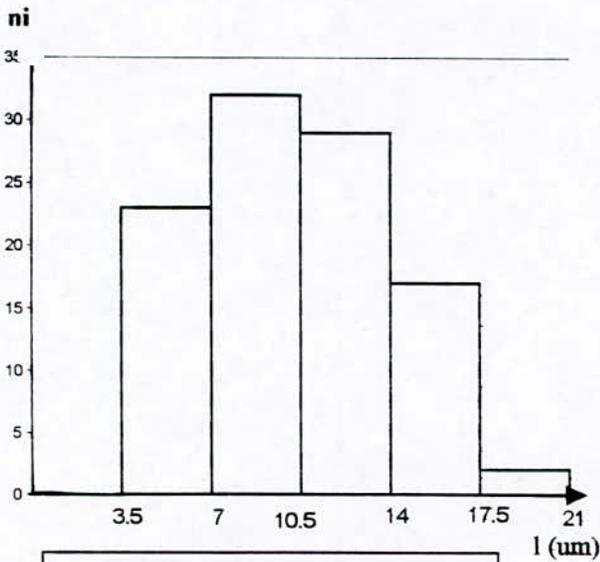
Figure III.16 : distribution de la taille réelle des sphéroïdes du graphite pour les différentes épaisseurs de la fonte GSC 38-15



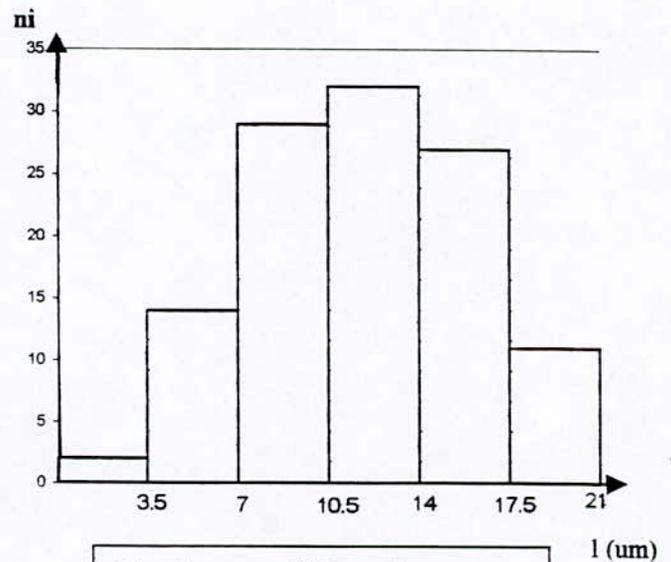
Epaisseur (2.5mm)



Epaisseur (3.5mm)



Epaisseur (15mm)



Epaisseur (20mm)

Fig. III.17 : Distribution de la taille réelle des sphéroïdes du graphite pour les différentes épaisseurs de la fonte (GSA 56-5)

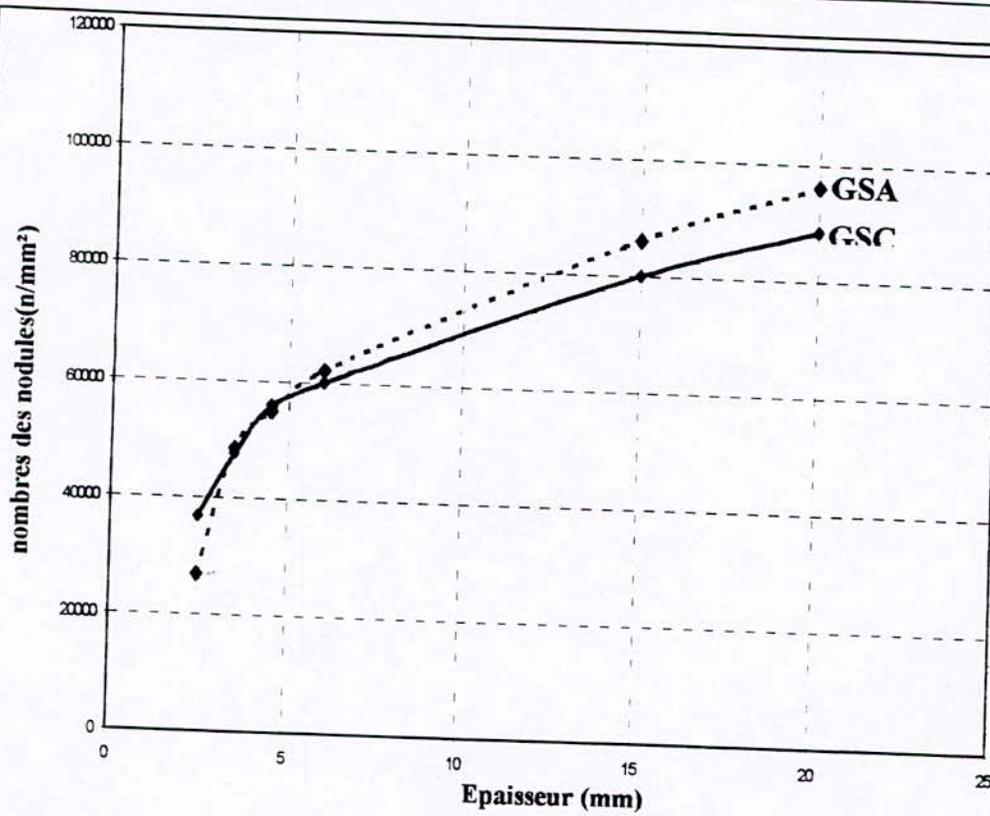


Fig. III. 18 :Variation du nombre des nodules du graphites en fonction d'épaisseur (GSC et GSA)

