

2/97
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE POPULAIRE ET DEMOCRATIQUE

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة - BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

SUJET

**DETERMINATION DES PROPRIETES MECANQUES
ET STRUCTURALES EN FONCTION DES
DIFFERENTES EPAISSEURS D'UNE
EPROUVETTE EN ESCALIER DES FONTES
GSC 38-15 , GSA 56-5 et Ft 25**

Proposé par :

Mr E. SALHI

Etudié par :

Mr A. HACHOUR

Dirigé par :

Mr E. SALHI

PROMOTION 1996-97

E.N.P 10, Avenue, Hassane Badi - EL-HARRACH -ALGER

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE POPULAIRE ET DEMOCRATIQUE

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

SUJET

***DETERMINATION DES PROPRIETES MECANQUES
ET STRUCTURALES EN FONCTION DES
DIFFERENTES EPAISSEURS D'UNE
EPROUVETTE EN ESCALIER DES FONTES
GSC 38-15 , GSA 56-5 et Ft 25***

Proposé par :

Mr E. SALHI

Etudié par :

Mr A. HACHOUR

Dirigé par :

Mr E. SALHI

PROMOTION 1996-97

E.N.P 10, Avenue, Hassane Badi - EL-HARRACH -ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Métallurgie

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

Intitulé du Projet :

Détermination des propriétés mécaniques et structurales en fonction des différentes épaisseurs d'une éprouvette en escalier des fontes: GSC38-15 , GSA56-5 et Ft25.

ملخص
ان القطع الميكانيكية من حديد الزهر تمثل خصائص تركيبية وميكانيكية مختلفة بتغيير سمك أجزاء القالب. ومن اجل اثبات هذا الترابط صممنا قطعة تجارب مدرجة مختلفة السمك، ثم قمنا بتجريب الصلابة وقوة التماسك، وكذلك دراسة مجهرية للمطونات.

Abstract :

Mechanical parts made of cast iron present different structures and mechanical properties as a function of their casted thicknesses. In order to show this dependance we have designed specimen that looks like a stairs system, with different thicknesses, then we have carried out a metallographic investigation followed by mechanical properties investigation such as, hardness and resilience.

Résumé :

Les pièces en fonte grise, brut de coulée présentent de différentes structures et de caractéristiques mécaniques en fonction des épaisseurs des parois des moules. A fin de mettre en évidence cette dépendance on a conçu une éprouvette en escalier, puis on a réalisé les essais de résilience et de dureté, et une étude métallographique.

Dirigé par : M. E. SALHI .

Présenté par : M. A. HACHOUR.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- * A mes très chers parents
- * A mes frères et soeurs.
- * A tous mes amis (es).

Abderrahmane

Remerciements

Je tiens à remercier vivement l'ensemble des enseignants du Département de Métallurgie qui ont contribué à ma formation, en particulier mon promoteur Monsieur SALHI qui a veillé sur la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier également l'ensemble des travailleurs de la fonderie de Rouiba.

Enfin sans oublier tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près dans la réalisation de mon projet.

SOMMAIRE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

	Page
Introduction.....	1
Chapitre I : Généralités bibliographiques	
1- Définition.....	3
2- Elaboration de la fonte	8
3- Composition chimique et influence des différents éléments	13
4- Mécanisme de solidification des fontes à graphite sphéroïdal	16
5- Mécanisme de solidification des fontes à graphite lamellaire	18
6- Caractéristiques des fontes grises	19
Chapitre II : Etudes et techniques expérimentales :	
1- Eprouvette en escalier	21
2- Essai de résilience	23
3- Essai de dureté	24
4- Analyse qualitative	25
5- Analyse quantitative	26
6- Analyse chimique	29
Chapitre III : Résultats et interprétation :	
1- Morphologie du graphite	31
2- Analyse de matrice	40
3- Influence de l'épaisseur sur la résilience	49
4- Influence de l'épaisseur sur la dureté	52
Conclusions.	
Référence bibliographiques.	

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les fontes moulées qui ont une longue histoire constituent aujourd'hui une large gamme de matériaux ayant des structures très diversifiées. Ce sont des matériaux économiques qui offrent une combinaison de propriétés physiques et mécanique convenant particulièrement à de nombreuses applications. Les pièces en fonte moulée sont obtenues à partir d'un alliage liquide à base de fer de carbone et de silicium contenant des éléments comme Mn, P, S, ...

A l'état liquide, le carbone est en solution dans la fonte, au cours de la solidification, seule une partie de ce carbone reste en solution dans la structure du fer. Le carbone en excès, en fonction principalement de la vitesse de refroidissement de la composition chimique et du procédé d'élaboration, peut :

- ♦ Soit se combiner avec le fer en formant un réseau de carbure de fer (cémentite).
- ♦ Soit se cristalliser sous forme de lamelles ou sphéroïdes de graphite (selon la composition chimique).

Après solidification, ces particules de graphite sont incluses dans la phase austénitique du fer, celle-ci subit des transformations en donnant, selon la vitesse de refroidissement et la composition chimique, les constituants des alliages ferreux (ferrite, perlite), que l'on retrouve en proportions variable

Ce projet de fin d'étude se base sur l'étude de l'influence de la vitesse de refroidissement et sur les différentes propriétés des fontes

(GSC 38-15, GSA 56-5 et Ft 25) élaborées à l'unité de fonderie de la SNVI Rouiba. Cette étude consiste à déterminer l'évolution des caractéristiques mécaniques et structurales en fonction de la vitesse de refroidissement qui varie avec l'épaisseur du moule.

Le premier chapitre de notre travail est consacré pour les généralités bibliographiques concernant les fontes grises, leurs structures, compositions chimiques et leurs caractéristiques mécaniques ainsi que la germination et la croissance du graphite et sa morphologie.

Dans le deuxième chapitre, on a illustré les différentes méthodes expérimentales nécessaires pour la quantification des différentes grandeurs en question (résilience, dureté, taille des grains du graphite, ...).

Les résultats des essais et mesures sont résumés sous forme de graphes, histogrammes et tableaux au chapitre III avec les interprétations nécessaires.

CHAPITRE I -

GENERALITES BIBLIOGRAPHIQUES

1- DEFINITION [1] [2] [3] [4] [5].

Les fontes à graphite lamellaire sont des alliages ferreux comprenant conventionnellement plus de 2% de carbone. Les pièces moulées en fonte à graphite lamellaire sont celles dans lesquelles le graphite est principalement présent sous forme de lamelles et dont la cassure présente un aspect allant de gris clair au gris foncé.

Ces fontes ont pratiquement des teneurs en carbone comprise entre 3 et 4%, et inférieur à 3% en silicium.

Les fontes grises à graphite sphéroïdale sont des fontes dans lesquelles le graphite est obtenu à l'élaboration sous forme sphéroïdale ; de ce fait, les inconvénients dus à la forme lamellaire sont réduits. Le graphite n'atténue que très peu les propriétés de la matrice, il en résulte que tout en conservant les propriétés spécifiques des fontes, notamment la facilité de mise en oeuvre et d'usinage, les fontes à graphite sphéroïdal ont des caractéristiques mécaniques et une ductilité élevées.

1.1- Constituants et phases des fontes :

a- Ferrite : C'est une solution solide d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer. La solubilité du carbone dans le fer est de 0.005 à l'ambiante et de 0.02% à la température de 727°C.

b- Cémentite : Le fer est capable de dissoudre du carbone jusqu'à une concentration de 6.7% pour former un carbure de fer, appelé cémentite.

C'est une combinaison chimique très dure (HB = 600 à 700), inusable aux outils de coupe ordinaires.

c- La perlite : Dans le cas d'un refroidissement lent, après solidification à la température de 721°C, les alliages fer - carbone sont le siège d'une transformation interne eutectoïde, au cours de laquelle la ferrite et la cémentite forment un nouveau constituant ayant la forme d'un agrégat très fin et lamellaire appelé perlite.

Ce constituant est formé de 87% de ferrite et de 13% de cémentite, en couche alternées et orientées parallèlement. La distance interlamellaire est inférieure à 10^{-3} mm. La teneur en carbone de la perlite est donc :

$$6.7 \times 13/100 = 0.87\% \quad \frac{6.7 \times 13}{100} = 0.87\%.$$

la dureté est de 200 à 250 HB.

d- Le graphite : C'est une variété de carbone cristallisé, de densité 2.2. Il prend naissance à la solidification et se répartit plus ou moins également dans la matrice ferritique des fontes grises sous forme de particules dont les dimensions sont de quelques microns.

Ces différents aspects sont fonction de la composition chimique, de la vitesse de refroidissement, des traitements thermiques effectués sur les pièces, peuvent être donner du graphite lamellaire, soit du graphite en rosettes, soit du graphite nodulaire, ou du graphite sphéroïdal. Ces formes sont distinguées par les chiffres romains de I à VI.

La forme I correspond au graphite lamellaire, on peut distinguer l'existence de cinq types A, B, C, D, E. Associés d'une indication sur la dimension des lamelles (figI-1).

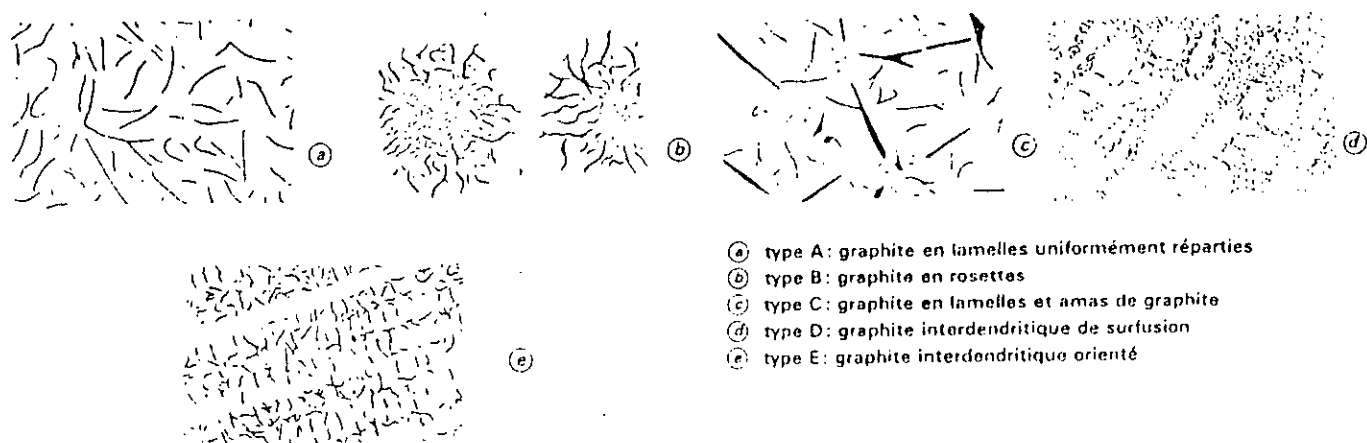


Fig.I-1 : Types de graphites.

Le graphite A est le plus favorable du point de vue mécanique. Un indice en chiffre arabe permet de fixer la dimension moyenne des lamelles de graphite qui varie de 1 à 8. [NF A 32 - 100 juillet 1967].

Numéro de référence	Dimensions (en mm) des particules observées du grossissement 100	Dimensions réelles (en mm)
1	> 100	> 1
2	50 à 100	0.5 à 1
3	25 à 50	0.25 à 0.5
4	12 à 25	0.12 à 0.25
5	6 à 12	0.06 à 0.12
6	3 à 6	0.03 à 0.06
7	1.5 à 3	0.015 à 0.03
8	< 1.5	< 0.015

1.3- Diagramme d'équilibre fer - cémentite :

La figure I2 ci-dessous présente le diagramme d'équilibre fer - cémentite qui traduit la composition de phases et la structure des alliages fer - carbone, dont la concentration en carbone varie de 0 à 6.67%.

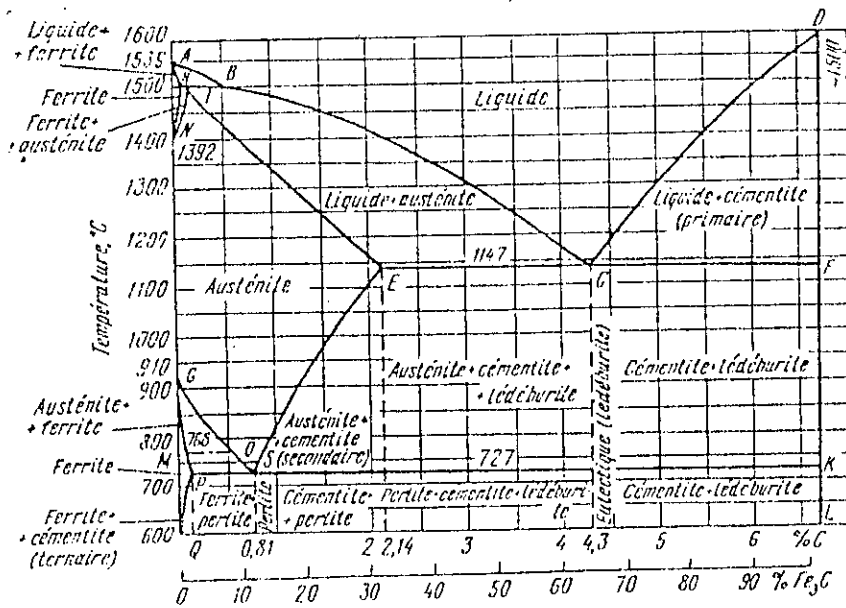


Fig.1.-2 - Diagramme fer - cémentite.

Le point A (1539°C) du diagramme correspond au point de fusion du fer pur, alors que le point D (1600°C) à celui de la cémentite. Quand aux points N (1392°C) et G (910°C), ils marquent la transformation polymorphe du fer.

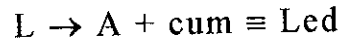
Les autres points et les lignes caractéristiques du diagramme sont :

- * B : 0.51%C dans la phase liquide en équilibre avec le fer δ à la température du palier péritectique HB.
- * H : 0.10% C, marque la solubilité liquide du carbone dans le fer δ à 1499°C.
- * HB : Palier de la transformation péritectique.



- * E : 2.14% marque la solubilité liquide du carbone dans l'austénite à la température du palier eutectique ECF (1147°C).
- * S : 0.8%C dans l'austénite à la température du palier eutectoïde PSK à 727°C.

- * P : 0.02%C marque la solubilité limite du carbone dans la ferrite à 727°C. Température ambiante, la solubilité du C est $\leq 0.005\%C$.
- * ECF : Solidus qui correspond à la cristallisation de l'eutectique appelé lédéburite (Lb) :



1.4- Diagramme d'équilibre fer - graphite :

Le diagramme fer - graphite est similaire au diagramme fer - cémentite (fig. I-3).

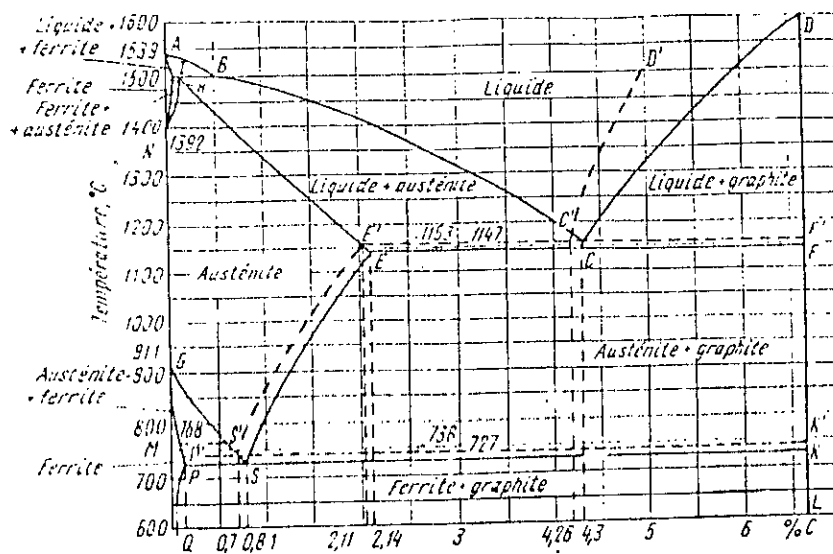


Fig.1.-3 : Diagramme fer - graphite

Dans le système stable fer - graphite, le graphite primaire cristallise aux températures inférieures à celles de la courbe C'D' et le graphite eutectique à celles de la ligne E'C'F'. La courbe S'E' délimite le domaine de précipitation du graphite secondaire et le palier P'S'K', le graphite eutectoïde.

