

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE METALLURGIE

Projet de Fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat

THEME

**ELABORATION DES FONTES A
GRAPHITE SPHEROIDAL 56-5 BRUT
DE COULEE DE STRUCTURE
PERLITO-FERRITIQUE.**

Proposé par:

UFR

Etudié par:

M. F. KERKAR

Dirigé par:

M. A. KASSER

Promotion 99

ENP 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'ETUDE

Intitulé du projet :

**ELABORATION DES FONTES A GRAPHITE SPHEROÏDALE 56-5 BRUT DE
COULEE DE STRUCTURE PERLITO-FERRITIQUE**

ملخص :

إن حديد الزهر ذو جرافيت مكور مكون من بنية مجهرية مكونة أساسا من الفريت و البرليت .
إن مكونات هذه البنية المجهرية يمكن أن تتغير من حيث الكمية بدلالة المواد الكيميائية المضافة إليها و المعالجات الحرارية .
لقد قمنا في دراستنا هذه باصطناع حديد الزهر ذو جرافيت مكور بإضافة كميات مختلفة من النحاس تتغير من 0,45 إلى 0,83 % .
النتائج المحصل عليها بينت أن كمية الفريت و البارليت تتأثر بتغير كمية النحاس بالإضافة إلى الخصائص الميكانيكية .

مفتاح الكلمات :

حديد الزهر - جرافيت مكور - فريت - برليت - بنية مجهرية - النحاس - المنغناز .

ABSTRACT :

Usually cast iron with spherical graphite has a ferrito-perlitic structure. The proportion of these two phases can easily be modified and controlled by special chemical additions and appropriate heat treatments. In the present study, we have designed spherical graphite cast irons with variable content of copper starting from 0.45 to 0.83%. our results have showed that the volume fraction of ferrite and perlite were very sensitive to the copper content. Similarly, the mechanical properties were found to follow the same pattern since they depend strongly on the microstructure

Key words :

Cast Iron – Spheroidal Graphite – Ferrito-perlitique Structure – Copper – Manganese – Elaboration.

RESUME :

Les fontes à graphite sphéroïdal (G.S) possèdent des structures ferrito-perlitiques. Les proportions de ces deux phases peuvent être modifiée et contrôler par des additions d'éléments chimiques choisis et des traitements thermiques appropriés. Dans la présente étude, nous avons élaboré des fontes (G.S) avec des teneurs en cuivre variants de 0.45 a 0.83%. Nos résultats ont montre que la proportion ferrite perlite est très sensible au pourcentage de cuivre, ainsi que les propriétés mécaniques qui sont le produit directe de la microstructure.

Mots clé :

Fonte -Graphite spheroidale -Structure ferrito-perlitique -Cuivre -Manganèse
-Elaboration.

Dirigé par : A.KASSER

Présenté par : F.KERKAR

PROMOTION : JUIN 99

E.N.P 10, Avenue Hacène BADI EL-HRRACH – ALGER

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon cher grand père Mohamed et mon oncle regretté Ahmed,

- A mes très chers parents;
- A ma sœur et mes frères;
- A toute ma famille;
- A tous mes amis (es).

FOUAD

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement et particulièrement mon promoteur KASSER qui a veillé sur la réalisation de ce travail .

J'exprime ma gratitude envers le Directeur de l'U.F.R, Mr ABDELLAOUI de m'avoir autorisé l'accé à l'unité de fonderie.

Mes chaleureux remerciements au jurés qui ont acceptés de juger mon modeste travail.

Je remercie tous les enseignants du Département de Métallurgie qui ont contribué à ma formation.

Je remercie tous ceux qui, d'une façon ou d'une autre m'ont aidé dans mon travail :
Mr. DRARNI, Mr. ZOUYED, Mr BELKACEM, Mr. MAZARI, Mr. SALAH
et Mr. CHIKHAB.

Ainsi, je tiens à remercier Mr. BENHANICHE et Mr. CHAKER de Laboratoire du Contrôle de GTP ;

Et en particulier toute l'équipe de l'Atelier de Fusion et du Moulage du l'UFR,
et tous ceux qui m'ont aidés a réaliser ce travail.

FOUAD

SOMMAIRE



INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I-1- Introduction.....	2
I-2- Elaboration.....	2
1-2-1 Désulfuration	2
1-2-2 Sphéroïdisation de la fonte (G.S).....	2
1-2-3 Inoculation et poste-inoculation	2
I-3- Constituants et phases des fontes.....	3
a- Ferrite	3
b- Cémentite	3
c- Perlite	3
d- Graphite	3
e- Différents aspects de graphite	4
I-4- Diagramme d'équilibres Fe-C	4
1-4-1 Diagramme d'équilibres fer-cémentite	4
1-4-2 Diagramme d'équilibre fer-graphite	5
I-5- Système fer – carbone – silicium.....	6
I-6- Principaux éléments constitutifs.....	7
I-6-1 Le carbone	7
I-6-2 Le silicium	8
I-6-3 Le manganèse	8
I-6-4 Le soufre	8
I-6-5 Le phosphore	9
I-7- Solidification des fontes à graphites sphéroïdal.....	9
I-7-1 Germination des particules de graphite	12
I-8- Microstructure des fontes à graphite sphéroïdal.....	13
I-9- Influence des éléments d'addition.....	14
I-9-1 Le silicium	14
I-9-2 Le chrome	14
I-9-3 Le nickel	15
I-9-4 Le manganèse	15
I-9-5 Le cuivre	15
I-10- Propriétés mécaniques.....	15
I-11- Principales application des fontes.....	17

CHAPITRE II : PARTIE EXPERIMENTALE

II-1- Introduction.....	18
II-2- But de travail.....	18
II-3- Equipements.....	18
II-4- Elaboration	19
II-5-Preparatoi de la charge.....	20
II-6-Fusion de la charge.....	21
II-7-Maintient et réajustement.....	22
II-8-Traitement de sphéroïdisation	23
II-9-Addition des éléments perlitisants.....	24
II-10-Inoculation et coulée.....	25
II-11-Metallographie.....	27
II-11-1 Préparation des échantillons	27
II-11-2 Le polissage	27
II-11-3 L'attaque chimique	27
II-12-Essai mécaniques destructif	27
II-12-1 Essai de traction	28
II-12-2 Essai de dureté et résilience	28

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATOIN

III-1-Introduction.....	30
III-2-Précipitation du graphite dans les fontes(G.S).....	30
III-3-Influence de cuivre sur le rapport ferrite-perlite.....	31
III-4-Influence du cuivre sur la dureté et la résilience.....	38
III-5-Influence du pourcentage de cuivre sur la résistance a la traction	40
III-6-Influence du pourcentage de cuivre l'allongement... ..	41
III-7-Interpretation des résultats du l'essai B.....	43
III-7-1 Micrographie	43
III-7-2 Caractéristiques mécaniques	43

COCLUSION.....	45
----------------	----

Référence bibliographiques

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE :

Les pièces mécaniques en fonte (G.S) élaborées a l'unité Fonderie de Rouiba (U.F.R) nécessitent souvent un traitement thermique pour améliorer leurs propriétés mécaniques.