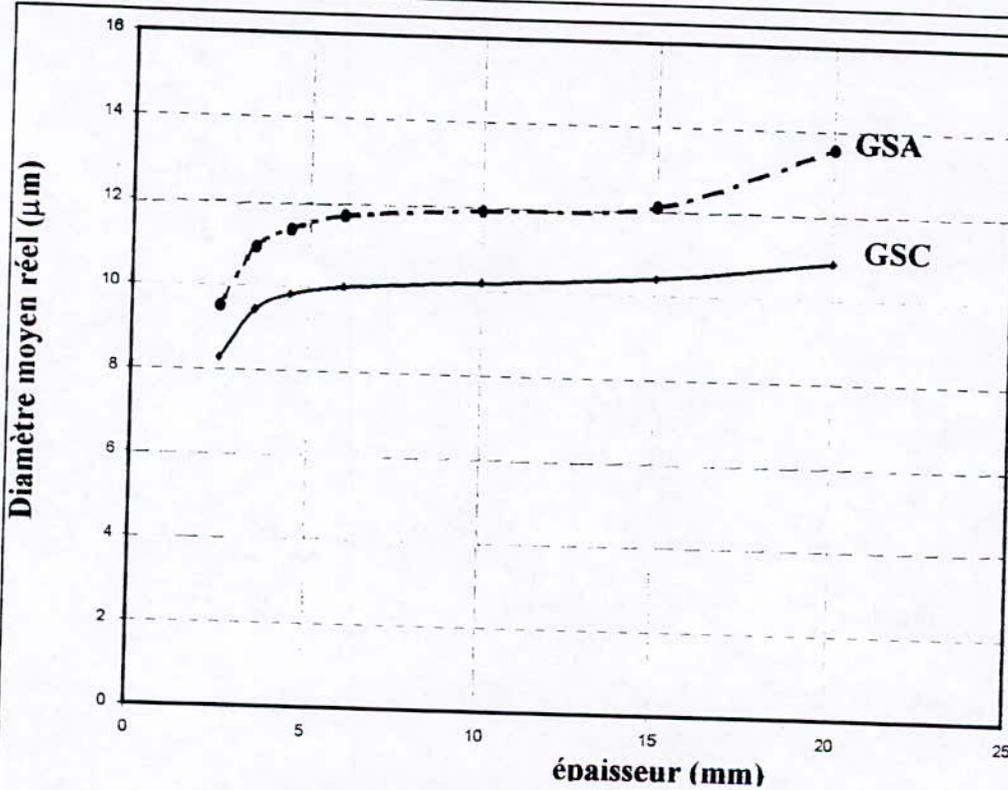


Fig. III.19:variation du diamètre moyen réel des sphéroïdes du graphite en fonction de l'épaisseur

III.2. INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR SUR LA DURETE :

Les résultats obtenus concernant la variation de la dureté en fonction de l'épaisseur sont représentés sur la figure III.20. L'examen de cette figure montre que la dureté varie inversement avec l'épaisseur. Cela est dû à l'augmentation du taux de ferrite accompagné d'une diminution du taux de perlite d'une part et variation de forme et dimension du graphite d'autre part. Pour les faibles épaisseurs où la structure uniquement perlitique, la dureté diminue avec la distance interlamellaire.

La comparaison entre les résultats obtenus pour les fontes GSC et GSA montre que cette dernière (GSA) est plus dure. Cela est dû à l'augmentation du taux de perlite dans la fonte GSA sous l'effet du manganèse et du carbone.

Pour une épaisseur donnée la dureté des trois fontes croit dans l'ordre suivant : HB_{GSA} , HB_{FT25} , HB_{GSC} .