2- ELABORATION DE LA FONTE [1] [6] [7] :

Au niveau de la fonderie de la S.N.V.I., l'élaboration passe par les étapes suivantes (fig. I-4) :

- 1- Préparation des matières premières.
- 2- Pesage.
- 3- Bennage des matières vers le four de fusion.
- 4- Fusion au four à arc.
- 4'- Analyse d'un prélèvement.
- 5- Maintien dans un four à induction et réajustement de la composition plus un deuxième prélèvement à analyser.
- 6- Traitement de sphéroïdisation et le transport vers les chaînes de coulée.

2.1- Préparation du lit de fusion :

Les charges sont puisées dans le parc des ferrailles (stock), où sont classées par type et analyse chimique. Parmi ces ferrailles, on peut citer :

- * Les retours de fonderie : constitué par des pièces robustes, masselottes, des jets de coulée, ...
- * Des paquets d'aciers doux.
- * Des lingots de la fonte neuve (fonte de la première fusion).

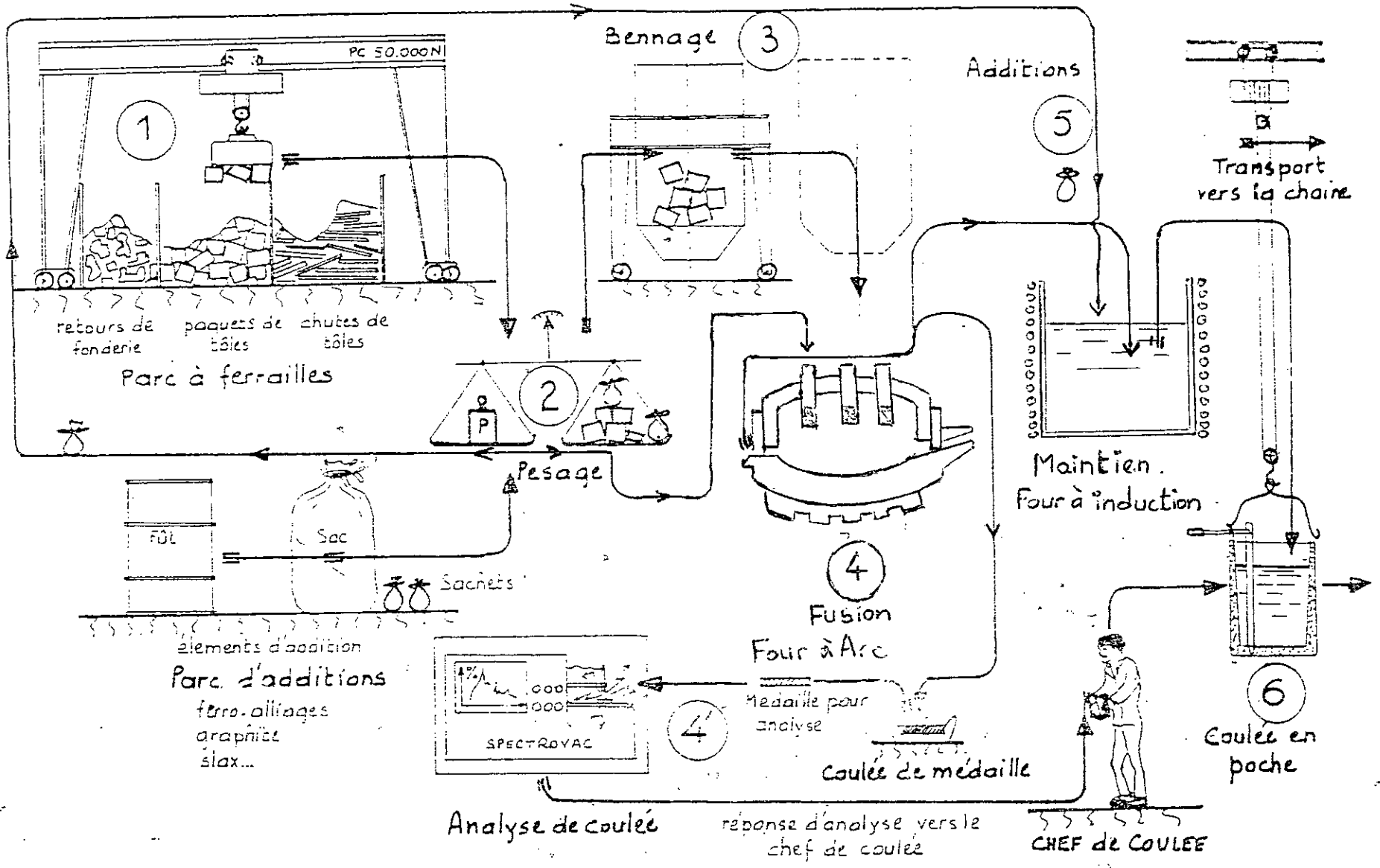


Fig. I - 4 - Elaboration de la fonte.

2.2- La fusion :

La fusion se fait dans un four à arc électrique à une température de 1450°C, pendant une durée de 2h. Avant de transférer la fonte liquide aux fours à induction de maintien, on prend un prélèvement dit médaille d'analyse par spectromètre.

Pour la fusion, la S.N.V.I. dispose de deux fours à arc dont leurs caractéristiques sont :

- Capacité : 10 tonnes.
- Puissance : 21 MVA.

2.3- Réajustement de la composition :

La fonte liquide est maintenue dans un four à induction à une température de 1500°C. C'est à ce niveau qu'on fait la différence entre les différents types de fonte à élaborer.

A partir des résultats de l'analyse de la médaille et la composition voulue, on calcule les quantités qu'il faut ajouter de chaque élément.

Les matières d'addition sont :

- * Le graphite : 99% de carbone, utilisé pour régler la teneur en carbone dans la fonte.
- * Le ferro-silicium : 80% de Si, utilisé pour réajuster la teneur en Si.
- * Ferro-manganèse : 60% de Mn, utilisé pour réajuster la teneur en Mn.

* Cuivre en barre : la teneur en Cu peut atteindre 1% dans la fonte à graphite lamellaire, alors ces barres sont utilisées seulement pour régler la teneur en cu dans ces fontes.

2.4- Traitement de sphéroïdisation [1] [8] :

Le traitement consiste à additionner du ferro-silicium - magnésium (Fe - Si - Mg). La méthode la plus utilisée est la méthode sandwich, elle s'effectue par une introduction de cet alliage au fond de la poche de coulée (Fig. I-5). On recouvre cet alliage par des tôles d'acier doux de façon à retarder le contact avec le fonte liquide, afin de réduire les pertes de magnésium sous l'action de la réaction exothermique, car la température d'ébullition du Mg est de 1100°C et que son immersion dans la fonte liquide donne lieu à une vaporisation, donc sa teneur diminue aussi rapidement que la température est élevée. La coulée doit s'effectuer au plus tard 20 mn après le traitement.

Pour une tonne de fonte, on doit ajouter 17 Kg de Fe - Si - Mg et 10 Kg de couverture (acier doux).

La composition du Fe - Si - Mg est :

- 50% Fe
- 45% Si
- \cong 6% Mg.

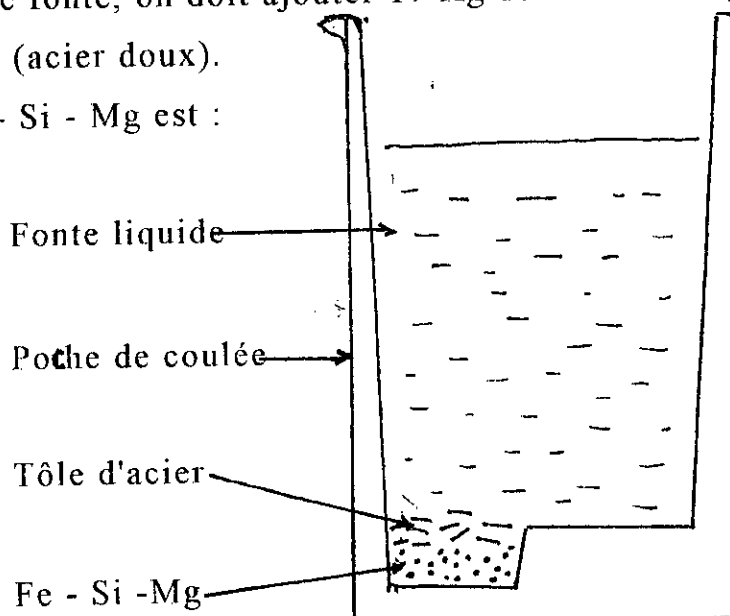


Fig I-5 : Principe de traitement de sphéroïdisation

2.5- Composition chimique recherchée :

On présente ci-dessous la composition des trois fontes étudiées et élaborées à la fonderie de Rouiba (U.F.R).

Eléments	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Cu%
GSC	3.45 à 3.80	2.50 à 3.00	≤ 0.40	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05
GSA	3.45 à 3.80	2.40 à 2.80	≤ 1.0	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05
Ft 25	2.90 à 3.10	2.40 à 2.80	≤ 0.2	≤ 0.05	≤ 0.05	0.6 à 1%

Tableau I-1 - Analyse chimique

3- COMPOSITION CHIMIQUE ET INFLUENCE DES DIFFERENTS ELEMENTS [2] [3] [7] :

Les propriétés des fontes grises ordinaires sont intimement liées à la structure de ces fontes, en fonderie, c'est l'analyse chimique qui conditionnera principalement leurs structures. Parmi les composants chimiques des fontes, on distingue deux types d'éléments : éléments graphilisants et éléments non graphilisant ou antigrahilisants.

a- Le carbone : Le carbone est un élément graphilisant, toujours présents dans les alliages ferreux, il peut s'y trouver sous deux formes :

- à l'état libre, c'est le graphite, on l'appelle aussi carbone graphitique ou carbone libre : C_g .

- à l'état combiné, c'est un carbure de fer appelé cémentite ou carbone combiné : C_c .

La somme entre le carbone libre et combiné, donne le carbone total qui est la teneur dans la fonte C_t .

$$C_t = C_g + C_c$$

La présence du silicium et du phosphore dans le métal modifie la teneur en carbone du point eutectique, laquelle est diminuée du tiers de la teneur en silicium et en phosphore. La teneur en carbone total d'une fonte contenant du silicium et du phosphore se comporte comme une fonte ayant un carbone fictif, appelé carbone équivalent donnée par la formule.

$$C_{eq}\% = C_t\% + 1/3 (Si \% + P\%) [3]$$

Des études faites par Matsusiro et Hamasumi [2] ont montré que l'augmentation en carbone total implique une augmentation en carbone libre, donc un affaiblissement des caractéristiques mécaniques de ces fontes (fig.I-6).

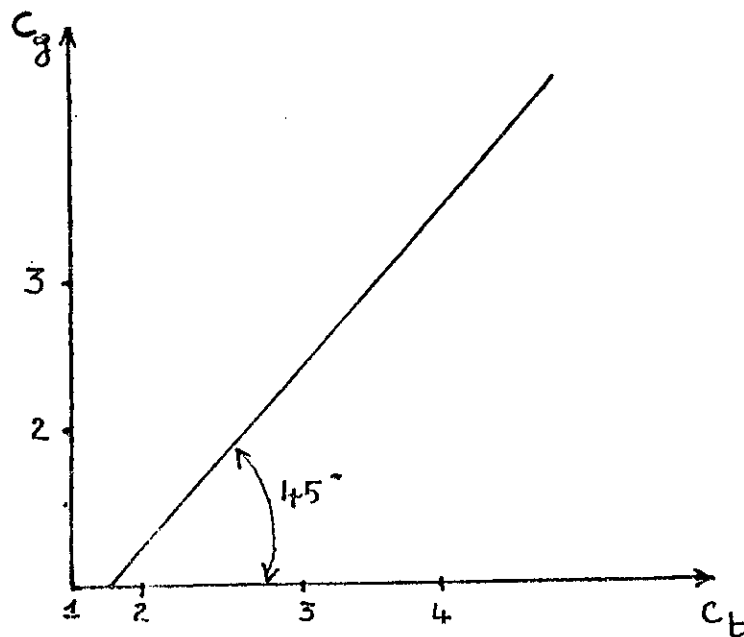


Fig.1-6 - Barreau de fonte pure 1.9% Si ; 0.15 S et P ; 0.1 + 0.4 Mn, coulée à 1350°C de diamètre 32 mm (Matsuriro et Hamasumi).

b- Le silicium : Le silicium est un graphilisant énergétique, il abaisse la température du liquidus et élève la température de solidus, donc il diminue l'intervalle de solidification (fig. I-7).

Si on veut obtenir des pièces minces en fonte grise, on a intérêt à augmenter la teneur en silicium car il augmente la coulabilité de la fonte et agit dans le même sens qu'un ralentisseur de vitesse de refroidissement, donc évite la présence de cémentite.

Toute évaluation de la teneur en silicium d'une fonte grise provoque une diminution de sa dureté et une augmentation de sa résistance mécanique, sauf dans le cas de fontes dont la structure initiale renferme de la ferrite proeutectoïde où d'ailleurs la diminution de ces résistances reste faible.

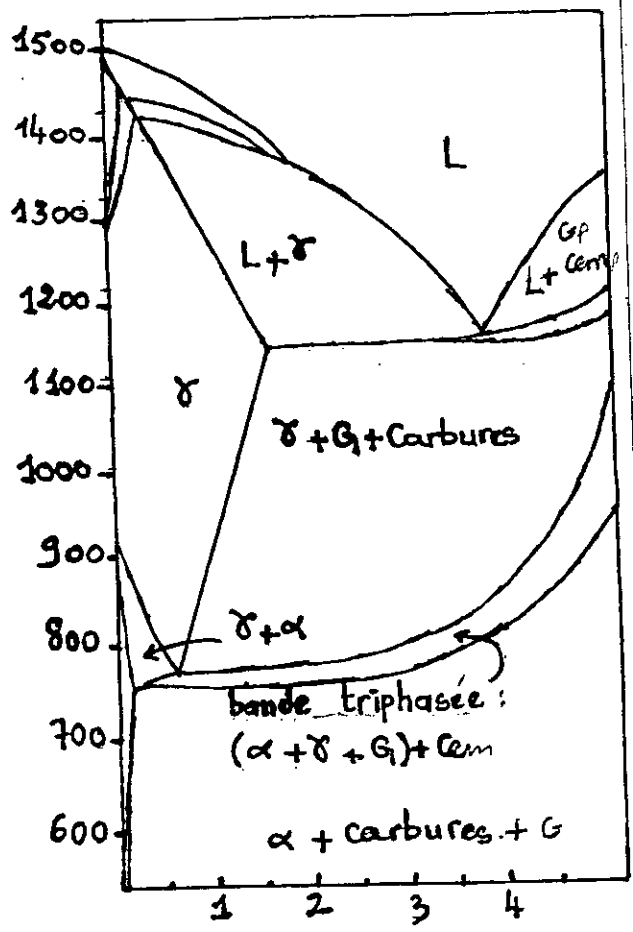


Fig.1.7- Diagramme pseudo-binaire Fe - C - Si à 2% de Si, d'après Dorazil.

c- **Le soufre** : Il favorise la formation de cémentite, augmente la dureté et la fragilité, diminue la résistance à la traction, augmente le retrait et diminue la coulabilité.

Le soufre est un élément antigraphilisant, alors il joue un rôle néfaste sur les propriétés mécaniques pour obtenir des fontes grises à résistances mécaniques élevées, la teneur en soufre ne doit pas dépasser 0.01%.

d- Le manganèse : Dans les teneurs habituellement rencontrées dans les fontes grises non alliées (0.45 à 0.90%), le manganèse a un effet antigraffilisant, influe peu sur la structure de ces fontes ; il affine la perlité et augmente la dureté et la résistance à la traction.

Son rôle principal est de neutraliser l'effet néfaste du soufre, par formation de sulfures de manganèse MnS.

e- Le phosphore : Le phosphore est le seul élément de structure des fontes grises pouvant donner naissance avec le fer à un composé défini, c'est l'eutectique phosphoreux, lequel se solidifie en dernier lieu, donc il se trouve aux joints de grains, l'abondance de ce composé diminue l'usinabilité.

Le phosphore abaisse très sensiblement le point de fusion des fontes, il augmente donc la coulabilité, il est utilisé pour le moulage des pièces minces, par contre il diminue la résistance à la traction et la résilience.

f- Le cuivre : Élément graffilisant qui contribue fortement à l'affinement de la perlite par son action gamagène. En outre, le cuivre est un élément anti-ferritisant, son introduction dans la fonte entraîne une augmentation de la résistance au choc et de la dureté.