Cependant, la grande consommation d'énergie durant ces traitements, fait augmenter le prix de revient unitaire (pour chaque pièce) réduisant ainsi fortement la compétitivité du produit fabriqué sur le marché mondial. On sait que les propriétés mécaniques dépendent principalement de la microstructure, et particulièrement du rapport entre les quantités de ferrite et perlite pour les fontes (G.S). Pour cela nous avons entrepris des études sur l'élaboration de ces fontes en faisant varier le pourcentage du cuivre dans la composition chimique et son influence sur la microstructure obtenue et les propriétés mécaniques qui en résulte.

Cette étude est présentée sous forme de 4 chapitres principaux :

Chapitre I : Partie bibliographique :

Dans ce chapitre nous présentons une étude générale sur l'élaboration des fontes, leurs classifications, leurs propriétés mécaniques, ainsi que les principaux domaines d'utilisation.

Chapitre II : Partie expérimentale :

Ce chapitre explique en détail l'élaboration des fontes (G.S) à l'U.F.R ainsi que les essais expérimentaux que nous avons réalisé dans cette unité. Les techniques de préparation des éprouvettes et la métallographie sont brièvement traitées.

Chapitre III : Partie des résultats et discussion :

Dans ce chapitre, nous rapportons les résultats expérimentaux obtenus ainsi que leurs interprétations à la lumière des travaux réalisés précédemment dans ce domaine.

Nous terminerons nos investigations par une conclusion générale, ainsi que certaines suggestions par des travaux ultérieurs que nous pensons nécessaires pour compléter ce travail.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIE

I-1 INTRODUCTION :

Les fontes à graphite sphéroïdal sont des alliages Fe-C-Si, contenant habituellement plus de 3% de carbone, 1.5 à 4 % de silicium et un certain pourcentage de manganèse. Le phosphore est limité à 0.08% et le soufre à 0.02%. En présence de magnésium, dont la teneur peut varier de 0.02 à 0.10 % et si l'on applique des traitements métallurgiques appropriés, le graphite cristallisé sous forme sphérique [1].

I-2 ELABORATION :

L'élaboration d'une fonte commence en générale par le choix de la composition chimique de base. Ainsi, compte tenu des matières premières disponibles (fontes neuves, ferrailles, ferro-alliages) et des pertes en gains au feu, elle est obtenue à la sortie des fours de fusion et de maintien, avant les traitements complémentaires éventuels sur métal liquide [2].

L'élaboration de la fonte à graphite sphéroïdal consiste en un traitement de sphéroïdisation suivi d'une inoculation au ferro-silicium, d'un bain de fonte à liquide de composition chimique et de pureté bien défini.

Il est nécessaire notamment de désulfurer préalablement le bain si la teneur en soufre est trop élevée supérieur à 0.04% et de le carburer si le pourcentage en carbone est trop bas (inférieur à 3.4%).

I- 2-1 DESULFURATION :

Le principal traitement que subit une fonte à l'état liquide est la désulfuration. Le soufre prouvent en particulier du coke incandescent dans le creuset du cubulat acide, et il se trouve dans la fonte liquide à des teneurs massiques variant de 0.1 à 0.14%. Il peut être éliminé par brassage avec du carbonate de sodium ou du carbure de calcium. Cela se fait directement et d'une façon continu à la sortie de chenal du cubilot, où dans une poche à secousses dont l'utilisateur accroît l'efficacité du traitement.

I-2-2 SPHEROÏDISATION DE LA FONTE (G.S) :

L'obtention de la fonte G.S se fait par un traitement de la fonte liquide au magnésium qui en abaissant la teneur en soufre et en oxygène de la fonte, permet au graphite de prendre la forme sphéroïdal en plus de ça le magnésium augmente ainsi considérablement les caractéristiques mécaniques de la fonte.

La technologie de l'addition du magnésium est dominée par le fait que sa température d'ébullition est de 1090°C. Il faut donc réduire au maximum le contact de ses vapeurs avec l'air [2]. Pour se faire on peut :

- le diluer dans des ferro-alliages divers (alliages sphéroïdants).
- Introduire celui-ci à l'aide d'un plangeur au fond de la poche.
- Le placer au fond d'une poche et le protéger par des tôles ou de la ferraille légère dont la fusion retardera le contact avec la fonte jusqu'au remplissage complet de la poche. Cette technique dite méthode sandwich.

- Utiliser un appareil spécifique tel que le convertisseur George Fisher.
- Immerger dans la fonte un tube d'acier fourré d'alliages sphéroïdisants et déroulé à une vitesse telle que ce dernier, après fusion doit libérer les ferro-magnésium à une profondeur prédéterminée dans la poche.
- Déposer le sphéroïdisant à l'entrée du système de coulée dans le moule en cherchant à assurer l'élimination complète des crasses produites par filtration et décantation successives (procédé in-mold).

I-2-3 INOCULATION ET POST-INOCULATION :

Pour combattre la tendance des fontes à la solidification blanche (fontes lamellaires ou fontes traitées au magnésium) on procède à l'inoculation de produits graphitants (Fe-Si à 75% par exemple).

Cette inoculation peut se faire séparément ou successivement à la poche, dans le jet de coulée ou à l'entrée du système de coulée (post-inoculation) en utilisant des produits en poudre ou sous forme de petits morceaux déposés dans une cavité du canal de coulée [2].

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

a- FERRITE : c'est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer (α). 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- CEMENTITE : c'est une combinaison chimique du fer et du carbone qui peut dissoudre du carbone jusqu'à une concentration de 6.7 % pour former un carbure de fer, Fe₃C, appelé cémentite. C'est une combinaison chimique très dure (HB =600 à 700), inusable aux outils de coupes ordinaires, sa charge de rupture à la traction est élevée : 175 à 200 daN/mm². Son allongement et sa résilience sont très faibles.

c- 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 13% de cémentite, en couches alternées et orientées parallèlement. L'épaisseur entre deux lamelle est inférieure à 10⁻³mm. La teneur en carbone de la perlite est d'environ 0.87 %.

d- 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.

Le graphite joue un rôle lubrifiant, qui explique les qualités de frottement et d'usinabilité généralement bonne des fontes [6].

e- DIFFERENTS ASPECTS DU GRAPHITE [4] :

Ces différents aspects sont en fonction de la composition chimique, de la vitesse de refroidissement et des traitements thermiques ultérieurs effectués sur les pièces.