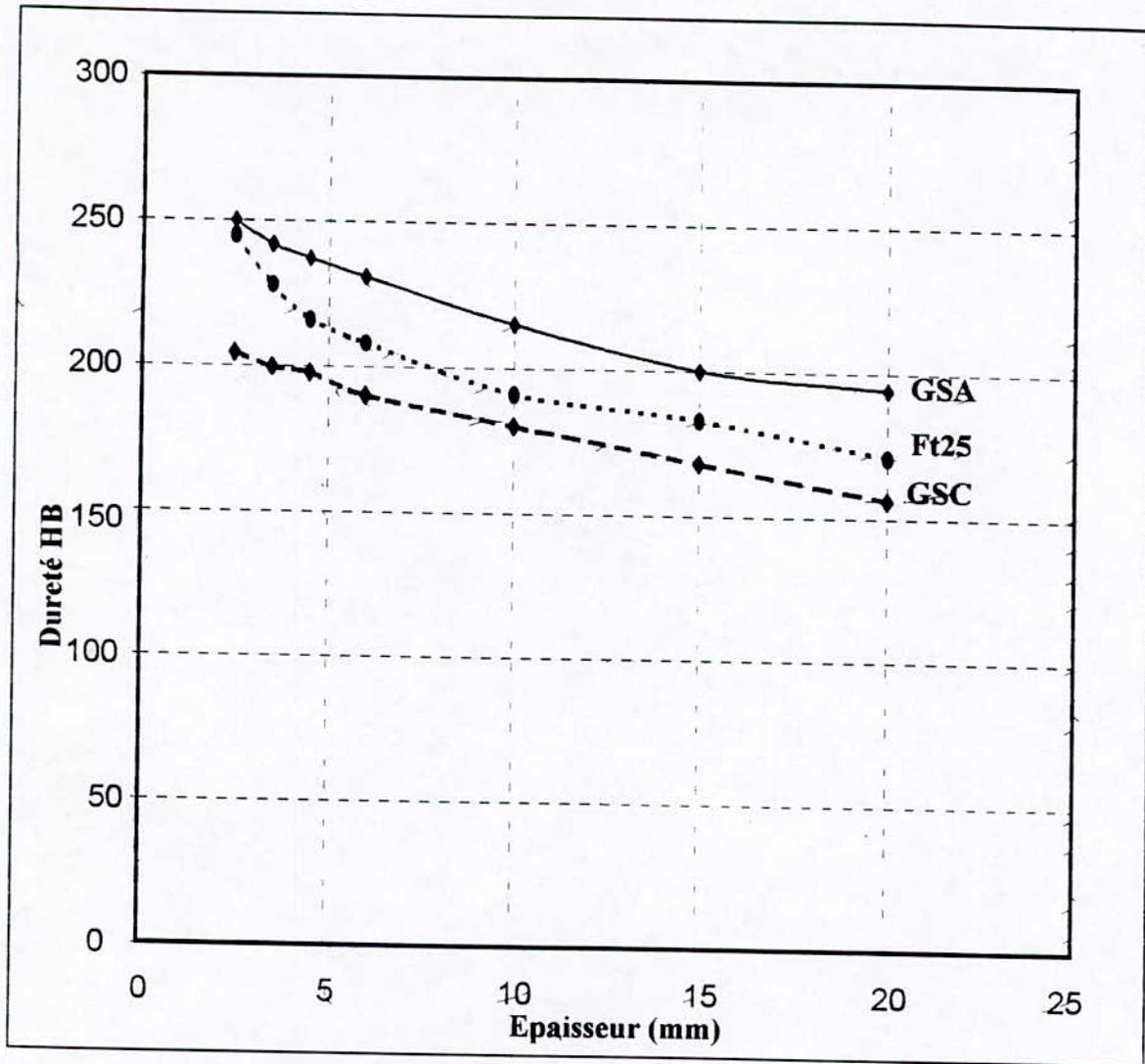


Fig III.20 :Variation de la dureté en fonction de l'épaisseur (GSC, GSA, Ft25).

III.3- INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR SUR LA RÉSILIENCE :

Les courbes $K=f(e)$ de figure III.21 sont tracées pour les épaisseurs supérieures à 4,5 mm. Pour les faibles épaisseurs le découpage des éprouvettes d'essai est difficile à cause de leur grande dureté d'une part et les problèmes de fixation de la pièce pour l'usinage d'autre part. Les essais de résilience donc se font seulement pour les fortes épaisseurs.

Pour les fontes GSC et GSA la résilience varie proportionnellement avec l'épaisseur. Une augmentation de la résilience est due à la diminution de la perlite qui est une phase dure ($HV=600 - 700$) d'une part et l'augmentation du taux de ferrite (phase moins dure $HV=90$) d'autre part. L'effet du graphite ne doit pas être négliger, un pourcentage élevé de ce constituant provoque une diminution de la dureté.

Pour les fontes FT25, on remarque une diminution de la résilience en fonction de l'épaisseur. Cela est dû essentiellement à l'augmentation de la taille des lamelles du graphite (plus larges et longues), qui deviennent des sources de concentration des contraintes, d'où l'effet d'entaille sera de plus en plus important et la rupture se propagera facilement de lamelle en lamelle. La résilience varie donc inversement avec les dimensions des lamelles.