4- MéCANISME DE SOLIDIFICATION DES FONTES à GRAPHITE LAMELLAIRE [1][4][9] :

Le germe cristallin du graphite prend naissance dans le liquide sursaturé en carbone, et se développe jusqu'à former une petite plaquette de graphite. Au voisinage immédiat de ce cristal, où la concentration en carbone est devenue faible, il se forme un germe d'austénite qui se développe très rapidement jusqu'à recouvrir les phases de la plaquette (fig. 1-8). Le cristal est encore en contact avec le liquide par ces extrémités, il continue à croître par diffusion du carbone à travers l'enveloppe d'austénite mais surtout par apport direct à ses extrémités. Une fois que l'enveloppement du cristal de graphite est terminé, toute croissance ultérieure n'est plus possible que par diffusion du carbone à travers l'enveloppe de l'austénite.

Une surchauffe de la fonte en fusion et un refroidissement rapide donnent un graphite finement divisé. Mais en général la forme lamellaire est la plus classique.

Le plus souvent, pendant la solidification et le début de refroidissement, les transformations s'effectuent suivant le système métastable, et la décomposition de l'austénite s'achève soit par la formation de cémentite, soit par la formation de ferrite puis de perlite ou simplement de perlite.

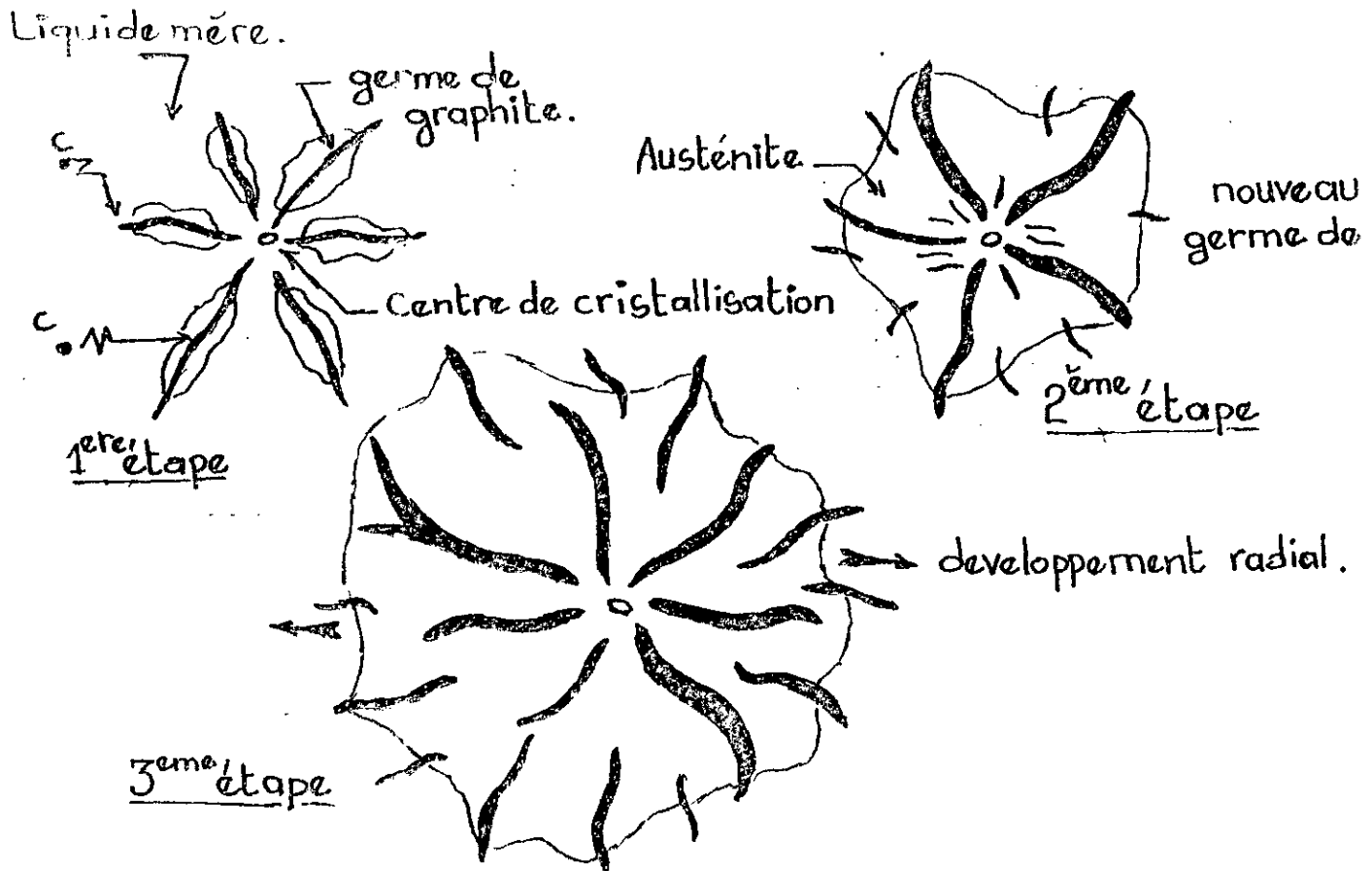


Fig1.-8 - Formation du graphite lamellaire

5- MÉCANISME DE SOLIDIFICATION DANS LES FONTES GS [1] [4] [9] :

Les sphéroïdes de graphite prennent naissance au coeur des grains d'austérite primaire. Ces germes se développent par diffusion du C depuis le métal liquide jusqu'au cristal du graphite en cours de formation, à travers l'enveloppe de l'austérite. Cette diffusion s'effectue avec la même vitesse dans toutes les directions, ce qui engendre la forme sphéroïde.

La libération de l'espace nécessaire à l'accroissement du sphéroïde se ferait par autodiffusion du fer et des autres éléments dissous dans l'austérite, dans le sens opposé au carbone.

Le graphite se formerait après l'inoculation au ferro-silicium, des cristaux transitoires de carbures des cristaux transitoires de carbone de silicium, dans des zones riches en silicium de la fonte liquide. Les plaquettes de carbure de silicium, par suite de leur dilution par le fer se déposent en donnant des cristaux de silicium de fer et des germes de graphite sphéroïdal qui s'enrobe avec l'austérite.

L'examen d'échantillons trempés dans l'intervalle liquidus-solidus montre que le rapport $R/r = 2.3$ à 2.4 .

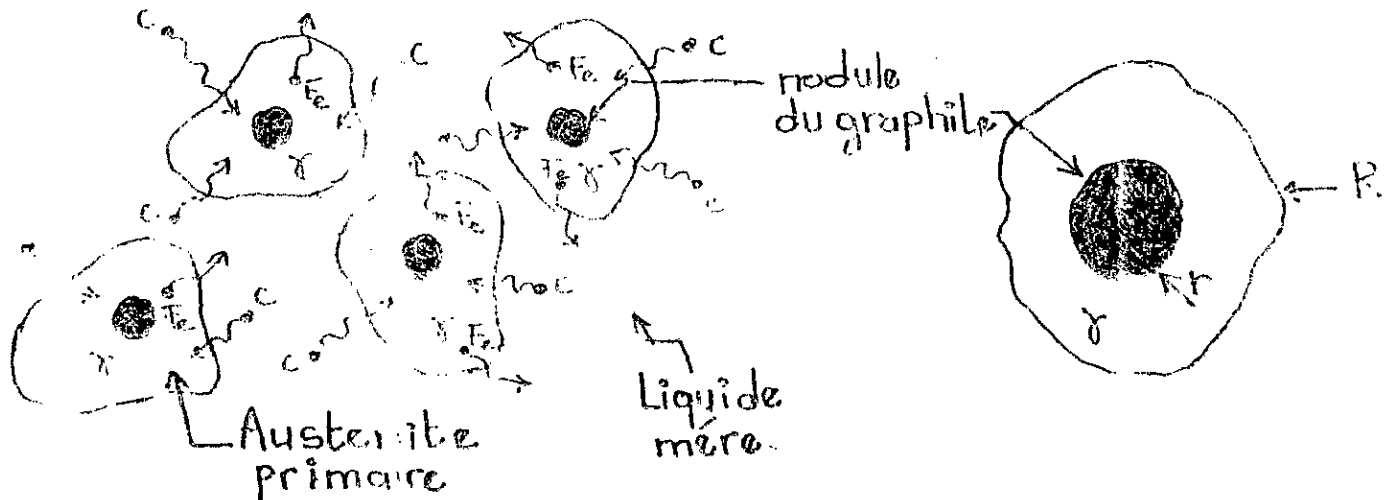


Fig 1.9- Formation du graphite sphéroïdal

6- CARACTÉRISTIQUES DES FONTES GRISES [10] :

Les caractéristiques des fontes grises ordinaires sont intimement lié à la structure de ces fontes (nature de la matrice, forme et répartition du graphite, ...), laquelle dépend de deux facteurs principaux, analyse chimique d'une part et vitesse de refroidissement d'autre part.

La vitesse de refroidissement d'une fonte dans un moule varie en sens inverse avec l'épaisseur de la pièce, elle dépend aussi de la nature du moule. Pour une composition chimique donnée, la structure obtenue à l'état brut de coulée est constituée de ferrite et de perlite. Si la pièce n'est pas d'épaisseur uniforme, les sections les plus épaisses se refroidissent plus lentement, contiennent plus de ferrite que les sections minces qui sont à prédominance de perlite. La ferrite se présente sous forme d'auréoles entourant les sphéroïdes de graphite. Le reste de la matrice étant constitué de perlite dont les caractéristiques et la dureté dépend de la finesse des lamelles de la perlite.

Bien que les fontes à graphite sphéroïdal possèdent une grande sensibilité à l'épaisseur que les fontes à graphite lamellaire, un certain nombre de phénomènes apparaissent lorsque les pièces de fortes sections se refroidissent lentement dans le moule. Ces phénomènes se traduisent par une diminution plus ou moins sensible des caractéristiques mécaniques qui sont dus :

- à une dégénérescence du graphite sphéroïdal ;
- à une réduction du nombre de sphéroïdes.

On remarquera, si on compare entre la fonte GSC et la fonte GSA (tableau I-2), l'augmentation du taux de pertite implique d'une part une augmentation de la résistance à la traction, la limite élastique et la dureté ; d'autre part une diminution de la résilience et l'allongement.

Nuances	Résistance à la traction da N/mm ²	Liquide élastique da N/mm ²	Allongement %	Résilience daJ/cm ²	Dureté HB	Microstructure
GSC 38-15	38	27	15	1.5	137 - 170	Ferrite-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 I-2 - Caractéristiques des fontes élaborées par l'U.F.R. :

- * Le graphite pour les fontes GS doit être du type VI dimension 5 - 7, selon la norme AFNOR (NF A 32 - 201).
- * Le graphite pour les GL doit être du type IA, dimension 4 à 7.

CHAPITRE II -

*ETUDES ET TECHNIQUES
EXPERIMENTALES*

1- EPROUVETTE EN ESCALIER [11] :

L'obtention des pièces en fonte grise entraîne un problème de graphitisation du carbone. Ceci est dû à la cinétique de refroidissement, qui est importante pour les épaisseurs minces. Pour connaître l'influence de la cinétique de refroidissement sur les différentes épaisseurs, on a conçu un type d'éprouvette en escalier (fig. II-1).

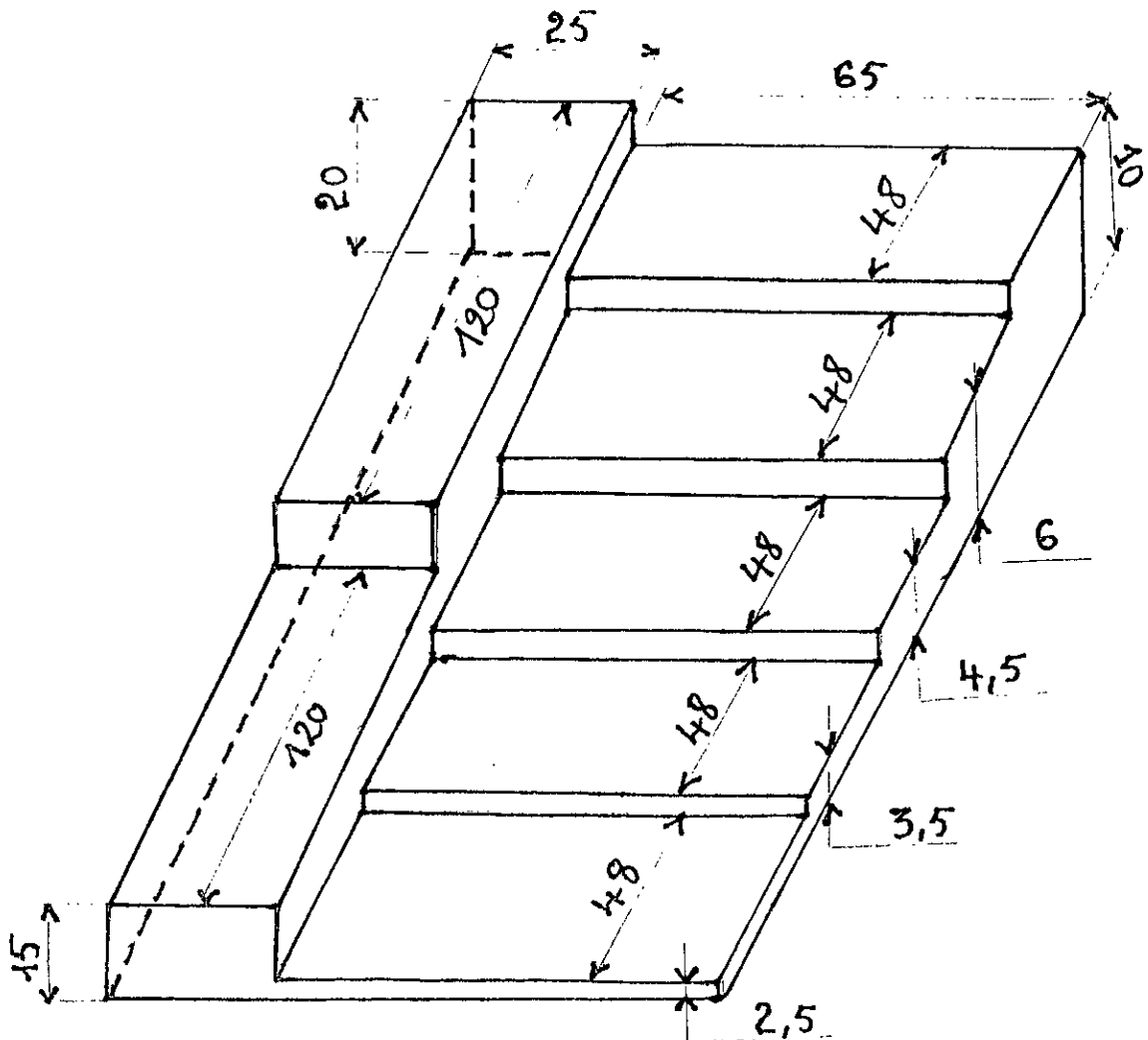


Fig. II.1- Eprouvette "Escalier"

À l'issue de la coulée de la pièce en escalier, les éprouvettes ont été prélevées en tenant compte de la nécessité de réaliser les prélèvements dans la zone centrale de chaque parois de façon à avoir une zone représentative du mode de solidification de l'escalier.

L'étude des vitesses de refroidissement permet de déterminer la forme, les dimensions et l'emplacement des refroidisseurs, pour but de rétablir le mieux possible l'uniformité du refroidissement des pièces.

* **Coulée des éprouvettes (moulage) :** Les pièces échantillons sont coulées à partir des fontes destinées à la production. On doit couler trois pièces échantillons par nuance (GSC 38 - 15, GSA 56 - 5 et Ft 25). Le moule étant en sable constitué de deux châssis, la composition du sable de moulage est :

♦ Sable silicate	80 à 85%.
♦ Argile	10 à 12%.
♦ Noir minéral	3 à 4%.
♦ Liants amylicés	1 à 2%.

Le noir minéral est utilisé pour améliorer l'état de surface des pièces.

L'argile donne une cohésion entre les grains de silice avec la présence de l'humidité.

L'amelace est un liant organique, absorbe une quantité importante d'eau.

2- ESSAI DE RésILIENCE [1] [12] :

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton-pendule dans des conditions définies une éprouvette entaillé en son milieu et reposant sur deux appuis. La caractéristique déterminée est l'énergie absorbée par la rupture exprimée en joules.

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

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

Le mouton éprouvette est composé d'un bâti supportant un pendule et sur lequel sont fixés les supports et appuis de l'éprouvette, et un pendule servant à rompre les éprouvettes.