Les graphites se présentent sur les formes suivantes :

- Graphite lamellaire
- Graphite modulaire
- Graphite en rosettes

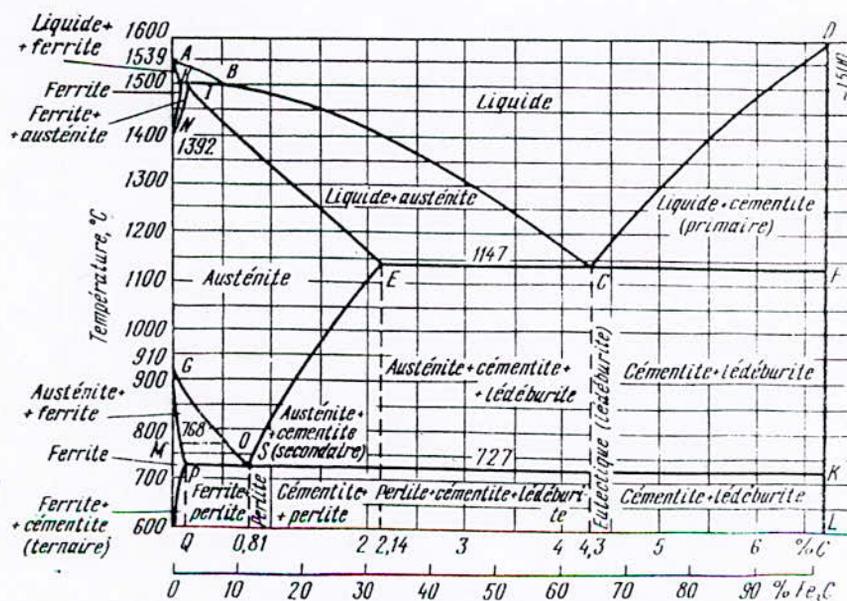
I-4- DIAGRAMMES D'EQUILIBRES Fe-C-[6] :

Le système binaire Fe-C peut subir deux types d'évolution, selon que la phase riche en carbone qui se forme est la cémentite ou le graphite.

- Si la phase riche en carbone formée est la cémentite, l'évolution de système est décrite dans les conditions d'équilibre par le diagramme métastable ou à cémentite.
- Si la phase riche en carbone formée est le graphite, l'évolution du système est décrite dans les conditions d'équilibre par le diagramme stable ou à graphite.

I-4-1 DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-CEMENTITE [7] :

La figure I-1, ci-dessous représente le diagramme d'équilibre fer-cémentite qui traduit la composition des phases et la structure des alliages fer-carbone, dont la concentration varie de fer pur à la cémentite (6.67%C).



I-1 : DIAGRAMME FER-CEMENTITE [7]

Le point A(1539°C) du diagramme correspond au point de fusion de fer pur, alors que le point D (1500°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 HB péritectique.
 - H : 0.10% C, marque la solubilité liquide du carbone dans le fer S à 14.99°C.
 - HB: palier de la transformation péritectique $L+F \rightarrow A$
 - E : 2.14% C marque la solubilité liquide du carbone dans l'austénite à la température du palier ECF(1147°C) eutectique.
 - S : 0.8% C dans l'austénite à la température de palier PSK à 727°C ectectoïde.
 - P : 0.02% C marque la solubilité limite du carbone dans la ferrite à 727°C.
- A la température ambiante, la solubilité du carbone est inférieur à 0.005%.

- ECF : Panier du solidus qui correspond à la cristallisation de l'eutectique appelé l'édéburite (Lb) :



I-4-2 DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-GRAPHITE [7] :

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

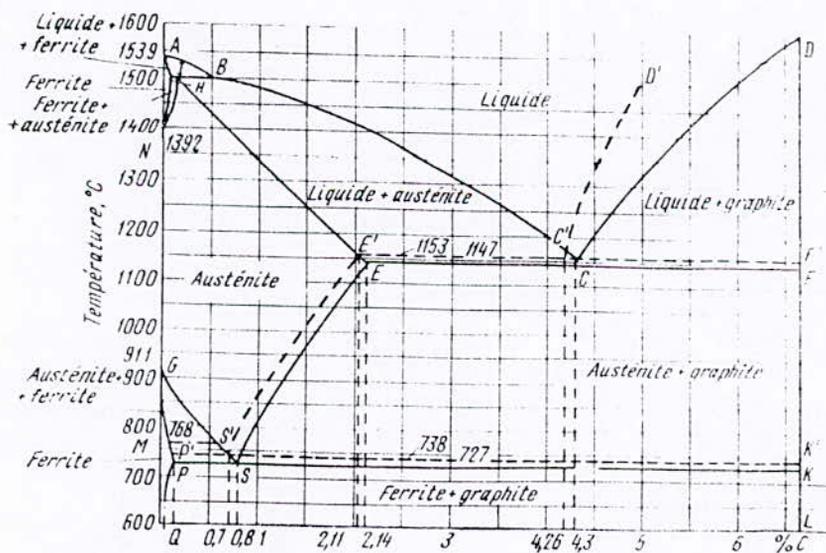


Fig I-2 : DIAGRAMME FER-GRAPHITE[7]

Le diagramme fer-graphite (figI-2) est similaire au diagramme fer-cémentite, sauf que dans le 1^{er} diagramme le graphite primaire cristallise aux températures qui correspondent à la ligne C'D' et le graphite eutectique à celle qui correspondent à la ligne E'C'F'. La ligne E'S' délimite le domaine de la précipitation du graphite secondaire et le palier S'K' au graphite eutectoïde.

I-5- SYSTEME FER-CARBONE-SILICIUM :

Les fontes se composent de plusieurs éléments, d'addition (Si, Mn, P, S, C, ...etc).

Ces éléments peuvent se dissoudre dans les phases liquide et solide de la fonte (ferrite, austénite, cémentite, graphite) faisant varier les conditions de leur équilibre. Ils peuvent aussi former avec le fer, le carbone et entre eux des liaisons chimiques indépendantes.

Les influences d'une impureté x sur l'équilibre des phases des alliages Fe-C sont décrites complètement par le diagramme ternaires Fe-C-X.

Nous nous limitons dans le cadre de la présente étude, à présenter l'influence du silicium sur les fontes ou sa teneur est généralement élevée.

La figure I-3 ci-dessous indique les sections verticales du diagramme Fe-C-Si pour différentes teneurs en silicium.