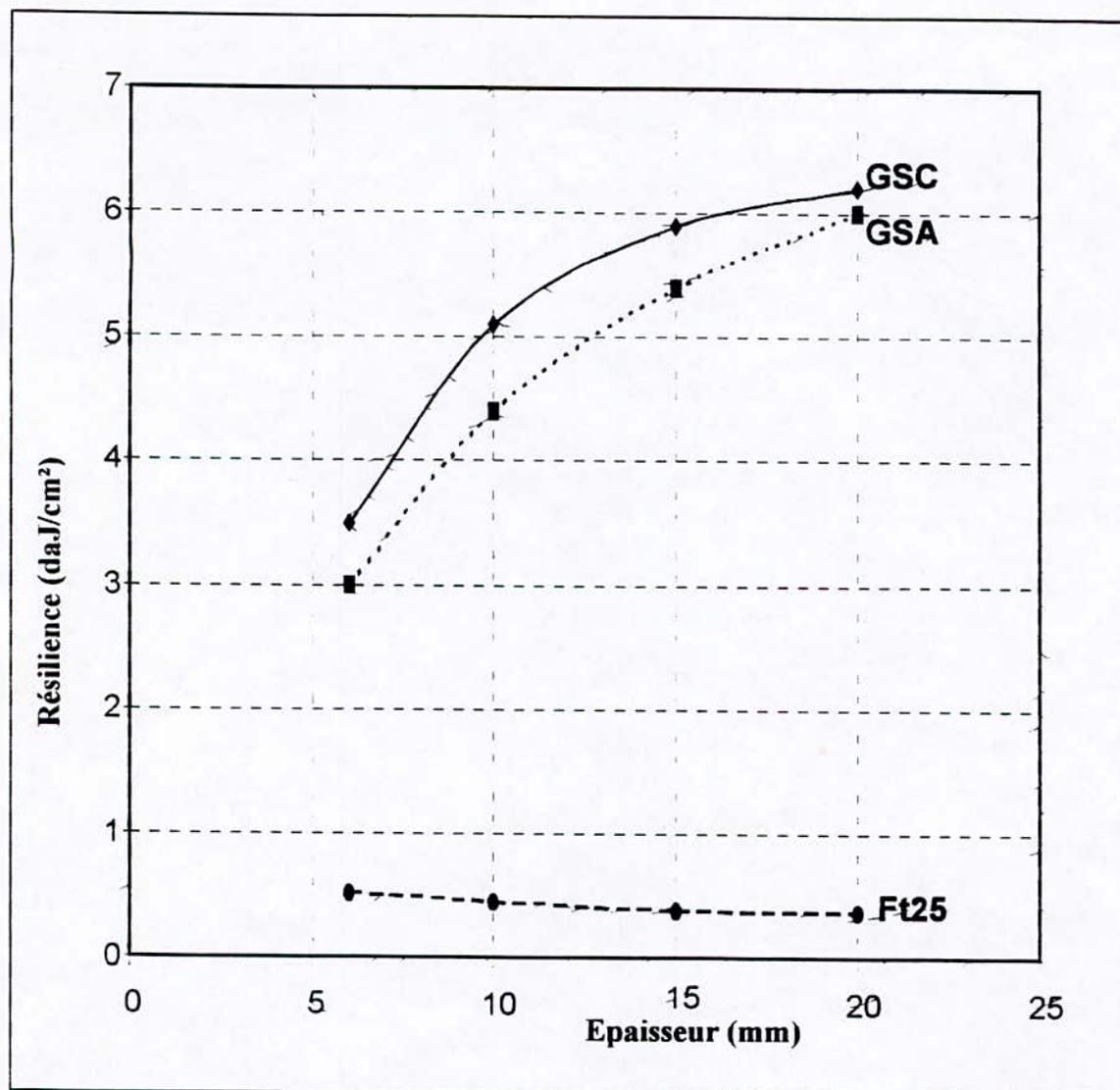


Fig III.21: Variation de la résilience en fonction de l'épaisseur (GSC, GSA, Ft25)

CONCLUSION

Dans le cadre de notre étude, nous avons déterminé les propriétés mécaniques et structurales en fonction de l'épaisseur d'une éprouvette en escalier des fontes (GSC38-15, GSA56-5 et Ft25).

Les conclusions qu'on peut déduire se résument comme suit :

En ce qui concerne la morphologie du graphite, on constate que le graphite dans les fontes GS, est presque complètement sphéroïdale, de forme VI, de répartition E et d'indice de dimension qui décroît de 7 à 4 en fonction de l'épaisseur. Le diamètre moyen réel des sphéroïdes varie respectivement de 8 à 11 μ et de 9 à 14 μ m pour les fontes GSC et GSA.

Pour la fonte Ft25 le graphite a une forme lamellaire de taille et de dimension qui croissent avec l'épaisseur.

En ce qui concerne la matrice nous avons remarqué la présence du constituant perlitique qui domine pour les structures appartenant aux faibles épaisseurs. Pour ce qui est de la ferrite, on la retrouve majoritaire pour les grandes épaisseurs.

La dureté varie en fonction de l'épaisseur de la pièce. En effet, plus l'épaisseur augmente plus la dureté diminue pour les trois fontes citées (GSA, GSC, Ft25).

Pour ce qui est de la résilience, des fontes GSA et GSC, elle augmente tandis qu'elle diminue pour la fonte Ft25.

Pour la même pièce les caractéristiques mécaniques et structurales varient en fonction de l'épaisseur. Pour réduire l'effet de la vitesse de refroidissement aux différentes épaisseurs, nous recommandons l'utilisation des refroidisseurs à partir :

- de l'épaisseur 15mm pour la fonte GSC dont la matrice est perlitique.
- de l'épaisseur 10mm pour la fonte GSA dont la matrice est perlitique.
- pour la fonte Ft25 la matrice étant perlitique quelque soit l'épaisseur, cependant les dimensions des lamelles de graphite augmentent en fonction de l'épaisseur.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] A.Roos et B.Milet, "Précis de métallurgie appliquée", Edition Lavoisier, Paris, 1982.
- [2] J.Barrals et G.Maider, "Précis de métallurgie", Edition nathan, Paris, 1990.
- [3] M.Geier, "Métallurgie de fonderie T2", édition Eyrolles, Paris, 1978.
- [4] I.Lakhtine, "Métallographie et traitement thermiques des métaux", Edition Mir (Moscou), 1978.
- [5] C.Chaussin et G.Hilly " Métallurgie T1", Edition Dunod, Paris, 1973-1974.
- [6] A.Hachour, "Détermination des propriétés mécaniques et structurales en fonction des différentes épaisseurs d'une éprouvette en escalier des fontes GSC38-15 ,GSA56-5 et Ft25 ", PFE, ENP, 1997.
- [7] N. Bouaouadja, "Matériaux métallique T1", Edition O.P.U, 1992.
- [8] AFNOR, "Conception des pièces métalliques moulées ", 1993.
- [9] H.Laplanche, "Traitement thermique/ Sensibilité à l'épaisseur", N°72 1973.
- [10] R. Diectrich E. Hygonnaud, "Précis de construction mécanique T2", Edition Nathan, 1979.
- [11] "Technique de l'ingénieur/ Préparation des surfaces ", M 90
- [12] "Technique de l'ingénieur/ Spectrométrie de masse", P 2615 .

ANNEXE

DESIGNATION DE LA MICROSTRUCTURE DU GRAPHITE DANS LA FONTE : [NF A 32-100]