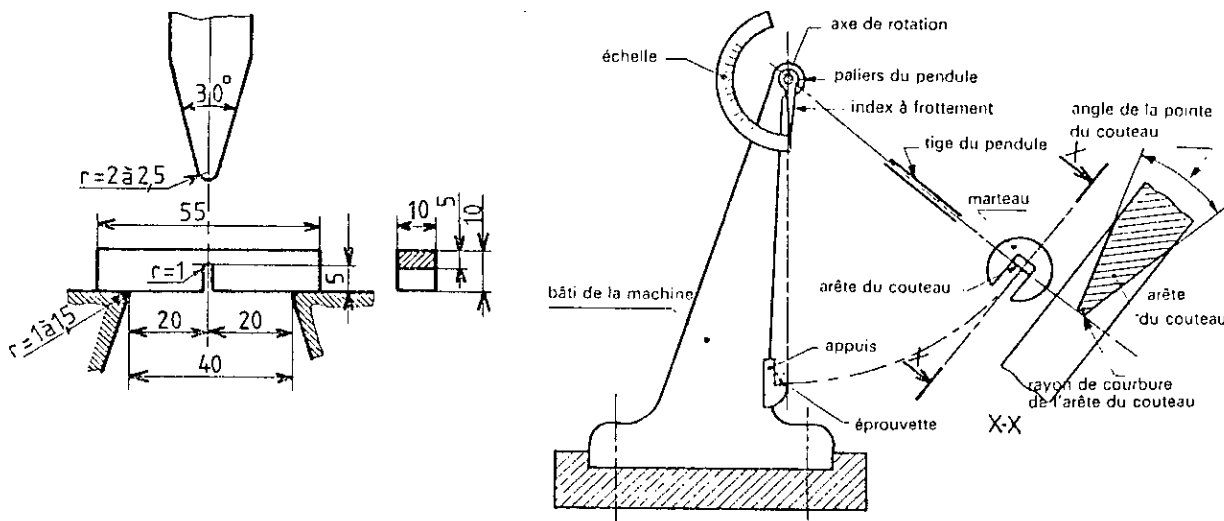


Fig II.2 - Machine et principe de l'essai de résilience

3- L'ESSAI DE DURETÉ [1] [13]:

L'essai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal sous une charge donnée. L'importance de l'empreinte laissée par le pénétrateur à la surface d'un métal constitue le paramètre pris en compte pour le calcul de la dureté. Pour une charge constante, l'empreinte est d'autant plus petite que le métal est dur. L'empreinte est caractérisée soit par sa surface, soit par sa profondeur selon la nature de l'essai de dureté.

La dureté s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte.

$$H = \frac{F}{S}$$

Les essais les plus classiques sont les essais Brinell Vickers et Rockwell. L'essai qu'on utilise dans notre étude est l'essai Brinell.

Le pénétrateur est une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D et sous une charge F . On mesure le diamètre " d " de l'empreinte laissée sur la surface après l'enlèvement de la charge et on aura la dureté comme suit [13] :

$$HB = \frac{0.102 \times 2F}{D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

HB : Dureté Brinell.

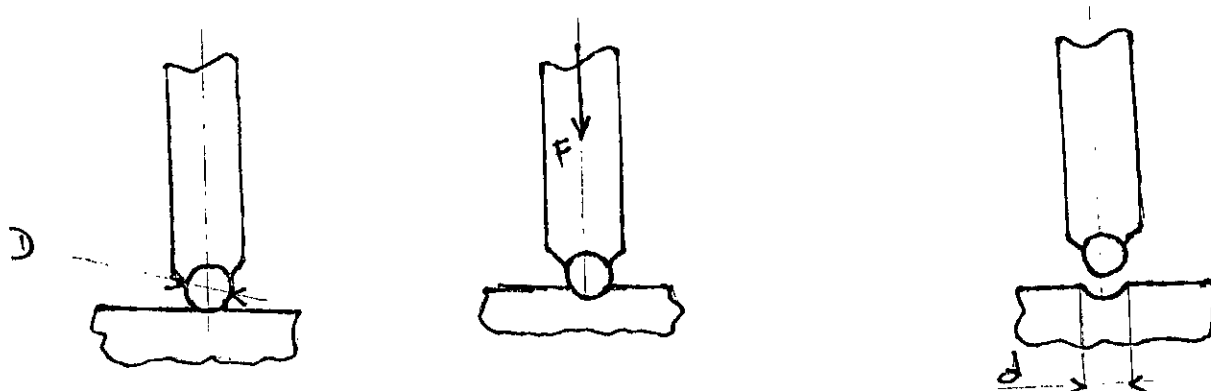


Fig II-3 - Schéma représentatif du principe de l'essai de dureté.

4- ANALYSE QUALITATIVE [14] :

Après la réalisation de l'essai de résilience, on garde une moitié de chaque éprouvette pour l'étude métallographique.

L'obtention de la surface d'examen métallographie nécessite un polissage puis une attaque chimique.

4.1- Polissage :

Après un enrobage des échantillons à l'aide de la résine, on passe au polissage, qui se fait en deux étapes, prépolissage et le polissage fin.

Le prépolissage se fait par frottement des échantillons sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus fine (240, 600, 1000, 1200) d'une durée de 2 à 3 minutes par granulométrie. Il se

fait avec de l'eau afin d'éliminer tout risque d'échauffement de l'échantillon et de laver le papier des grains arrachés.

Le polissage fin consiste à polir l'échantillon sur des disques de feutre imbibés d'une suspension de pâte diamantée répartie à l'aide d'un diluant sur le disque. La granulométrie de la pâte est de 3 à 6 μm .

4.2- Attaque chimique :

L'attaque chimique se fait à l'aide du nital qui se compose de 100 ml d'éthanol et 5 ml d'acide nitrique. L'attaque consiste à contribuer une coloration de certains constituants par rapport à d'autres, elle donne des différences de relief entre les différents constituants ou entre les cristaux différemment orientés d'une même phase, ce qui permet de les observer.

4.3- Examen au microscope :

Après l'attaque chimique, on passe à l'étape essentielle, c'est l'analyse qualitative qui consiste à identifier la nature des différentes phases existant dans la matrice des échantillons et de déterminer leurs proportions.

5- ANALYSE QUANTITATIVE [14] :

Les divers propriétés mécaniques et physico-chimiques d'un alliage dépend de sa structure. 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 et déterminer les relations existantes entre les paramètres de la structure et les grandeurs mécaniques, physiques et chimiques. La structure d'un alliage est généralement constituée de plusieurs phases qui se distinguent par :

- ◆ leurs structures physico-chimiques et leurs caractéristiques mécaniques ;
- ◆ leurs proportions ;
- ◆ leurs formes, leurs tailles ainsi que leurs orientation.

Les mesures de la métallographie quantitative sont pour la plupart de nature statistique. Lorsqu'on applique une de ces méthodes, on suppose que le matériau étudié présente un large domaine dans lequel la structure est effectivement homogène.

5.1- Analyse de forme :

Dans le cas de particules sphériques, la forme est analysée par le taux de sphéroïdisation (cas du graphite). Ce taux est défini par le rapport :

$$T\% = \frac{N_s}{N} \times 100$$

N : Nombre de particules de la micrographie.

N_s : Nombre de particules sphériques.

Pour la structure granulaire, on se limite à décrire la forme moyenne des grains et leurs finesses.

5.2- Analyse de taille :

Soit n_i , le nombre de particules de diamètre d_i de la classe i . On considère cinq classes de diamètre (d_1 le plus faible, d_{10} le plus grand), et on calcule le nombre n_i de particules de chaque classe d_i , puis on trace le tableau II-1.

Classe	d_i	n_i
1	$0 < d_i < d_1$	n_1
...
10	$d_9 < d_i < d_{10}$	n_{10}

Tableau II-1 - Répartition de la taille.

Le diamètre moyen des sections des particules est :

$$d = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i}$$

Un tracés d'histogramme, $n_i = f(d_i)$ donnera la distribution des tailles de grains dans l'échantillon considéré. Le calcul de l'écart type δ de cette distribution est nécessaire pour la connaissance de la concentration de cette distribution.

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum n_i (d_i - d)^2}{\sum n_i}}$$

5.3- 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 noeuds du réseau tombant sur une particule de la phase sur le nombre total des noeuds du réseau.

6- ANALYSE CHIMIQUE [7] :

Cette analyse est effectuée afin de connaître la teneur du magnésium et sa variation en fonction de l'épaisseur (ou en fonction de la vitesse de refroidissement), ainsi que la composition exacte des trois fontes à étudier. Ces analyses se réalisent comme suit:

a- Spectrométrie : C'est la méthode de fluorescence des RX qui consiste à soumettre une médaille de l'échantillon à étudier sous un faisceau à rayon X. Cet échantillon est de 4.5 cm de diamètre et quelque mm d'épaisseur. Il est obtenu par coulée. La projection par des RX nous donne un spectre caractéristique véhiculant des informations sur les teneurs des éléments de la composition chimique. Ce spectre est analysé par un microprocesseur qui nous donnera ensuite les valeurs exactes de la composition chimique.

b- Analyse du carbone : On utilise cette méthode pour calculer la teneur en carbone une composition donnée. Elle consiste à introduire une quantité de copeaux du matériau à étudier sous un courant d'O₂ dans un four à induction. Le principe de calcul se base sur le dégagement du CO₂ résultant de l'oxydation du carbone existant dans ces copeaux.

On a réalisé ces analyses pour la détermination des compositions chimiques exactes des trois fontes utilisées pour la coulée des éprouvettes. Ces tableaux sont résumées au tableau 1-1.

Eléments	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Cu%	Mg%
GSA	3,45	3,07	0,73	0,020	0,060	0,03	0,043
GSC	3,51	2,98	0,32	0,017	0,057	0,02	0,039
Ft 25	3,05	2,47	0,48	0,014	0,042	0,85	-

Tableau II- : Analyse chimique

CHAPITRE III -

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

1- MORPHOLOGIE DU GRAPHITE [15] , [16] :

Par analyse quantitative et qualitative des micrographies des échantillons, la morphologie du graphite peut être mise en évidence par référence à la norme NF A 32-100. Les résultats de ces analyses sont résumés sur le tableau III.1.

Epaisseur en mm		2.5	3.5	4.5	6	10	15	20
GSC	Forme du graphite	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI
	Répartition	E	E	E	E	C	C	C
	Indice de dimension	8 - 7	8 - 7	7	7 - 6	6	5 - 6	5
GSA	Forme du graphite	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI
	Répartition	E	E	E	E	E	E	
	Indice de dimension	8 - 7	7	7 - 6	6	6	6 - 5	5
Ft25	Forme du graphite		III	I - II	I - II	I - II	I - II	I
	Répartition		C	C-B	B	A-B	A-B	A
	Indice de dimension		6	5	5	5 - 4	5 - 4	3

Tableau III-1 : Morphologie du graphite

Le graphite pour les fontes GSC et GSA est sphéroïdal (forme VI), de répartition E sur les faibles épaisseurs. On trouve également la taille des sphéroïdes peu dispersée. Mais sur les grandes épaisseurs de 20 mm pour la GSA et de 10 à 20 mm pour la GSC, on a la répartition C et la taille est dispersée, où le diamètre est de 1 à 10 mm.

Les dimensions données sur le tableau III.1 sont déduites par comparaison avec les images types et sur le tableau III.2 par mesure directe sur les micrographies. Les dimensions du graphite croient avec l'augmentation de l'épaisseur.

Epaisseur en mm		2.5	3.5	4.5	6	10	15	20
GSC	Diamètre moyen (mm) sur photo	3.08	3.39	3.42	3.93	4.10	4.62	4.76
	Diamètre moyen réel (μm)	10.8	11.9	12.0	13.8	14.4	16.2	16.7
	Ecart type δ (μm)	7.26	8.19	8.4	9.06	9.78	10.9	13.3
GSA	Diamètre moyen (mm) sur photo	3.39	3.73	4.31	4.61	4.67	4.87	5.01
	Diamètre moyen réel (μm)	11.9	13.1	15.4	16.2	16.4	17.1	17.6
	Ecart type δ (μm)	7.41	8.04	9.66	11.1	11.3	11.9	12.7

Tableau III-2 : Variation du diamètre moyen en fonction de l'épaisseur

Le diamètre moyen est calculé à partir d'un ensemble de diamètres d correspondant à des ensembles de sphéroïdes n_i . Les figures III-1, III-2, III-3, III-4 montrent que la distribution de la taille du graphite a une forme de cloche ; cela est dû au fait que la plus part des sphéroïdes ont une taille proche à la taille moyenne. L'écart type δ de la taille moyenne de nodules du graphite a été calculé sur la base de quatre micrographies (tableau II.2).

On a pour les deux fontes GSC et GSA une diminution de la densité de sphéroïdes qui varient inversement avec l'épaisseur (figures III-5 à III-13).

† Pour la fonte Ft 25, l'observation micrographique des échantillons révèle une multitude de morphologie du graphite, et qui sont présentées sur le tableau III-1, où on a un passage de la forme III (graphite punctiforme) sur l'épaisseur 3.5 mm vers un mélange de la forme II (graphite en rosette) et la forme I (graphite lamellaire) sur les épaisseurs de 4.5 mm à 15 mm. Sur l'épaisseur de 20 mm, on a la présence seulement du graphite lamellaire (forme I).

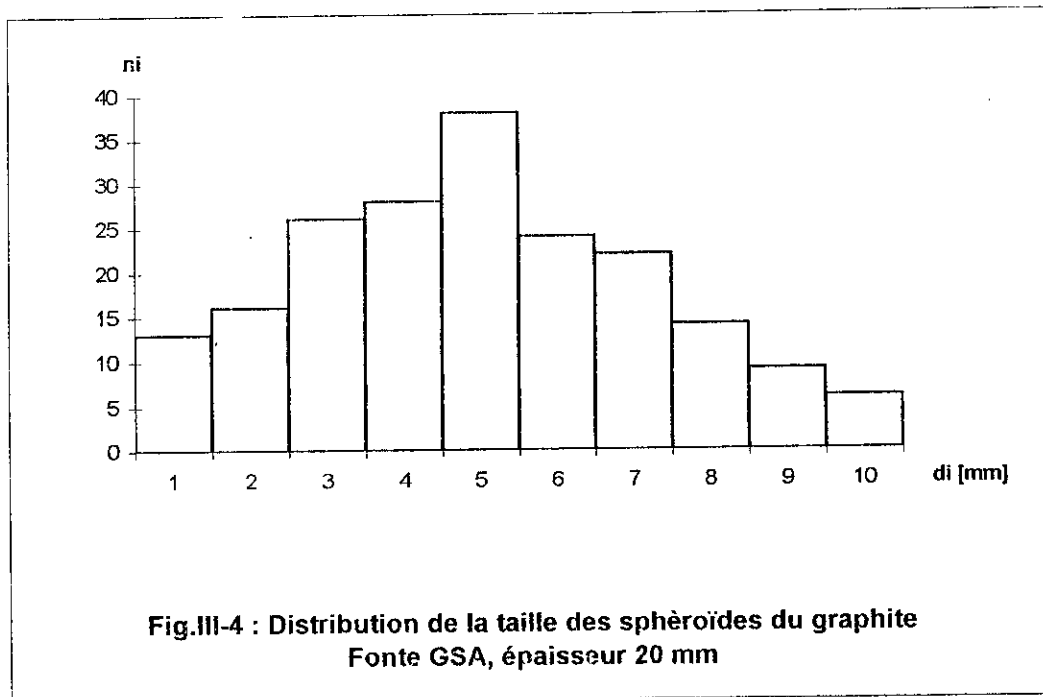
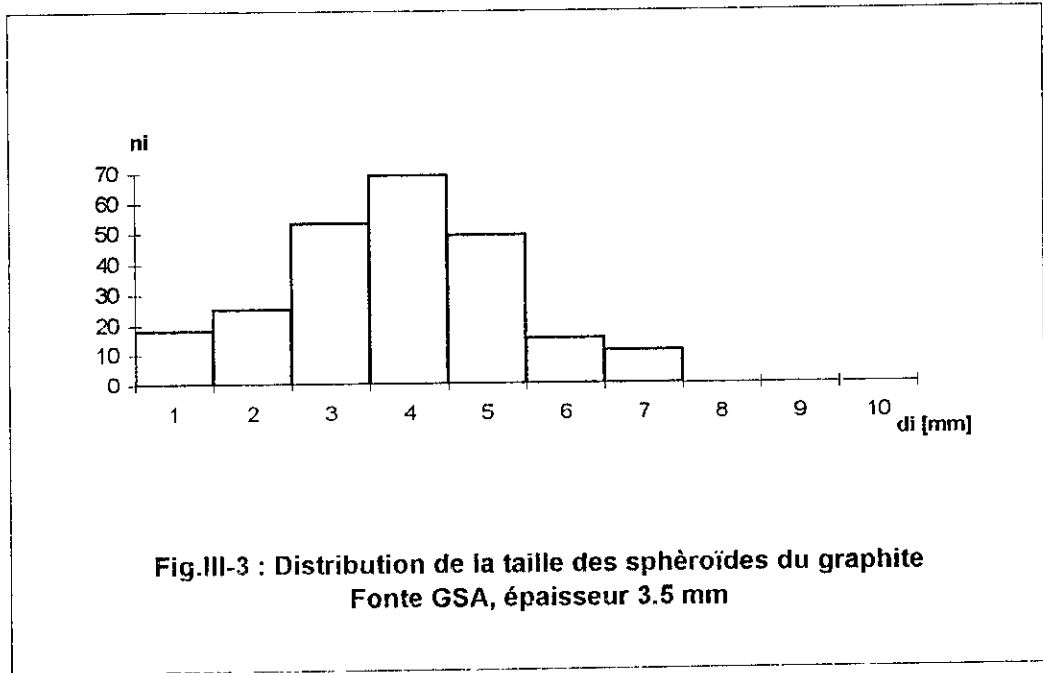
La répartition du graphite varie de la répartition C pour l'épaisseur 3.5 mm à la répartition A sur l'épaisseur de 20 mm, en passant par un mélange de C et B pour l'épaisseur de 4.5 mm et par un mélange de B et A pour les épaisseurs 10 et 15 mm.