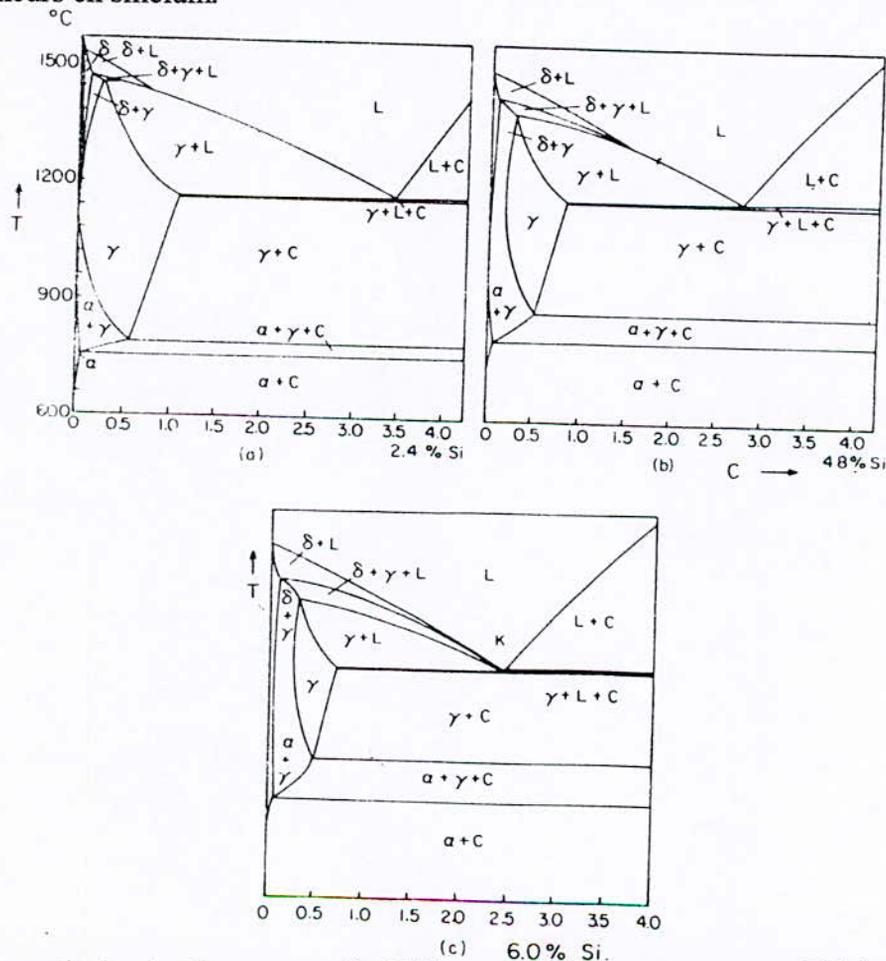


Fig :3 Sections verticales du diagrammes Fe-C-Si pour différentes teneurs en Silicium (a) 2.4% Si, (b) 4.8%Si, (c) 6.0%Si [10].

Le pourcentage de silicium entraîne :

- L'abaissement progressif de la température du début de solidification et le rétrécissement du domaine austénitique.
- Le déplacement des paliers eutectique et entectoïde vers le domaine des hautes températures.
- Le déplacement à gauche des points C'(eutectique) et S' (entectoïde) vers de plus faibles concentration en carbone (la teneur de l'eutectique diminue de 0.3% par pourcentage de silicium [10]).

I-6 PRINCIPAUX ELEMENTS CONSTITUTIF DES FONTES :

- Les fontes (G.S) sont des fontes potentiellement grises, c'est-à-dire des alliages qui, sans traitement particulier à la sortie du four de fusion, donneraient à la solidification dans un moule en sable une fonte grise [4]. La composition chimique élémentaire est fixée par le fondeur en fonction de :
 - La structure désirée
 - Les caractéristiques recherchées
 - L'épaisseur des moulages.

I-6-1 LE CARBONE :

Le carbone est toujours présent dans les alliages ferreux. C'est un élément graphitisant qui améliore la coulabilité et évite les défauts de trempe et de retassure si sa teneur ne dépasse pas certaines limites [4]. Il peut s'y trouver sous deux état :

- à l'état libre : C'est le graphite qu'on l'appelle aussi par carbone graphitique ou carbone libre : (C_l).
- à l'état combiné, il donne un carbone de fer appelé cémentite ou carbone combiné (C_c).

La somme entre les carbones libre et combiné, donne le carbone total qui est la teneur totale dans la fonte (C_t).

$$C_t = C_l + C_c$$

La présence du silicium et du phosphore dans le métal modifié la teneur en carbone du point eutectique, laquelle est diminuée d'un tiers de la teneur en silicium et en phosphore la teneur en carbone totale d'une fonte contenant du silicium et du phosphore se compose comme une fonte ayant un carbone fictif, appelé carbone équivalent donnée par la formule [3].

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

I-6-2 LE SILICIUM :

Le silicium, est un élément graphitisant qui doit être toujours suffisamment abondant pour éviter la formation d'une fonte truitée (c'est -à- dire de plages blanches) [8]. Il est, en général un peu au-dessus de la moyenne recentrée habituellement dans les fontes ordinaires (2.75% environ). De plus l'inoculation porte en général sur 1/3 de la valeur du silicium total et doit - être adaptée à la teneur en carbone, et à l'épaisseur de la pièce [9] (fig I-3).

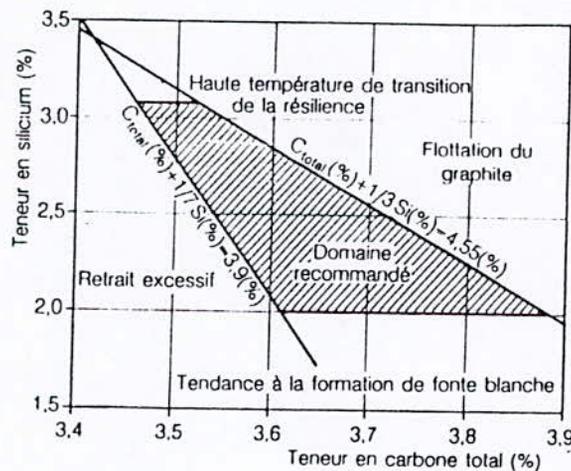


Figure I-4 : Fonte à graphite sphéroïdale : Variation des teneurs en carbone et en silicium et facteurs pratiques qui tendent à limiter se domaine.

I-6-3 LE MANGANESE [8] :

Le manganèse est un élément carburigène et blanchissant. Il faut donc peu de manganèse pour éviter, dans les parties minces du moulage la formation de la fonte truitée.

Etant donné la faible teneur en soufre de la fonte (G.S), le rôle du manganèse n'est pas de désulfurer, comme dans la fonte grise lamellaire, mais de dénitrurer, car les nitrures de fer, dues à l'azote dissous, perturbent la graphitisation. Les nitrures sont en effet, des stabilisateurs de carbures.

La désulfuration se fait au sulfure de calcium. Pour la fonte G.S ferritique on maintient le manganèse inférieur à 0.2 %.

Pour la fonte (G.S) perlitique on maintient le manganèse supérieur à 0.4 % Un titre de manganèse supérieur à 0.4% peut faciliter l'obtention d'une matrice perlitique en favorisant la formation de la cimentite manganésifère.