FORME

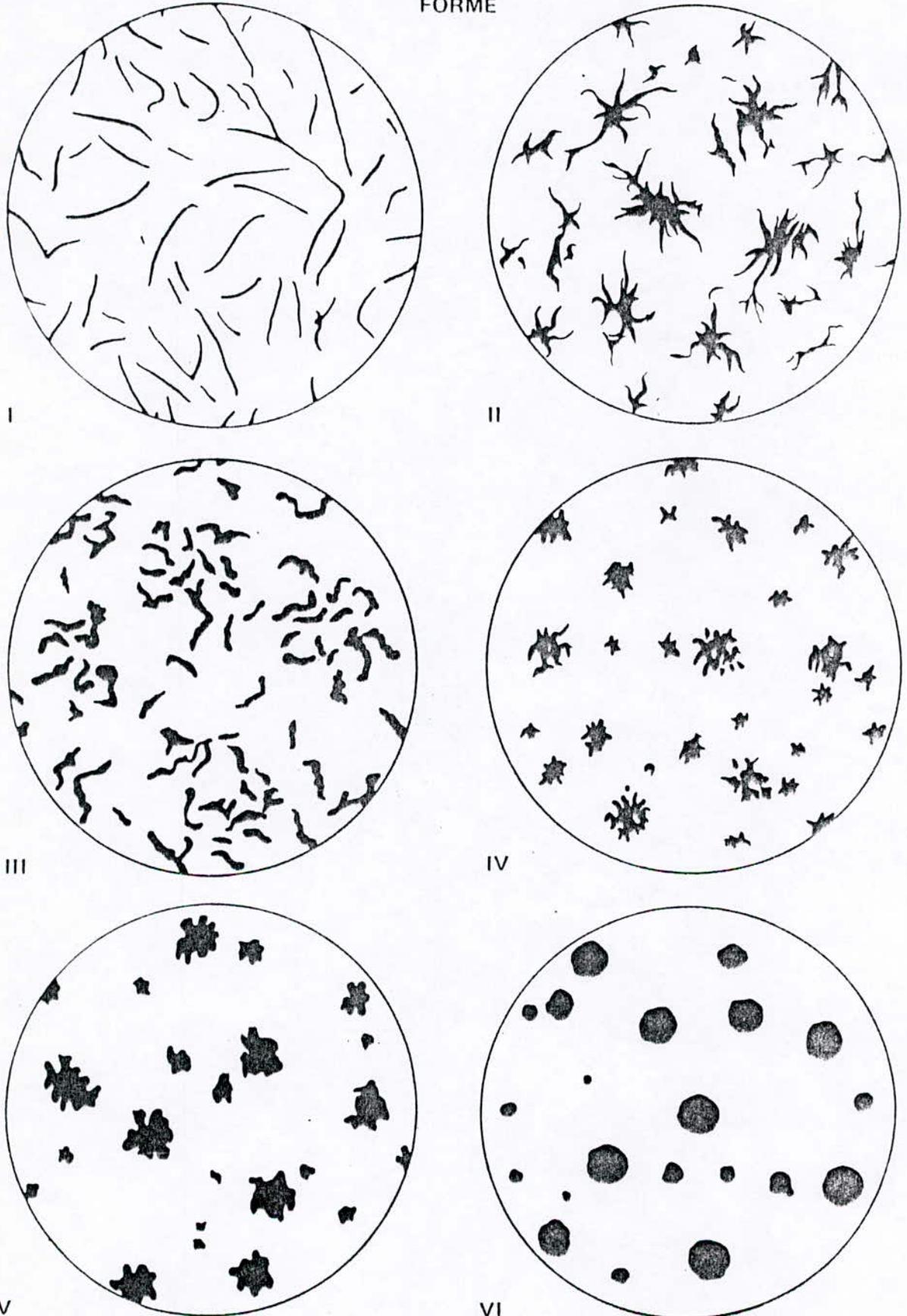


FIGURE 1 – Croquis de référence pour la forme du graphite (répartition A)