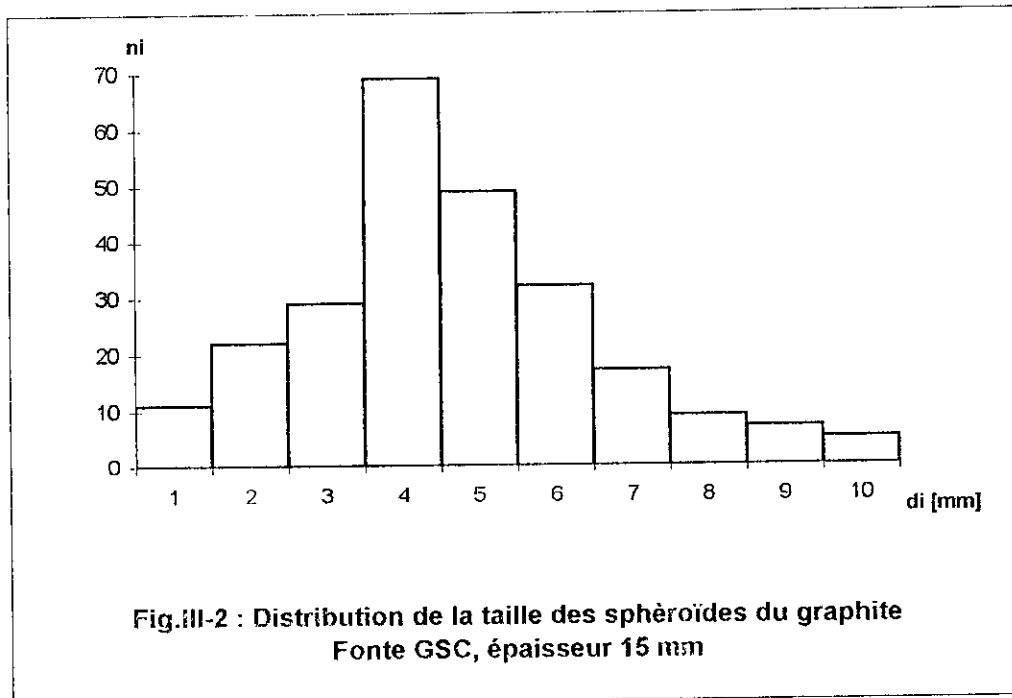
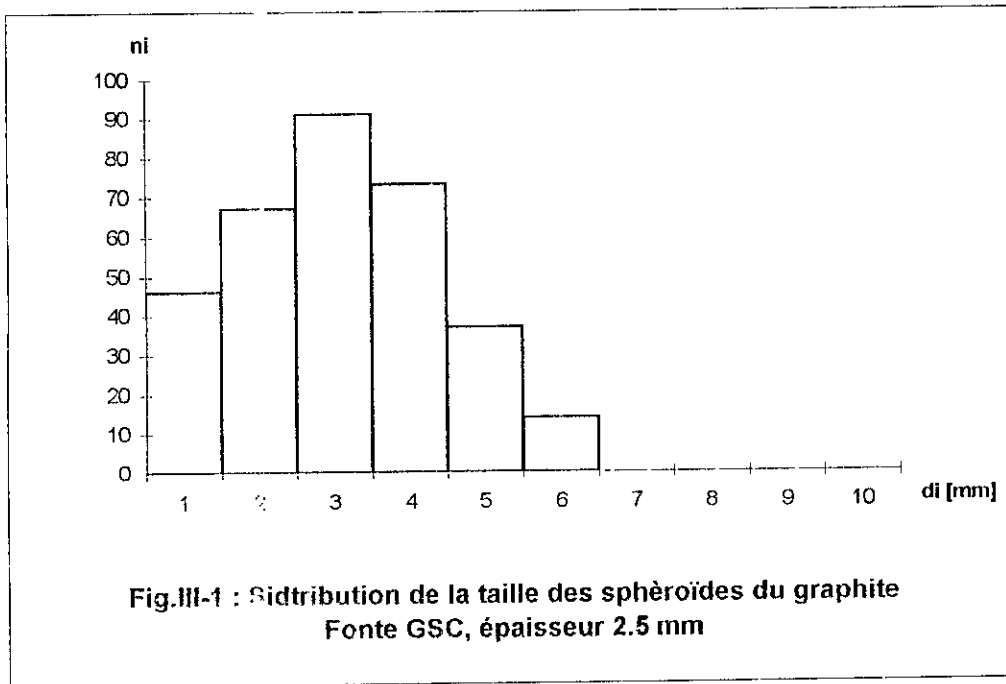
Comme les sphéroïdes, les lamelles du graphite deviennent de plus en plus larges, plus longues et plus épaisses à mesure que l'on se rapproche vers les grandes épaisseurs et au contraire sont plus fines et serrées pour les petites épaisseurs. Leurs dimensions donc varient proportionnellement avec l'épaisseur des échantillons et varient inversement avec leurs densité (fig. III-14, III-19).

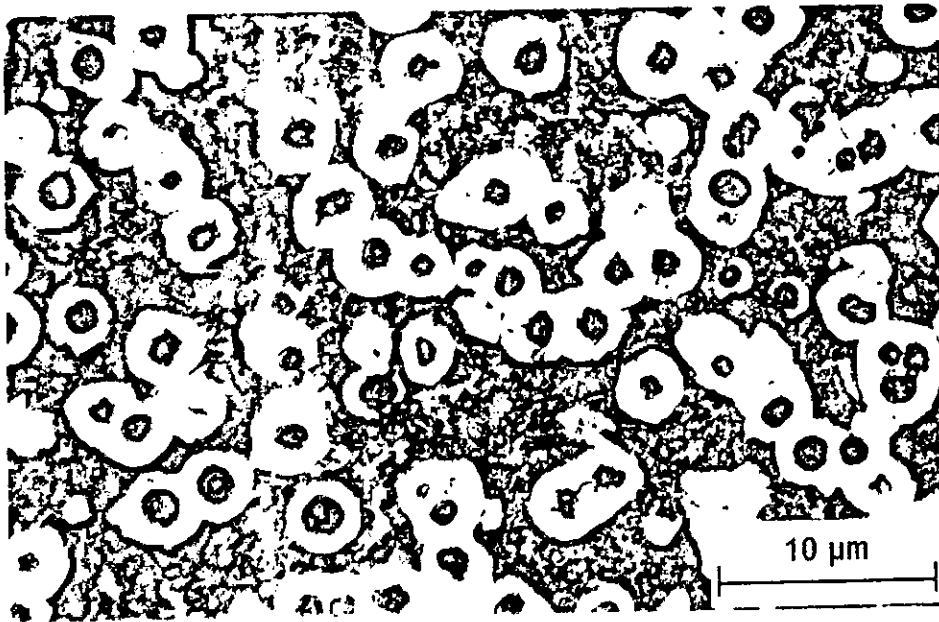
Interprétation :

Les dimensions du graphite (lamelles ou sphéroïdes) croient avec l'épaisseur, cela est dû à la vitesse de refroidissement. Etant donné que la croissance des germes du graphite est contrôlée essentiellement par la diffusion du carbone, les grains seront plus grands que la durée de transformation est élevée.

Sur les échantillons C de petites épaisseurs, on a remarqué que le nombre des grains est plus élevée que sur les grandes épaisseurs. Cette évolution résulte de l'effet inoculant du sable de moulage en plus des métaux d'inoculation, et à cet effet aussi la fonte Ft 25 présente une variation de forme et de répartition.







FigIII- 5 : Fonte GSC, épaisseur 2.5 mm.
Brut de coulée.
Forme VI, répartition E, dimension 8-7.



Fig III-6 : Fonte GSC, épaisseur 6 mm .
Brut de coulée.
Forme VI, répartition E, dimension 7-6.



Fig III-7 : Fonte GSC, épaisseur 20 mm .
Brut de coulée.
Forme VI, répartition C, dimension 5.

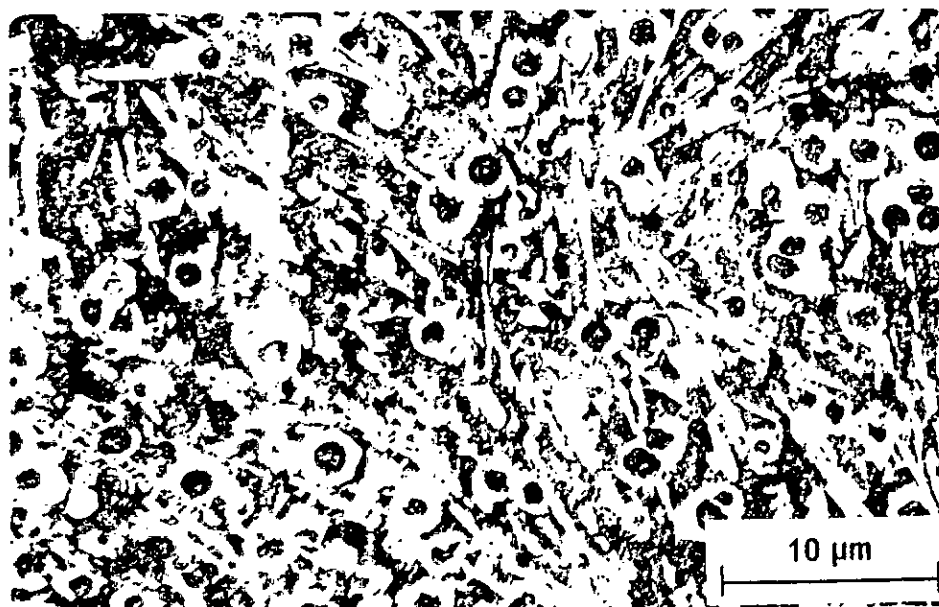


Fig III-8 : Fonte GSA, épaisseur 2.5 mm .
Brut de coulée.
Forme VI, répartition E, dimension 8-7.

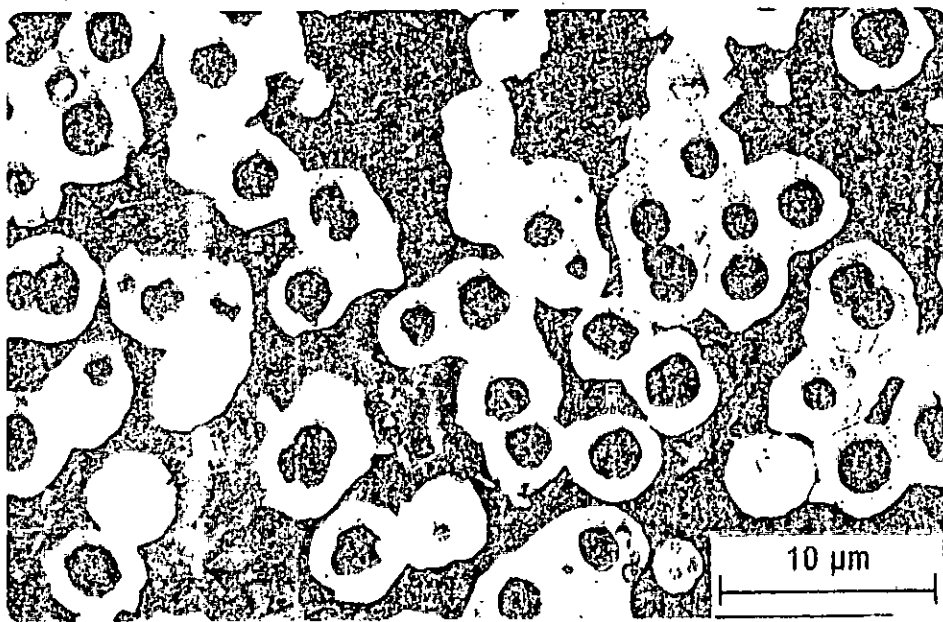


Fig III-9 : Fonte GSA, épaisseur 6 mm .
Brut de coulée.
Forme VI, répartition E, dimension 6.

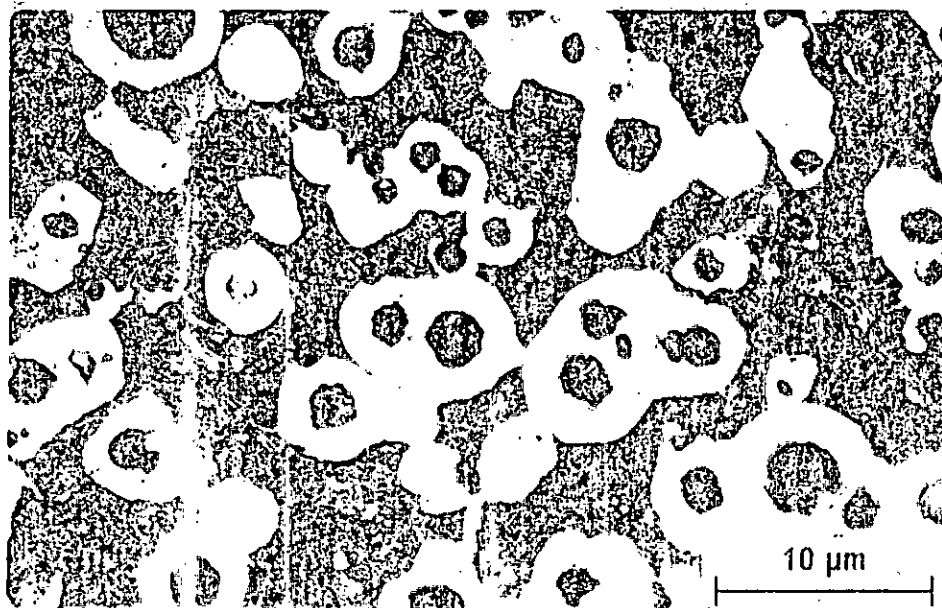


Fig III-10 : Fonte GSA, épaisseur 20 mm .
Brut de coulée.
Forme VI, répartition C, dimension 5.

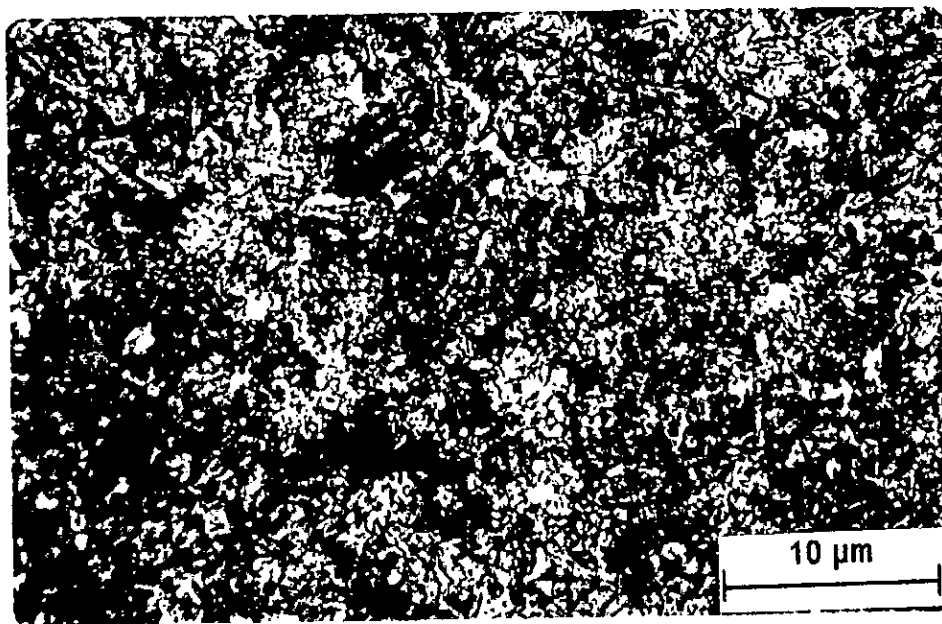


Fig III-11 : Fonte Ft 25, épaisseur 2.5 mm .
Brut de coulée, avec attaque.
Forme III, répartition C, dimension 6.