I-6-4 LE SOUFRE [8] :

C'est un élément antigrahitisant, son titre est toujours très faible pour :

- Ne pas communiquer au liquide en grand pouvoir mouillant par rapport au graphite et de ce fait éviter le graphite lamellaire.
- Ne pas consommer trop de magnésium ou d'alliage au magnésium dont le prix de revient est très élevé.

En effet le magnésium est un désulfurant très actif et la part qui sert à la désulfuration ne peut plus servir à la sphéroïdisation du graphite.

Eviter la formation de sulfure de magnésium Mg S qui donne des inclusions néfastes aux caractéristiques mécaniques des moulages.

En pratique, le pourcentage du soufre varie entre : 0.004% et 0.015%.

I-6-5 LE PHOSPHORE :

Le phosphore, sous forme de phosphore métallique, abaisse les propriétés mécaniques des matériaux [9].

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

I-7 SOLIDIFICATION DES FONTES A GRAPHITE SPHEROIDAL :

La solidification des fontes usuelles peut être décrite par référence au diagramme de phases du système Fe-C-Si. De plus, si l'on admet que le silicium ségrège peu pendant le dépôt proeutectique, quel que soit le dépôt primaire, le chemin de solidification peut être décrit comme une courbe pour laquelle la teneur en silicium demeure constante. Dans de nombreux cas, on peut donc raisonner à partir d'une coupe isoplèthe (T, Wc) du diagramme Fe-C-Si, correspondant à la teneur nominale en silicium de l'alliage °WSi, pour est présentée sur la solidification des fontes. Une section de ce type est présentée sur la figure 4, où la teneur en carbone a été remplacée par celle en carbone équivalent, Ce, définie par $Ce = Wc + 0.28^{\circ}Wsi$ expression dans laquelle les teneurs sont données en pourcentages massiques. Les températures TEG et TEM reportées sur ce diagramme sont respectivement les températures à lesquelles la réaction eutectique stable et métastable respectivement peut commencer au cours de la solidification d'une fonte nominale °WSI en silicium.

La séquence de solidification peut être décrite en mettant en parallèle le diagramme de phases et une courbe de refroidissement typique. Dans le cas d'une fonte hypoeutectique (repère 1 sur la figure I-5), la solidification commence dès que la température du métal s'abaisse en dessous de la température nominale de liquidus de l'alliage, notée °TL .

La figure 6a(page suivante), si l'on admet qu'il n'y a pas de barrière notable à la germination et à la croissance de cette phase.

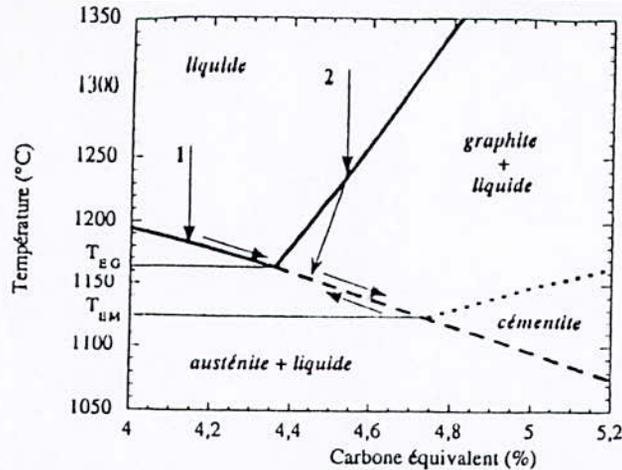


Figure I-5 : Section partielle du diagramme de phases Fe-C-Si à teneur en silicium fixée. Les lignes continues correspondent au diagramme de phases stable. La ligne discontinue et l'extrapolation métastable du liquidus de l'austénite [11].

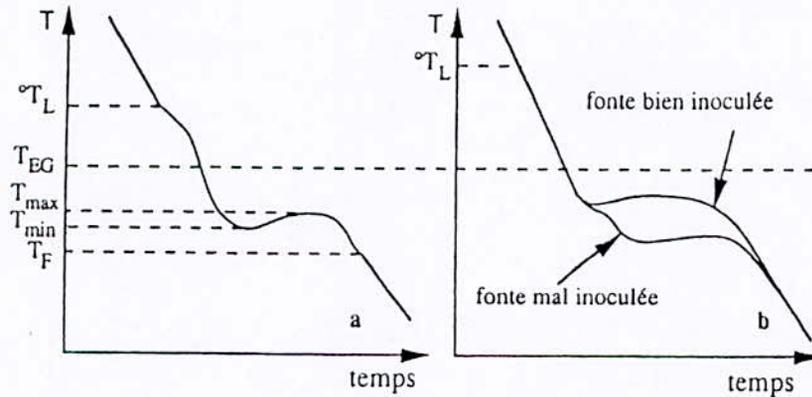


Figure I-6 : Courbes représentant schématiquement l'évolution de la température en fonction du temps lors du refroidissement et de la solidification d'une fonte à graphite sphéroïdal hypoeutectique (a) hypereutectique (b).

Durant le refroidissement, les dendrites d'austénite croissent dans un liquide dont la composition suit celle du liquidus de l'austénite, quand la température TEG est atteinte, la germination du graphite commence. Les particules de graphites ne peuvent croître librement dans le liquide que durant un temps très limité avant d'être enrobées dans une coquille d'austénite, l'ensemble formant alors une sphère eutectique figure I-7.

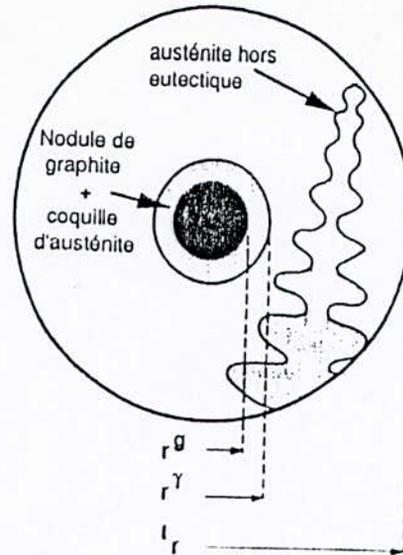


Fig I-7 : Schéma de l'élément du volume considéré pour décrire la formation de la microstructure d'une fonte à graphite sphéroïdale durant la réaction eutectique dans le système stable.

La croissance ultérieure des sphères eutectiques est contrôlée par la diffusion du carbone depuis le liquide vers les nodules de graphite au travers des coquilles d'austénite, cette réaction est lente, en regard des réactions eutectiques habituelles, de sorte que, le refroidissement se poursuivant, de nouvelles sphères eutectiques apparaissent progressivement. On imagine fort bien que la croissance des dendrites primaires peut se poursuivre durant ce refroidissement, et l'on considère que la composition du liquide résiduel suit alors l'extrapolation métastable du liquidus de l'austénite représentée en trait discontinu sur la figure I-5.