RÉPARTITION

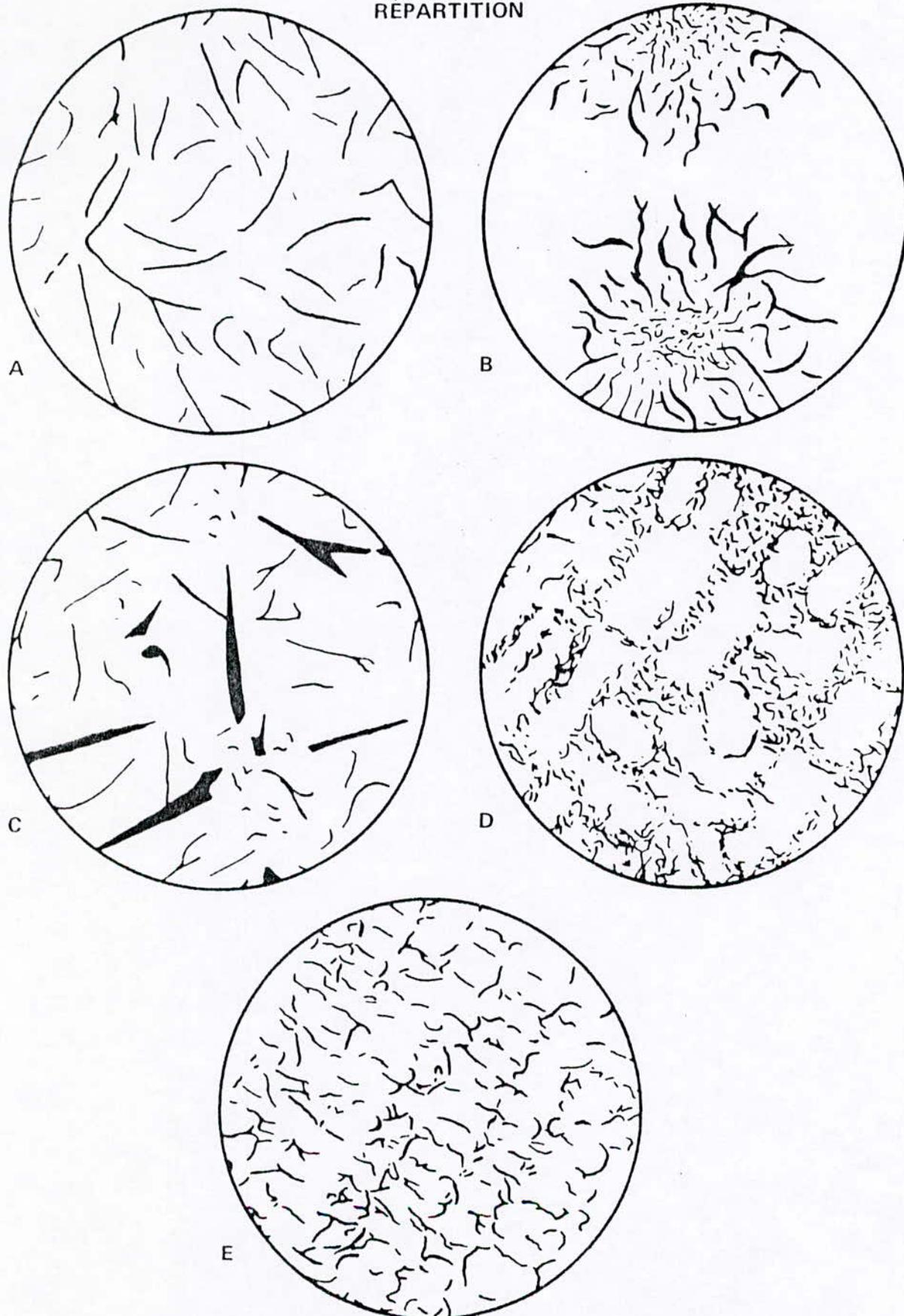


FIGURE 2 – Croquis de référence pour la répartition du graphite (forme I)

DIMENSIONS

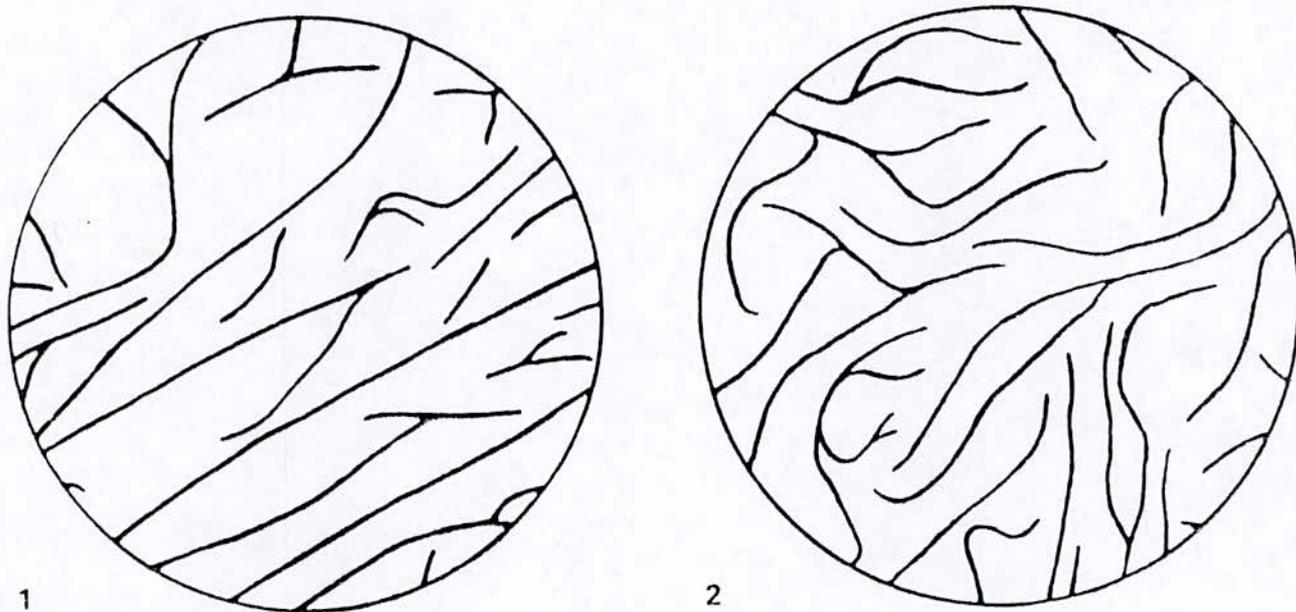


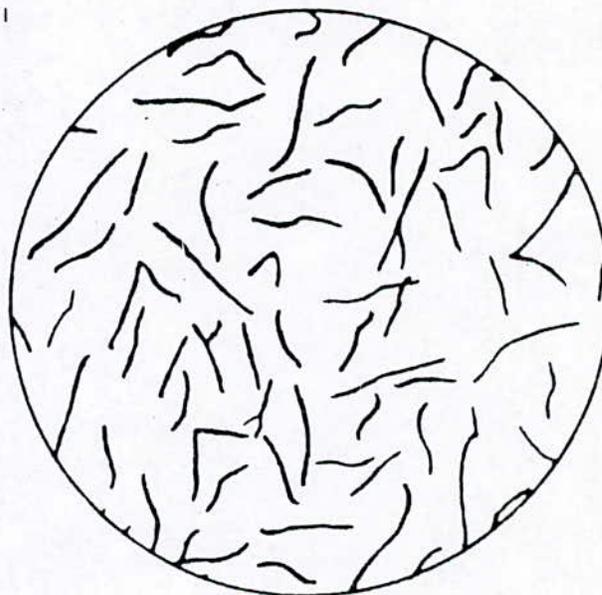
FIGURE 3 – Croquis de référence pour les dimensions du graphite (forme I et répartition A) (grosissement 100 x) –
Numéros de référence 1 et 2