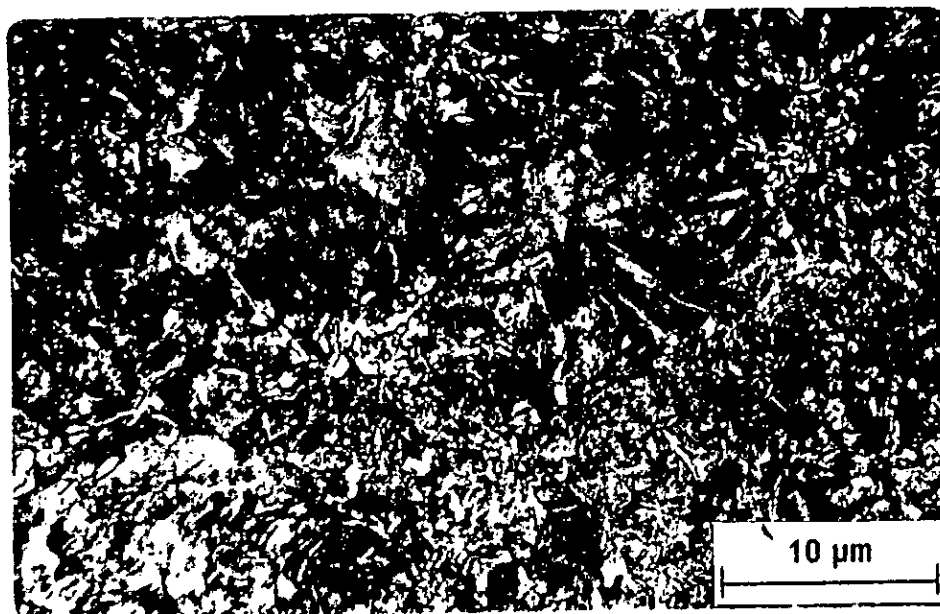


Fig III-12 : Fonte Ft 25, épaisseur 6 mm .
Brut de coulée, avec attaque.
Forme I-II, répartition B, dimension 5.



Fig III-13 : Fonte Ft 25, épaisseur 20 mm.
Brut de coulée, avec attaque.
Forme I, répartition A, dimension 3.

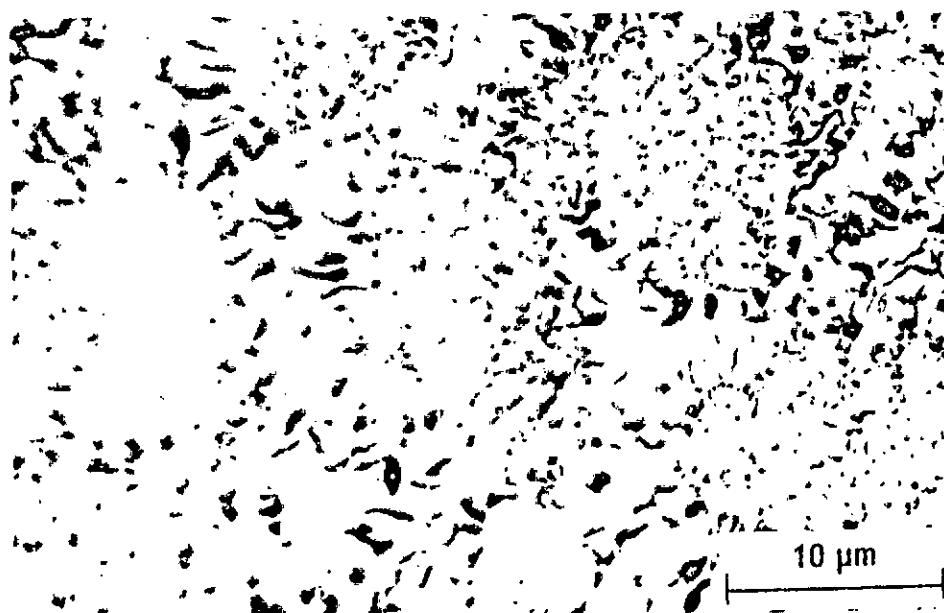


Fig III-14 : Fonte Ft 25, épaisseur 3.5 mm.
Brut de coulée, sans attaque.
Forme III, répartition C, dimension 6.



Fig III-15 : Fonte Ft 25, épaisseur 4.5 mm .
Brut de coulée, sans attaque.
Forme I-2, répartition C-B, dimension 5.

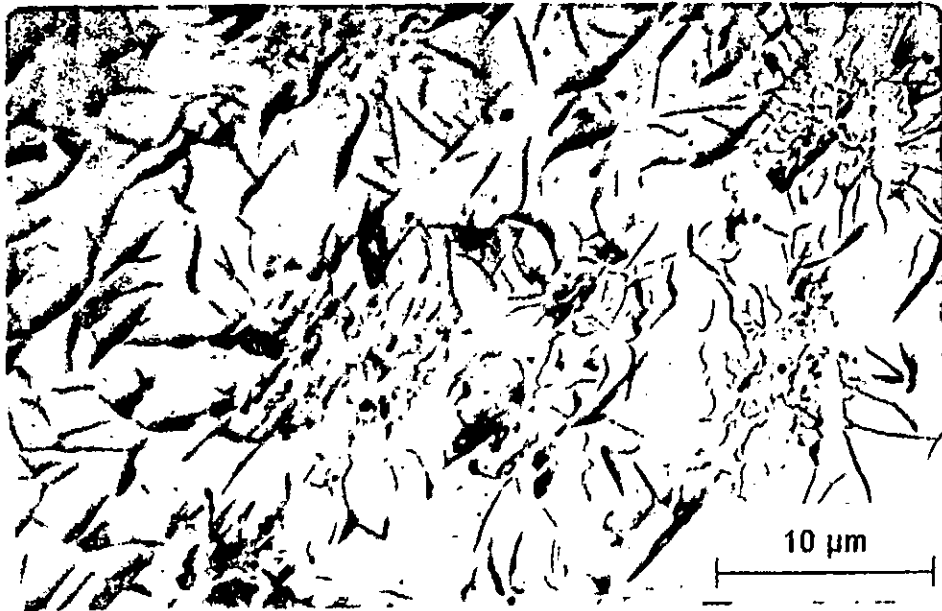


Fig III-16 : Fonte Ft 25, épaisseur 6 mm .
Brut de coulée, sans attaque.
Forme I-II, répartition B, dimension 5 .



Fig III-17 : Fonte Ft 25, épaisseur 10 mm .
Brut de coulée, sans attaque.
Forme I-II, répartition A-B, dimension 5-4.

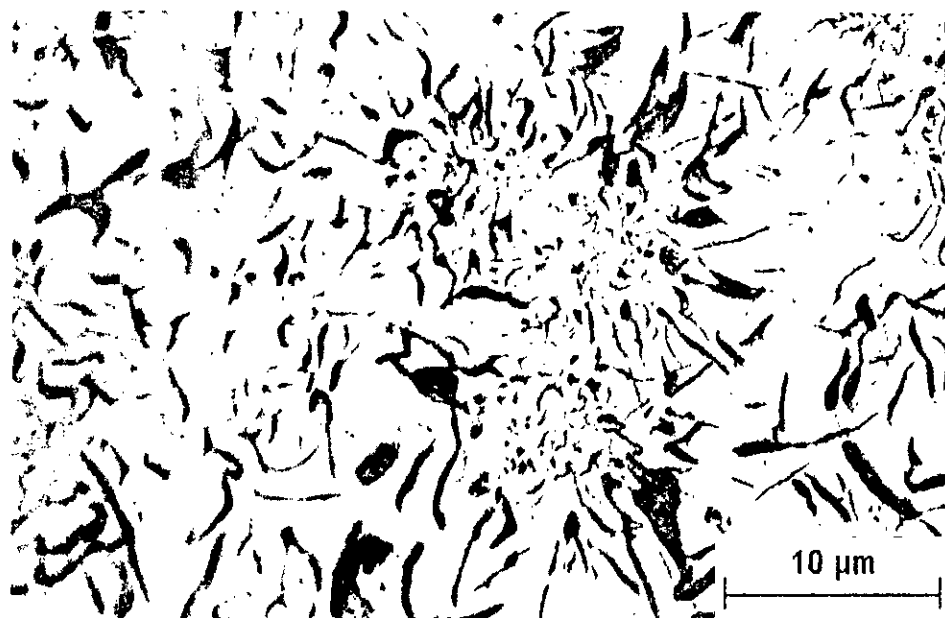


Fig III-18 : Fonte Ft 25, épaisseur 15 mm .
Brut de coulée, sans attaque.
Forme I-II, répartition A-B, dimension 5-4 .

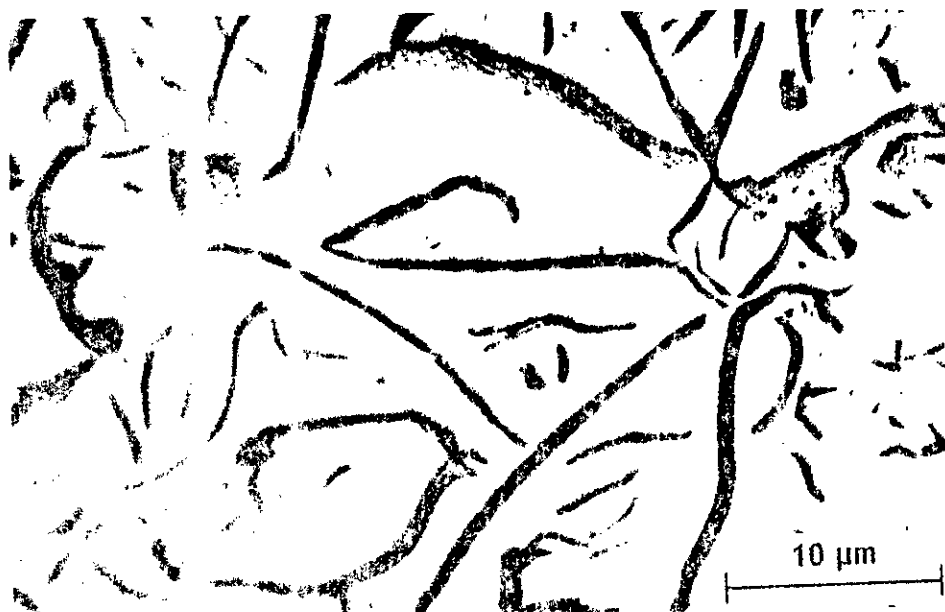


Fig III-19 : Fonte Ft 25, épaisseur 20 mm.
Brut de coulée, sans attaque.
Forme I, répartition A, dimension 3.

2- ANALYSE DE MATRICE [15] , [16] :

La matrice des trois fontes est ferrito-perlitique; de prédominance perlitique, mais sur les différentes épaisseurs, il y a augmentation du taux de ferrite accompagné d'une diminution en perlite (fig. III-5 à III-19). Pour la fonte GSA, épaisseur 2.5 mm, on remarque la présence des carbures qui disparaissent des autres épaisseurs.

La diminution du taux de perlite et la disparition des carbures est dû au fait qu'une vitesse de refroidissement faible favorise la cristallisation du carbone sous forme de graphite (germination puis croissance par diffusion), d'où l'appauvrissement de la matrice de plus en plus en carbone et sera au plus tard le siège de la transformation de l'austénité à la ferrite. Il est à noter que cette ferrite est sous forme d'auréoles entourant les sphéroïdes du graphite dans les fontes GSC et GSA. Donc augmentation du taux de ferrite avec la diminution de la vitesse de refroidissement.

Sur les petites épaisseurs, on a plus de germes qui prennent naissance dans le liquide, mais sous l'effet de la vitesse de refroidissement, la croissance sera stoppée après une durée proportionnelle à l'épaisseur. Le carbone se cristallisera beaucoup plus sous forme de cémentite en lamelles alternées avec la ferrite pour donner de la perlite.

L'évolution des phases de la matrice (perlite et ferrite) et le graphite sont résumés sur les figures III-20 à III-22, sous forme d'histogrammes, pourcentages de chaque phase en fonction de l'épaisseur.

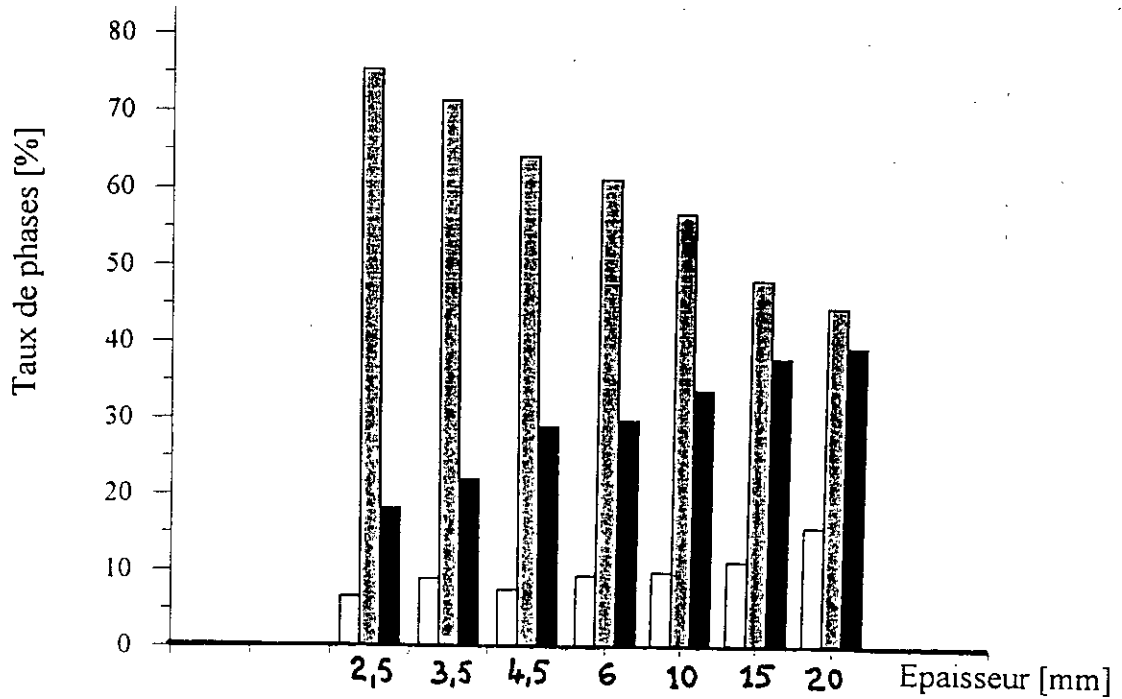


Figure III-20: Distribution des phases en fonction de l'épaisseur (GSA)