A une température T_{MIN} inférieur à T_{EG} , le nombre des sphères eutectiques et la force motrice pour leur croissance deviennent suffisamment importantes pour que la réaction eutectique puisse se produire [en masse], c'est le début «effectif» de la réaction eutectique, auquel est souvent associé un réchauffement temporaire du métal, appelé recalescence, pendant lequel la température du métal, appelé recalescence, pendant lequel la température du métal augmente jusqu'à une valeur T_{max} qui caractérise le palier eutectique. La solidification s'achève à une température T_f qui est souvent inférieure à T_{min} .

La séquence de solidification des fontes hypereutectiques (repère 2 sur la figure I-5) est illustrée par la courbe de refroidissement schématisée sur la figure I-6 (b). Elle débute par la germination et la croissance libre de particules de graphite.

Ces deux phénomènes sont difficiles et nécessitent un certain écart à l'équilibre. De ce fait, le chemin de solidification associé à la précipitation proeutectique de graphite se situe sous le liquidus graphitique, ce qui est illustré par la flèche sur la figure 4. Supposition exacte dépend des conditions de refroidissement aussi bien que de la préparation du métal (traitement de nodularisation et d'inoculation).

Notons que la précipitation primaire de graphite est rarement observable en analyse thermique du fait que la quantité de graphite en cause reste faible. Quand le chemin de solidification coupe l'extrapolation métastable du liquidus de l'austénite peut apparaître d'un point de vue thermodynamique. On suppose que la germination et la croissance de cette phase se font sans surfusion notable et que la réaction eutectique se déroule alors comme décrit précédemment pour les fontes hypoeutectiques : le chemin de solidification est donc situé sur l'extrapolation métastable du liquidus de l'austénite. La réaction eutectique « en masse » peut se produire dès que le liquidus de l'austénite est atteint si le nombre de nodules de graphite est suffisant, où être retardée dans le cas contraire. Dans ce dernier cas, le refroidissement du métal se poursuit et, comme précédemment, des dendrites d'austénite peuvent se développer, qui sont dites hors eutectiques.

En pratique, elles ne peuvent pas être différenciées des dendrites primaires d'une fonte hypoeutectique.

7-1 GERMINATION DES PARTICULES DE GRAPHITE :

Oldfield [12] observa expérimentalement que, pour une fonte à graphite lamellaire de composition donnée, le nombre total de cellules eutectiques, N_v pouvait être exprimé par une loi puissance de la surfusion eutectique maximale

$$\Delta T_{EG} = T_{EG} - T_{MIN} :$$

$$N = A(\Delta T_{EG})^n \quad [13]$$

où n était égal à deux d'après cet auteur.

De cette constatation, il proposa de considérer que la germination des particules de graphite est hétérogène et instantanée. L'accroissement du nombre de cellules eutectiques avec la surfusion est donc ainsi décrit par le fait que des sites de germination différents deviennent actifs quand la surfusion augmente, chaque type de site étant associé à une température caractéristique unique. Quelques résultats plus récents sont disponibles, qui peuvent eux aussi être représentés par le même type de loi, ainsi que l'illustre la figure I-8, ci-dessous sur cette figure on peut constater que la valeur de l'exposant n de la loi de germination doit dépendre du traitement du métal liquide, en particulier la nature de la fonte (fonte à graphite lamellaire ou sphéroïdal). Notant que, à surfusion donnée, le nombre de nodules dans une fonte à graphite sphéroïdale est trois ordres de grandeur plus élevé que le nombre de cellules eutectiques dans une fonte à graphite lamellaire.

Cette différence doit être en mécanisme de l'inoculation ; de récents travaux permettent d'espérer disposer à un schéma des réactions conduisant à la formation des composés présents dans les particules ayant servi de substrats de germination [15].

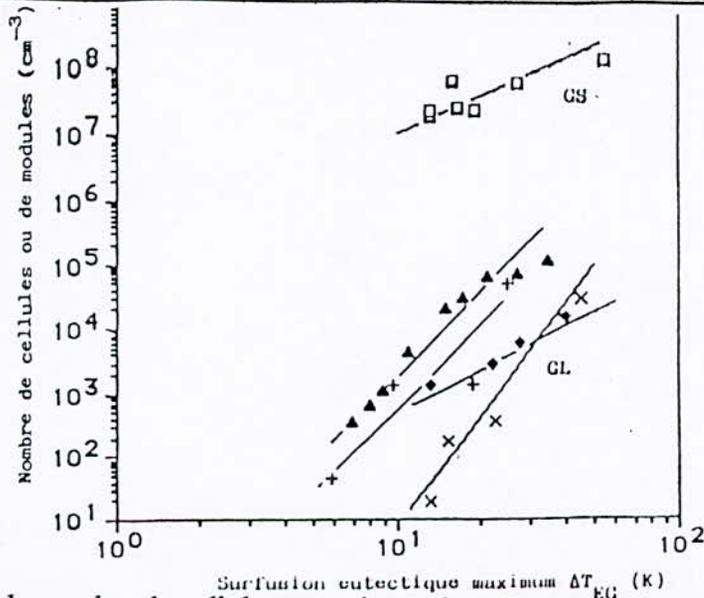


Fig I-8 Variation du nombre de cellules eutectiques dans des fontes à graphites lamellaire (G.L) et de nombre de nodules dans une fonte à graphite sphéroïdale (G.S) en fonction de la surfusion eutectique maximale ΔT_{EG} avant recalescence [16].

I-8- MICROSTRUCTURE DES FONTES A GRAPHITE SPHEROIDAL [1] :

Dans les fontes à graphite sphéroïdal, le graphite se présente sous forme compacte voisine de la sphère (fig I-9). La différence entre les divers nuances de fonte : réside dans la nature de la matrice métallique qui entoure le graphite et qui varie en fonction de la composition, de la vitesse de refroidissement et, éventuellement, des traitements thermiques.

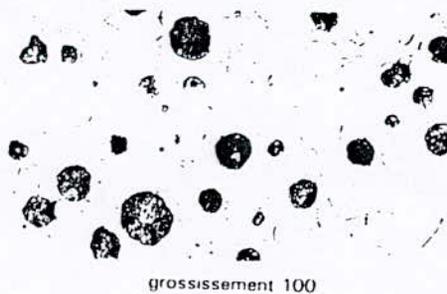
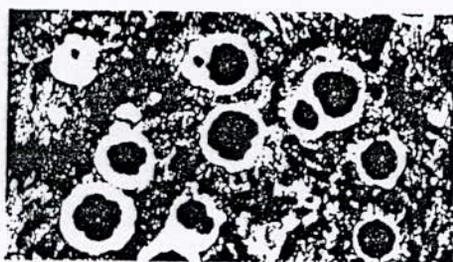


Fig I-9 : Graphite en sphéroïdes dans une fonte à graphite sphéroïdal à matrice ferritique échantillon attaqué [1].