DIMENSIONS

Forme I



3



4

Forme VI

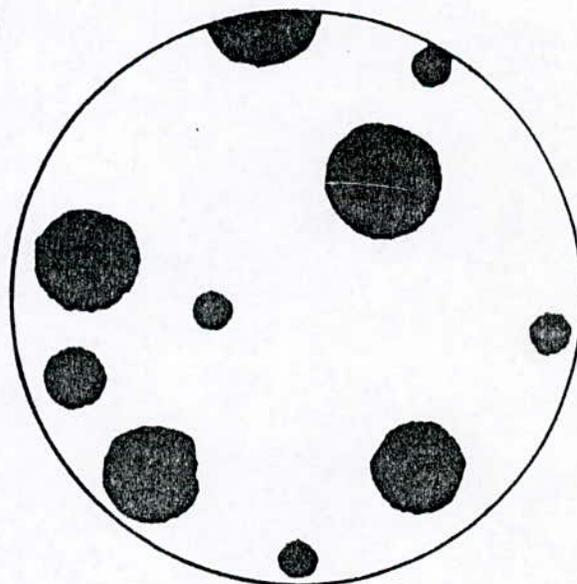
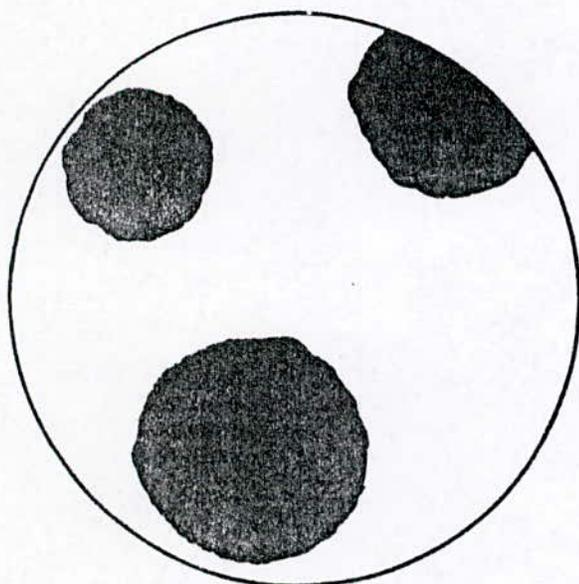
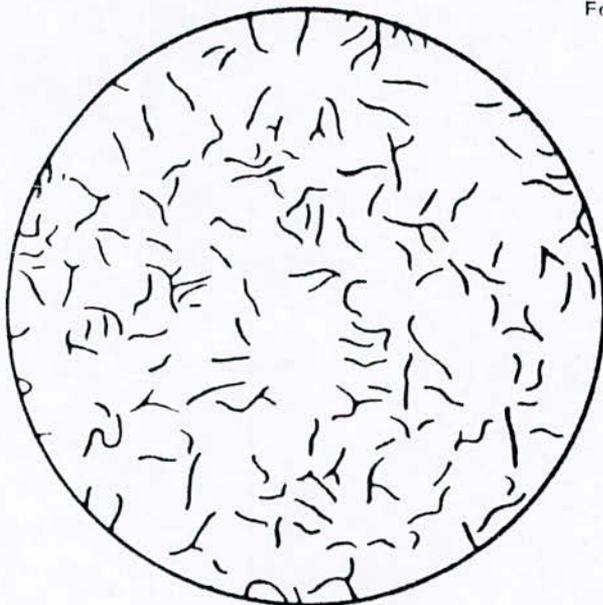


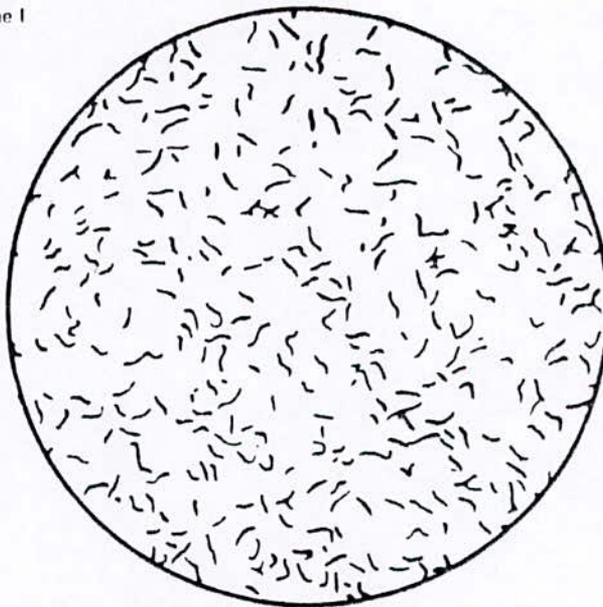
FIGURE 4 – Croquis de référence pour les dimensions du graphite (formes I et VI et répartition A) (grossissement 100 X) – Numéros de référence 3 et 4