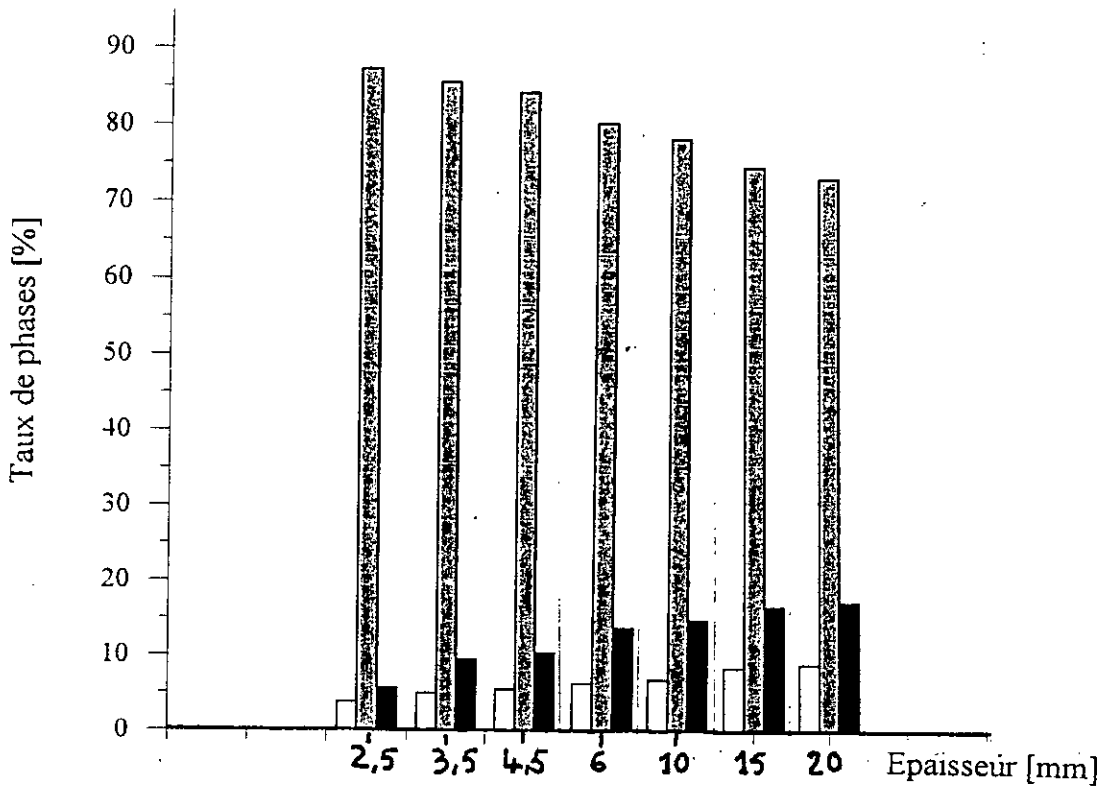


Figure III-21: Distribution des phases en fonction de l'épaisseur (GSC)

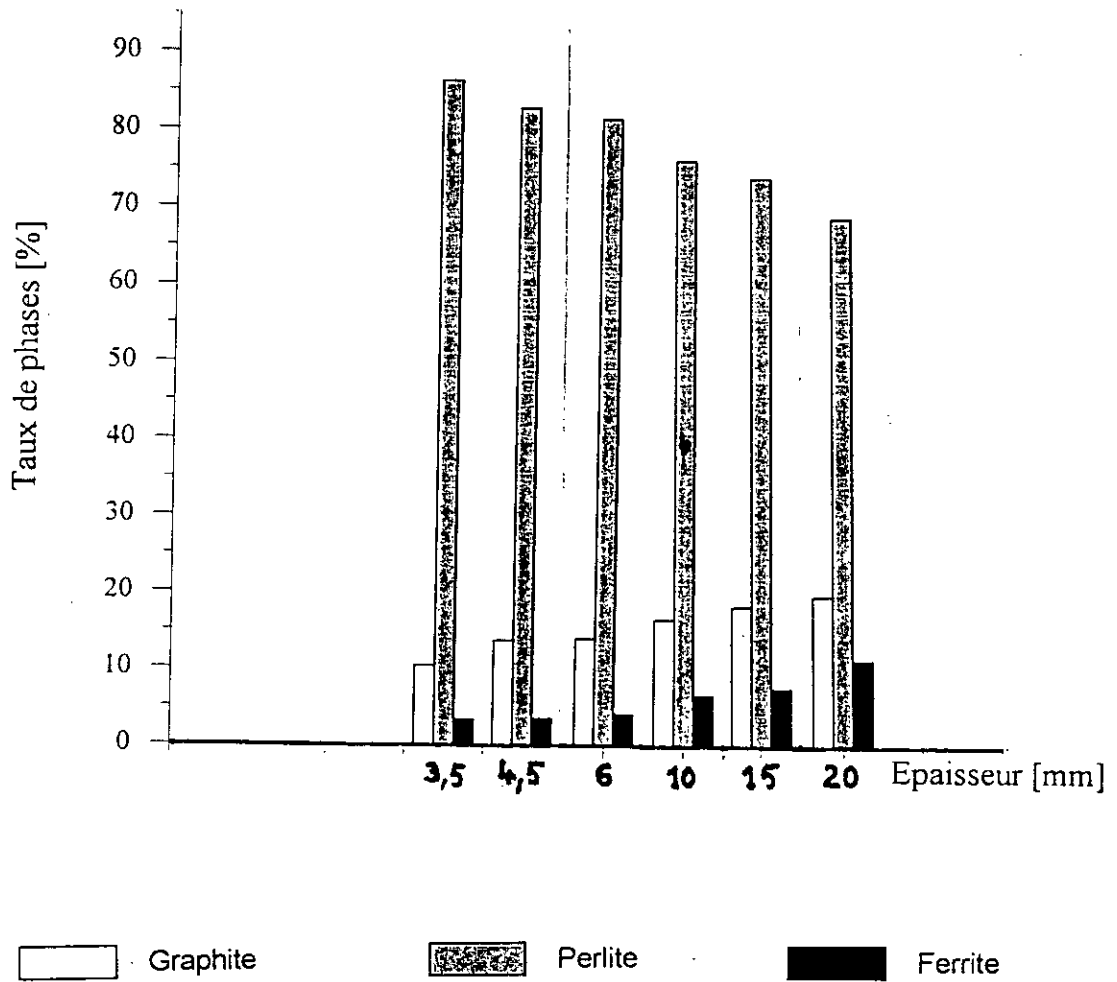


Figure III-22: Distribution des phases en fonction de l'epaisseur (Ft25)

3- INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR SUR LA RÉSILIENCE :

Sur les graphes donnant les variations de la résilience en fonction de l'épaisseur des éprouvettes, on constate que la résilience varie inversement avec la vitesse de refroidissement.

Pour les fontes GSC et GSA, respectivement figures III-23 et III-24, l'augmentation de la résilience peut être traduite par la diminution de la perlite qui est une phase dure dans la matrice de ces fontes d'une part et l'augmentation du taux de ferrite et du graphite d'autre part. Donc l'augmentation de la résilience est causée par la diminution de la vitesse de refroidissement pour les grandes épaisseurs.

L'interpolation des courbes de résilience par le logiciel grapheur sous windows a donné les équations suivantes :

* fonte GSC, équation binomiale :

$$K = -0,0023 e^2 + 0,7115 e + 1,4471$$

* fonte GSA, équation binomiale :

$$K = -0,0637 e^2 + 1,0049 e + 1,3051$$

Pour la fonte Ft25 en fonction de l'augmentation de l'épaisseur, on a aussi une diminution du taux de perlite et une augmentation de ferrite et les lamelles du graphite deviennent de plus en plus épaisses et longues, d'où elles deviennent des sources de concentration de contraintes à leurs extrémités pointues, donc on aura un effet d'entaille de plus en plus important et la rupture se propagera aisément de lamelle en lamelle. Cela explique la diminution de la résilience en fonction de l'épaisseur (fig. III-25).

Par interpolation aussi, on a obtenu l'équation logarithmique suivante :

$$\text{Log } K = -0,282096 \log e - 0,205851$$

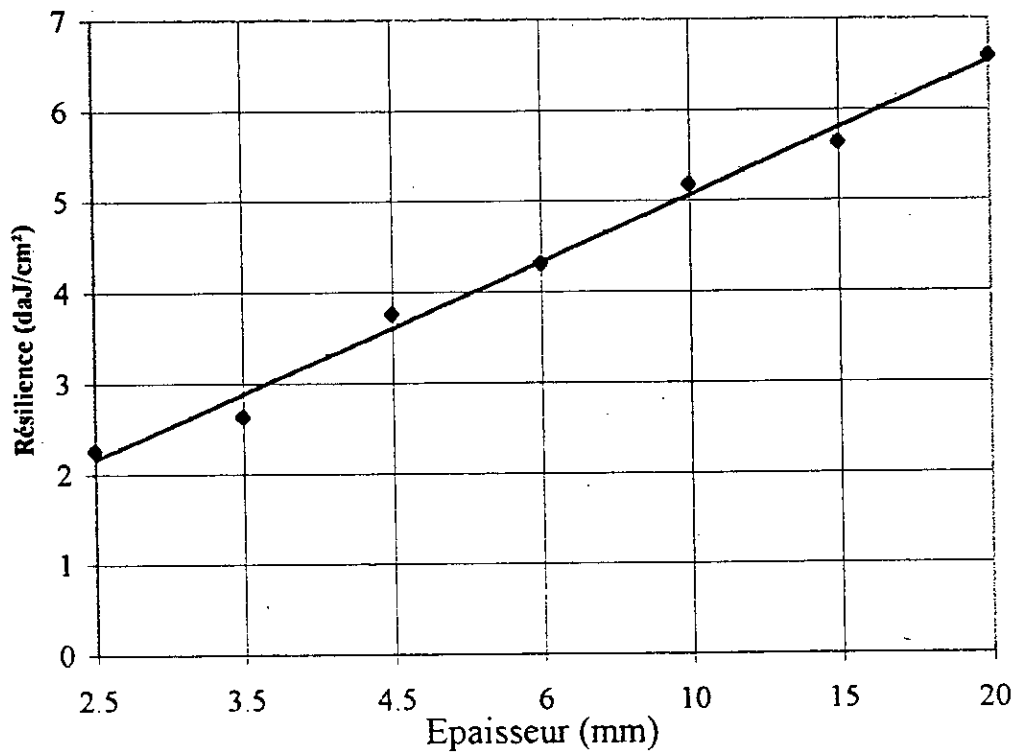
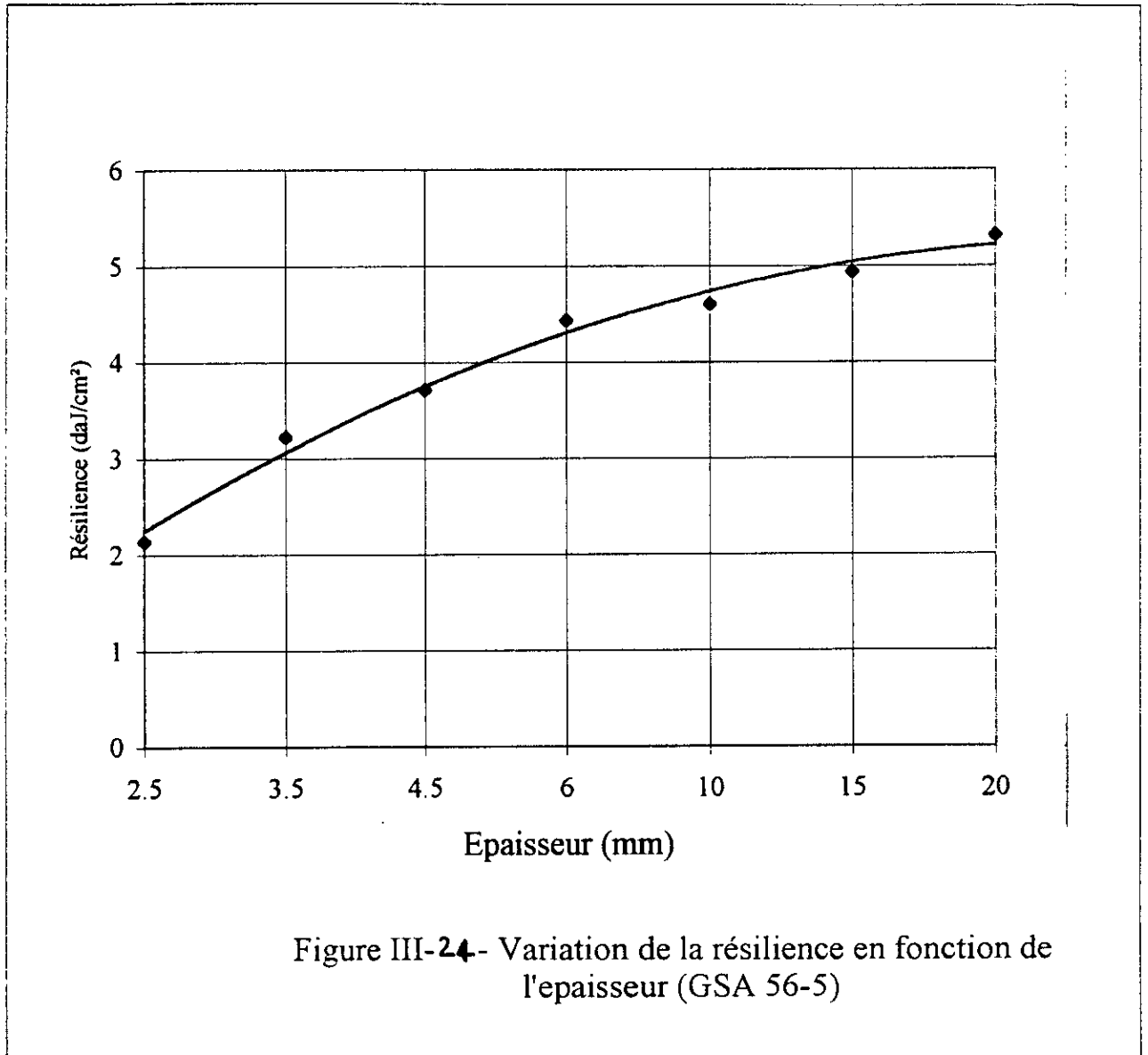
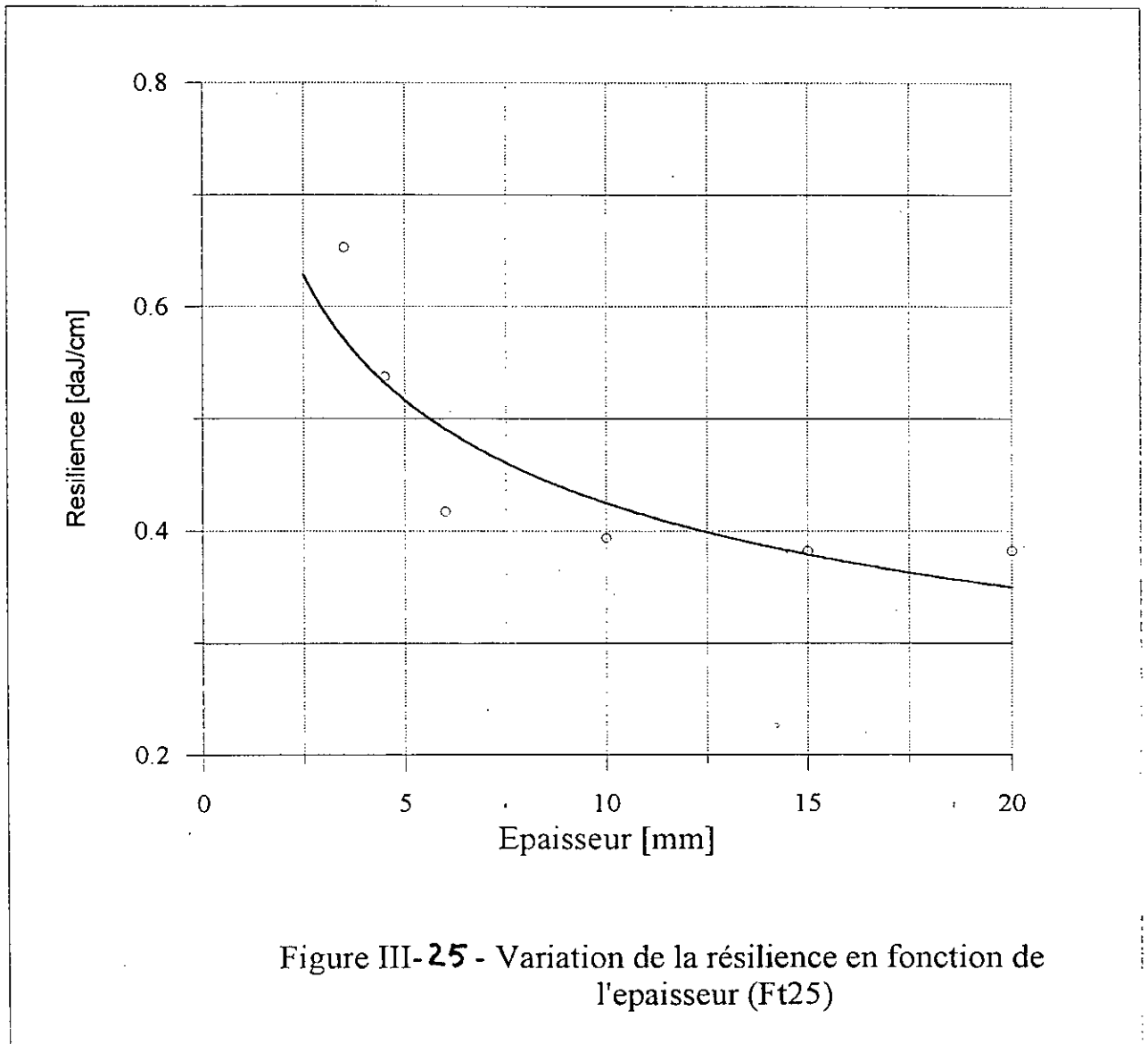


Figure III-23 -Variation de la résilience en fonction de l'épaisseur (GSC 38-15)





4- INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR SUR LA DURETÉ :

L'allure des courbes donnant les variations de la dureté HB en fonction de l'épaisseur montrent qu'à l'état brut de coulée cette dureté diminue avec l'augmentation de l'épaisseur qui se traduit par la diminution de la vitesse de refroidissement et à la diminution du taux de perlite.