Pour une composition chimique courante et en l'absence d'éléments d'alliage, 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, qui se refroidissent plus lentement, contiennent plus de ferrite que les sections plus minces qui sont à prédominance perlitique.

Ces nuances ferrito-perlitiques, les plus économiques, sont fréquemment utilisées à l'état brut de coulée. La ferrite, constituant doux, se présente sous forme d'auréoles entourant les sphères de graphite (fig I-9), le reste de la matrice étant constitué de perlite lamellaire dont les caractéristiques mécaniques et la dureté dépendent avant tout de la finesse des lamelles de la perlite.

Ces structures ferrito-perlitiques peuvent ensuite être modifiées pour que l'on puisse obtenir soit une nuance ferritique à ductilité élevée par recuit de ferritisation, soit une nuance perlitique à résistance mécanique élevée par traitement de normalisation.



(grossissement 100)

Fig 10 : fonte à graphite sphéroïdal à matrice perlitique mais dans laquelle le graphite est entouré de ferrite [1].

I-9 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION [9], [6], [8] :

I-9-1 LE SILICIUM :

Le silicium est un élément de graphitisation de base dans les fontes.

Il abaisse la température du liquidus et élève celle du solidus, donc il diminue l'intervalle de solidification.

Une teneur trop élevée en silicium augmente la température de transition.

Une augmentation de la teneur en silicium a tendance à augmenter la fraction ferritique de la structure donc à diminuer la dureté, ainsi que la résilience.

Cependant l'augmentation du silicium favorise la ductilité par la formation préférentielle de ferrite au sein de ces fontes.

Pour une fonte entièrement ferritique, l'augmentation du silicium durcit la ferrite et accroît sensiblement la résistance mécanique.

I-9-2 LE CHROME :

C'est un élément fortement antigrahitisant c'est un stabilisateur de carbures, en retardant leur décomposition au chauffage sa présence en grandes quantités peut donc avoir pour effet de blanchir les parties minces des moulages, d'où les irrégularités d'usinage et de la fragilité observées. [10].

Il affine la perlite, augmente les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion.

I-9-3 LE NICKEL :

Eléments graphitisants de solidification surtout aux basses teneurs de silicium.

On peut admettre que 1 % de Nickel agit comme 0,25 à 0,50 % de silicium. (généralement $Si = 4Ni$).

Il affine le graphite et évite la formation de carbures dans les arêtes et les parties minces des moulages (nervures, ailettes, ...etc).

Il diminue le pouvoir trempant des fontes, et de ce fait, atténue les variations de structure et facilite l'usinage.

I-9-4 LE MANGANESE :

Son effet antigraphitisant n'est sensible qu'à des taux élevés. Aux taux normaux 0,5 à 0,8% il affine la perlite, augmente la dureté et la résistance à la traction.

C'est un désulfurant énergique. Le manganèse se combine au soufre pour donner un sulfure de manganèse qui passe dans le laitier.

I-9-5 LE CUIVRE :

Elément graphitisant à la solidification surtout aux basses teneurs en silicium, il contribue fortement à l'affinement de la perlite par son action gamagène. En outre le cuivre est un élément anti-fertisant. Il favorise l'obtention d'une matrice perlitique, à l'état brut de coulée. Son introduction dans la fonte entraîne une augmentation de la résistance au choc et de la dureté. Un taux croissant de Cu permet d'obtenir [8].

- Une matrice ferrito – perlitique pour 0,3 à 0,5 % de Cu ;
- Une matrice perlitique pour 1 % de Cu.

I-10 – PROPRIETES MECANIQUES :

Une des caractéristiques importantes des fontes G.S est la combinaison d'une résistance élevée et une très bonne ductilité.

Ceci est le résultat de la forme sphéroidal du graphite [5].

- Le graphite lamellaire affaiblit, en effet ces propriétés à cause des discontinuités créées dans la matrice provoquant une rupture par effet d'entaille.
 - La microstructure de la matrice possède un rôle très important sur les propriétés mécaniques de la fonte.
- La structure ferritique a de bonnes propriétés de résistance une haute capacité de déformation plastique, car la ferrite est ductile résiste aux chocs est facile à usiner, mais sa résistance à l'usure est assez faible [1].
- La structure perlitique est caractérisée par une résistance à la traction élevée et on allongement relativement faible comparé aux structures ferritiques.
- Les structures ferrito-perlitiques se caractérisent par des propriétés intermédiaires des structures ferritiques et perlitiques.

- Les compositions chimiques et les caractéristiques mécaniques des fontes élaborées par l'U.F.R sont présentées dans les tableaux ci dessous :

Tableau I-1 : Les compositions chimiques des fontes élaborées par l'U.F.R

Nuance	C	Si	Mn	S	P	Mg	Cu	CE
GSC 38-15	3.50	2.40	0.20	< 0.020	<0.10	0.040	<0.050	4.30
	3.80	2.80	0.50					4.70
GSA 56-5	3.50	2.40	0.60	<0.020	<0.10	0.040	<0.050	4.30
	3.80	2.80	0.90					4.70
STT 40-12	3.50	2.70	<0.30	<0.020	<0.050	0.040		4.40
	3.70	3.10				0.060		4.70
Ft 25	2.95	1.60	0.80				0.10	3.50
	3.10	2.00	1.00				1.00	3.80

Tableau I-2 : Les caractéristiques mécaniques des fontes élaborées par l'U.F.R

Nuances	Résistance a la traction Rt da N/mm ²	Limite élastique Re da N /mm ²	Allongement A %	Résilience KCU daj /cm ²	Dureté Brinel HB	Microstructure
GSC 38 – 15	38	27	15	1,5	137 - 170	Ferritique A 90 % mini
GSA 56 – 5	56	39	5	0,8	200 - 250	Ferrito-perlitique
STT 40 – 12	40	25	12	/	< à 201	Ferritique brut de coulée
Ft 20	21à 30	/		/	179 à 240	Perlitique avec ferrite < 30%, carbures < à 3%
Ft 25	26 à 30	/	/	/	187 à 255	Perlitique avec ferrite < à 5%, carbures < à 5%
Ft 25 Tambours	> à 25	/	/	/	202 à 241	I.A.3.6qqBadmis structure perlitique, ferrite, < à 5% carbures< à 2%

On remarque que la structure perlitique est caractérisé par une résistance à la traction élevée, par contre l'allongement est d'autant plus importante que la structure et ferritique.

Dans les fontes (G.S), la température de transition et la résilience sont influencées par plusieurs facteurs, tel que :

- La composition chimique de la matrice (Si, P, Mn, ...).
- Le nombre et la distribution des sphéroïdes de graphites.
- Les constituants de la matrice.

I-11 – PRINCIPALES APPLICATION DES FONTES :

De tous les alliages commercialisés, la fonte est la moins cher et à plusieurs avantages notamment :

- Une faible température de fusion et une meilleure coulabilité que l'acier.
- Une bonne résistance à la corrosion.