DIMENSIONS

Forme I

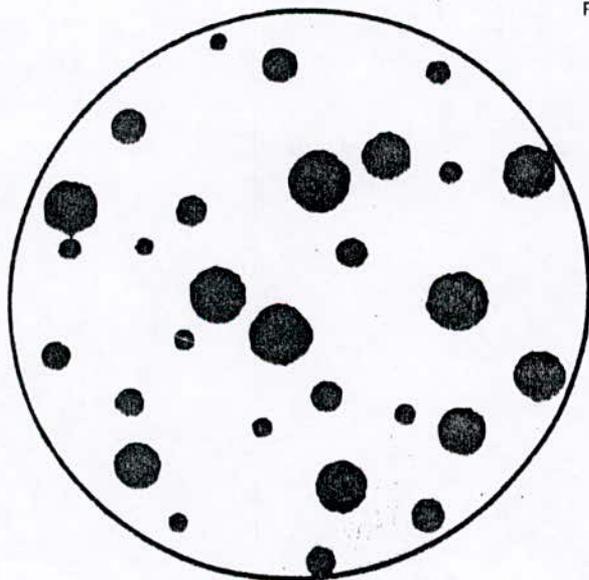


5

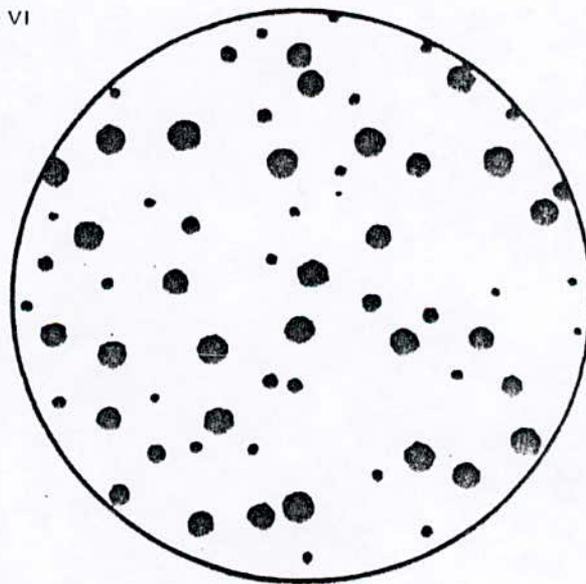


6

Forme VI



5

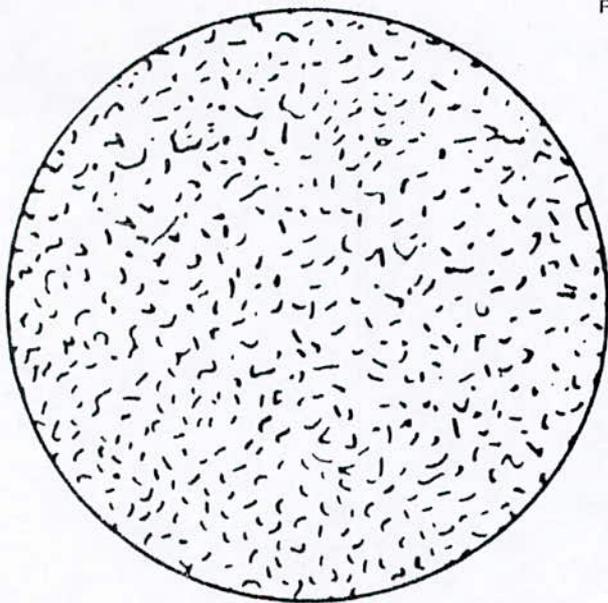


6

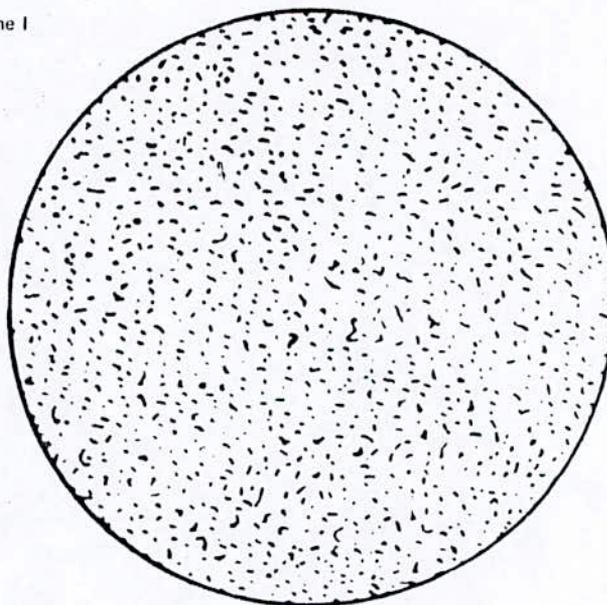
FIGURE 5 – Croquis de référence pour les dimensions du graphite (formes I et VI et répartition A) (grossissement 100 X) – Numéros de référence 5 et 6

DIMENSIONS

Forme I



7



8

Forme VI

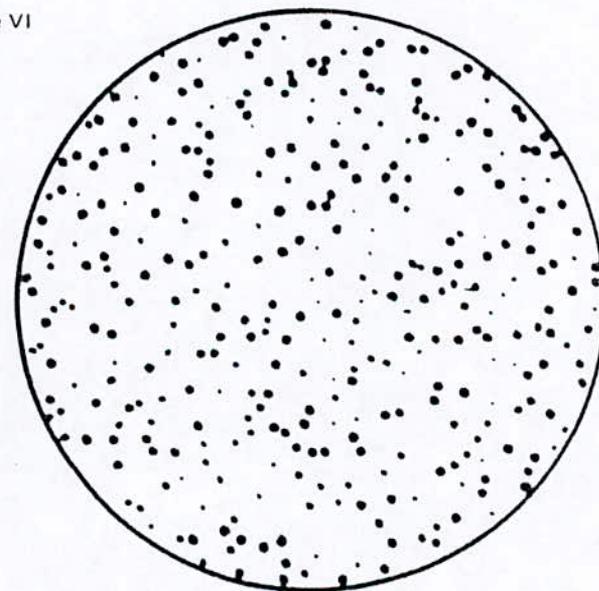
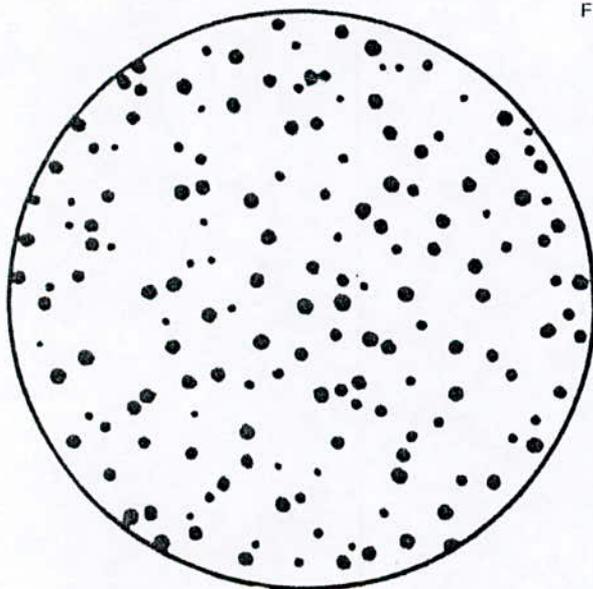


FIGURE 6 – Croquis de référence pour les dimensions du graphite (formes I et VI et répartition A)
(grossissement 100 x) – Numéros de référence 7 et 8