La dureté des fontes, comme la résilience est aussi fonction de la composition chimique. Pour une même épaisseur, on a la dureté H qui croît comme suit : H_{GSC} , H_{F125} , H_{GSA} : La fonte GSA présente la dureté la plus grande.

L'allure des courbes $HB = f(e)$ des fig. III.26, 27 et 28 est représenté par les équations logarithmiques ci-dessous :

* Fonte GSC :

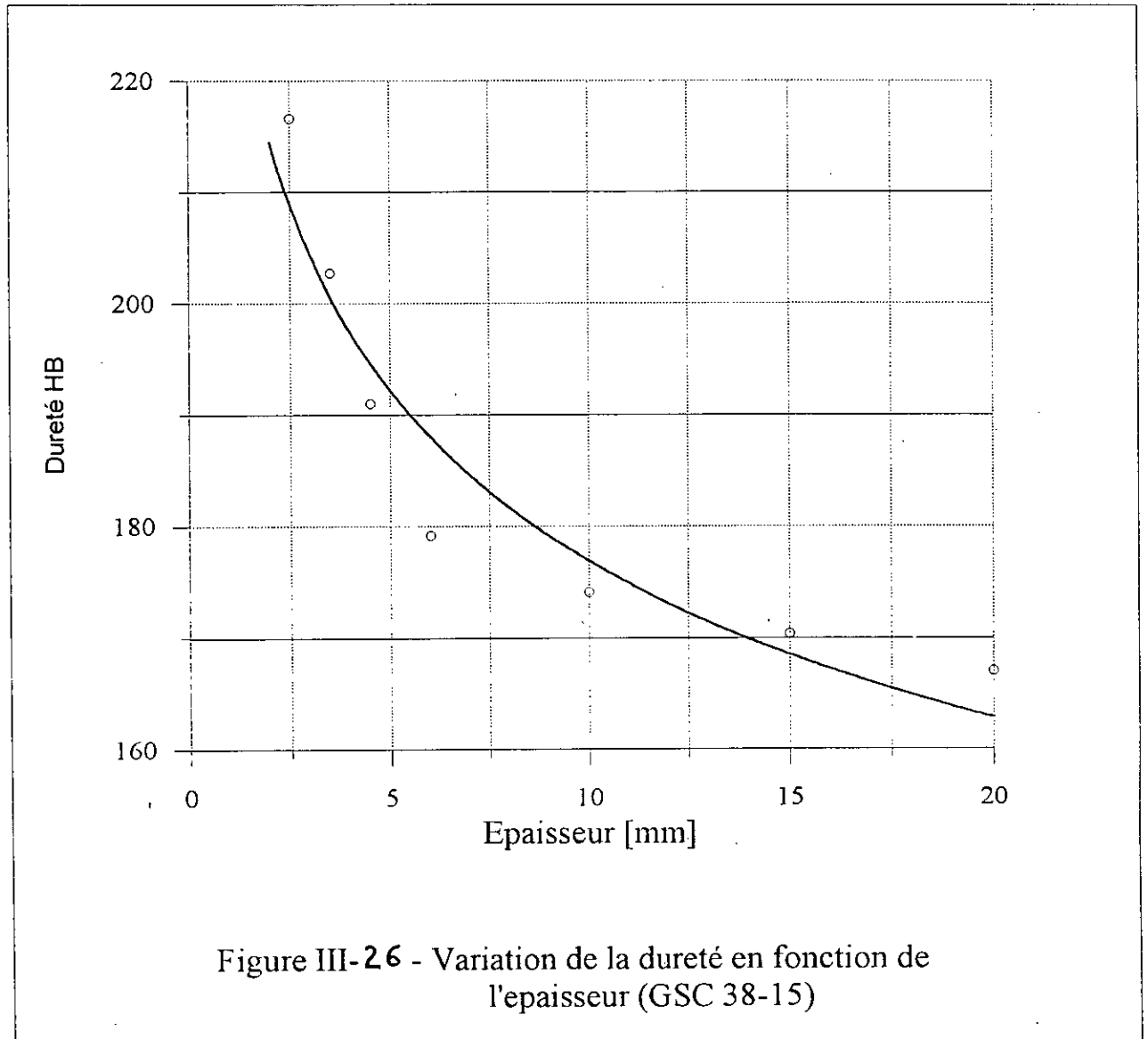
$$\text{Log HB} = -0,12 \text{Log } e + 5,4511 \quad \text{fig III-26}$$

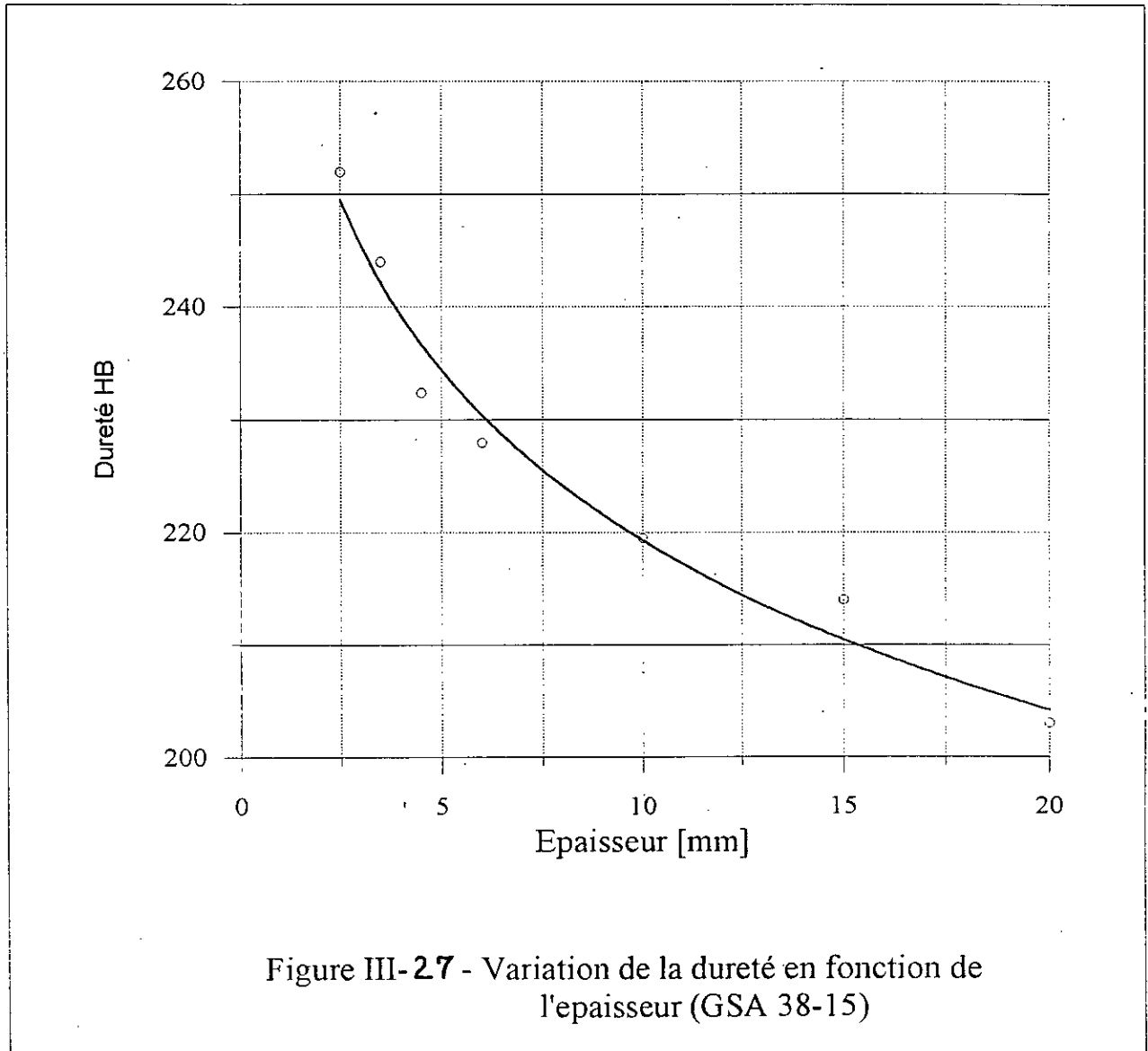
* Fonte GSA :

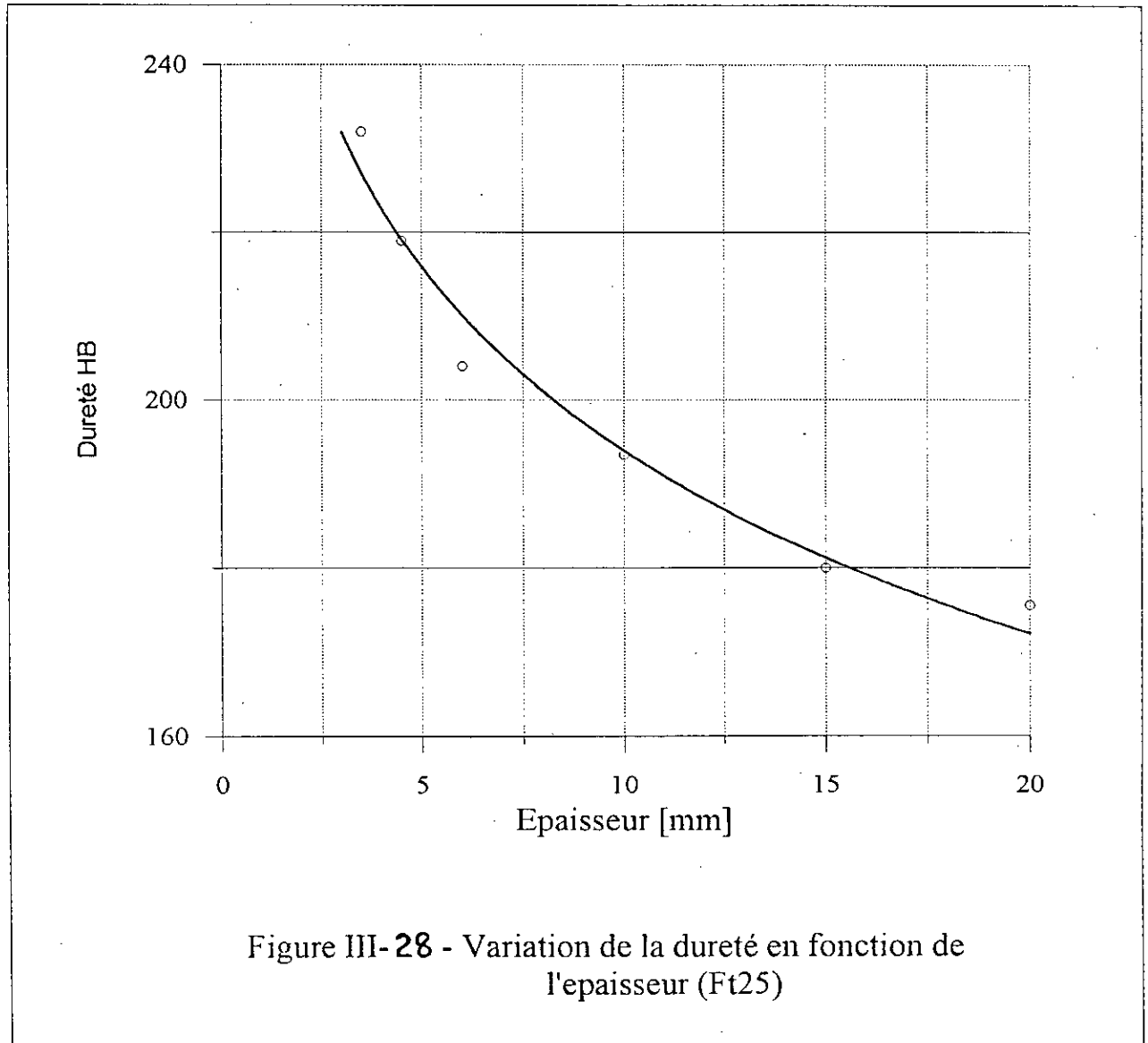
$$\text{HB} = -21,8024 \text{Log } e + 269,515 \quad \text{fig III-27}$$

* Fonte Ft 25 :

$$\text{HB} = -31,5285 \text{Log } e + 266,64 \quad \text{fig III-28}$$







Conclusion

Notre étude nous a permis de mettre en évidence la répartition, la forme et la dimension du graphite à l'état brut de coulée d'une éprouvette en escalier.

Les graphites des fontes GS appartiennent à la forme de type VI (sphéroïdal) quelque soit l'épaisseur; la répartition varie entre E et C et l'indice de dimension varie entre 5 et 8, ceci en fonction des épaisseurs.

Pour ce qui est de la fonte Ft25 la forme varie du type III (punctiforme) au type I (lamellaire), la répartition de C à A et la dimension varie de 3 à 6 en fonction de l'épaisseur.

Pour les fontes GSC et GSA la dimension moyenne des nodules du graphite varie successivement de $1,13\mu\text{m}$ à $1,70\mu\text{m}$ et de $1,20\mu\text{m}$ à $1,97\mu\text{m}$ en fonction des épaisseurs. Pour ce qui est de l'état structural de la matrice on constate que la fonte GSC est de type ferrito-perlitique mais le taux de ferrite augmente en fonction de l'épaisseur. Pour la fonte GSA, la structure présente la lédéburite + cémentite + perlite aux faibles épaisseurs puis, de structure perlite+ferrite au de la de 6mm d'épaisseur.

La Ft25 présente une variation du taux de ferrite en fonction de l'épaisseur. Une analyse quantitative des taux de phases a été effectuée pour chaque épaisseur et pour les trois types de fonte. Un aperçu sur les propriétés mécaniques a été donné par les tracés des courbes $K=f(e)$ et $HB=f(e)$.

Les caractéristiques mécaniques et structurales sont liées non seulement à la composition chimique, mais aussi à la vitesse de refroidissement des pièces et à l'épaisseur des parois des moules. Pour une composition chimique donnée correspond une grande variation des caractéristiques en fonction de l'épaisseur à l'état brut de coulée. Pour réduire cette hétérogénéité structurale il faut placer sur les parois minces des moules, des refroidisseurs afin d'obtenir une meilleur possible l'uniformité de la cinétique de refroidissement des pièces.

Références bibliographiques

- [1] J.Barralis et G.Maider précis de métallurgie
Edition Nathan 1990
- [2] J.Laine Techniques de l'ingénieur
« moulage et fonderie de la fonte » M 760-1
- [3] M.Geier Métallurgie de fonderie
Edition Eyrolles 1978
- [4] A.Roos et B.Milet Précis de métallurgie appliquée
Edition Lavoisier 1982
- [5] AFNOR
« Conception des pièces métalliques moulées »
1993
- [6] Akkou
« Elaboration des fontes GS »
PFE ENP 1992
- [7] N.Meziane et N.Guebli
« Caractérisation des fontes GS de l'UFR et optimisation de leurs
paramètres de recuit »
PFE 1996 USTHB
- [8] A. Brahim
« Etude comparative des caractéristiques pour la substitution de la Ft25
par la FGS 38-15 »
PFE 1996 ENP
- [9] M.Hecht, J.C.Margerie
« Les mémoires scientifiques de la revue de métallurgie »
Mai 1971
- [10] J.C.Margerie Techniques de l'ingénieur
« Caractéristiques des fontes » M 392-3

- [11] R.Roche et G.Murry Traitements thermiques
« l'essai de résilience » N° 168-169 1986.
- [12] J.M.Schissler Homme et fonderie
« Parametres regissant la transition (fonte blanche-fonte grise)
dans le cas d'obtention des pieces à parois minces de fonte GS
brut de coulée »
- [13] Revue de traitements thermiques
« L'essai de dureté » N° 154 - 155 1985
- [14] Benhaddad « étude statistique des caractéristiques des fontes GS »
PFE 1992 ENP
- [15] H.Laplanche Traitement thermique
« sensibilité à l'épaisseur » N° 72 1973
- [16] M.K. Ben chrif S. Hamadache
« Influence de la vitesse de refroidissement sur la structure, le retrait et les
caractéristiques mécaniques des pièces en fonte grise brut de coulée »
PFE 1990 ENP.