Les fontes (G.S) sont très largement utilisées parce qu'elles permettent entre autres de :

- Combiner plusieurs propriétés (résistance et ductilité élevée)
- Offrir un avantage économique en réalisant plus simplement des pièces aux formes et dimensions recherchées.
- Les fontes G.S perlitiques sont utilisées en raison de leurs excellentes qualités de frottements, dans la fabrication d'engrenages de vilebrequins de moteurs, de segments de pistons des cylindres de laminoirs ou de papeterie de carters de boîte de vitesses de vérins hydrauliques ... etc.
- Les fontes (G.S) à structure ferrito – perlitique sont utilisées dans la fabrication de bâtis de machines outils et de pièces de l'industrie automobile tels que : tambours de freins, ...etc.
- Les fontes (G.S) à matrice ferritique sont employées, pour leur ductilité pour la réalisation de tuyaux raccords de portes de fours de pièces de sécurité dans l'industrie automobile, (bras de suspension, pivots de roues... etc).

CHAPITRE II

PARTIE EXPERIMENTALE

II-1 INTRODUCTION :

Les conditions d'élaboration de la fonte (G.S) exercent une influence sur la structure et les caractéristiques mécaniques.

Il existe maintenant deux (02) voies possibles pour l'obtention d'une structure donnée de fonte à graphite sphéroïdal :

- La première est l'élaboration directe (fonte brute de coulée).
- La seconde indirecte, exige le recours à un traitement thermique.

II-2 BUT DE TRAVAIL :

Notre étude a pour objectif d'élaborer une fonte (G.S) de structure perlite-ferritique brute de coulée, qui a pour but d'éliminer les inconvénients du traitement thermique qui provoquent des déformations dimensionnelles ainsi que les surcoûts de production dus à une grande consommation d'énergie comme il est d'usage actuellement à l'U.F.R.

Nos essais ont porté sur l'étude de l'influence de la composition chimique caractérisée par une teneur en éléments perlitisants (manganèse et cuivre).

II-3 EQUIPEMENT :

Nous avons réalisé nos travaux dans l'unité fonderie de Rouiba (U.F.R) de la Société Nationale de Véhicules Industriels (S.N.V.I).

La figure II-1 ci-dessous représente schématiquement les différents ateliers répartis en deux secteurs :

- 1) Matière première de fusions.
- 2) Moulage et annexes (sablerie, noyautage, finition).

Les flèches de la figure II-1 indiquent les opérations successives du procédé de fabrication des pièces moulées.

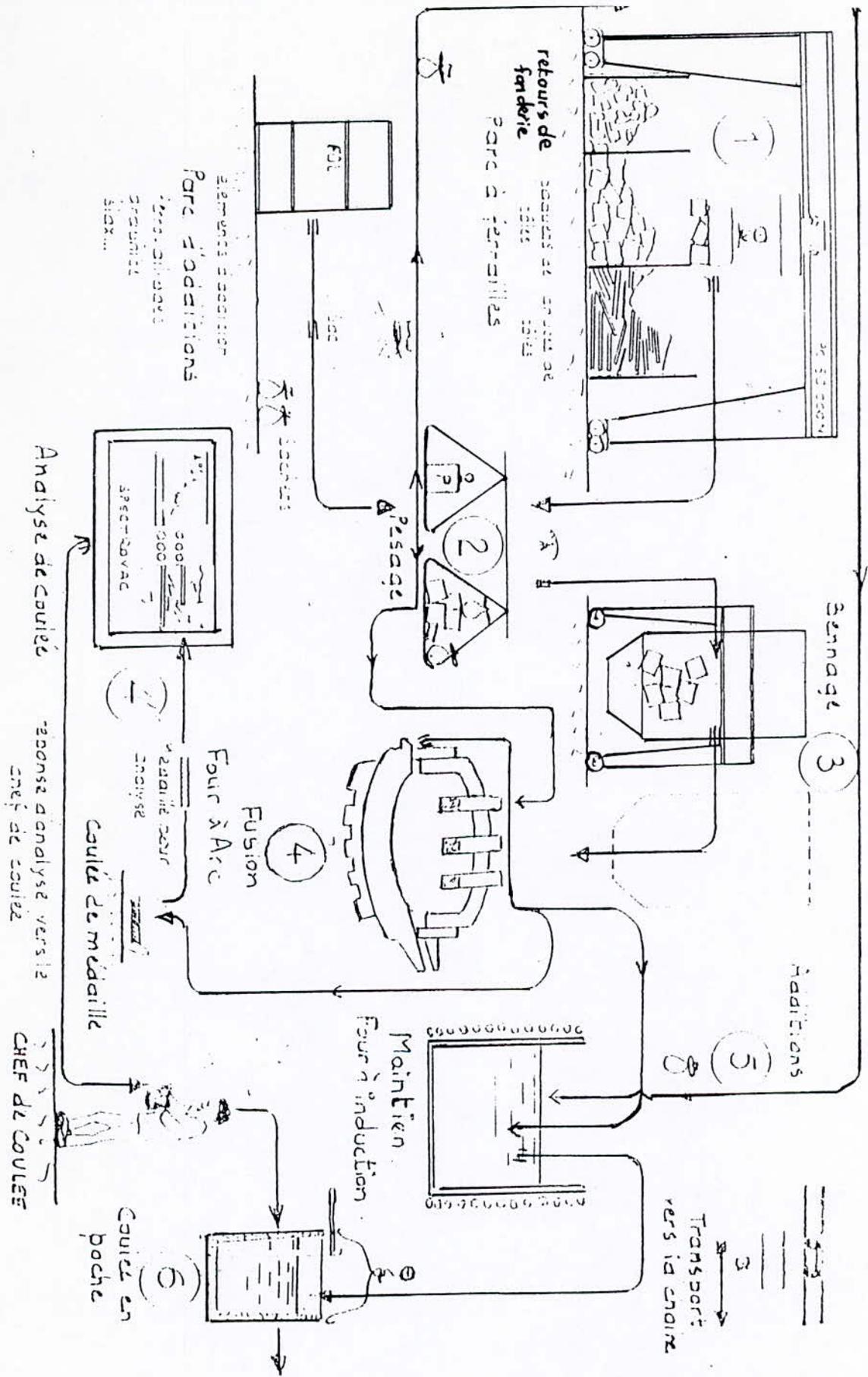


Fig. II-1 - Elaboration de la fonte.

L'élaboration de la fonte se fait dans le 1^{er} secteur à l'aide des équipements suivants :

- Deux fours électriques à arc de caractéristiques techniques identiques.
 - Capacité —————> 10 Tonnes
 - Puissance —————> 21 MVA
 - Revêtement —————> Acide
 - Production horaire moyenne —> 6 tonnes/h

- Trois fours à induction sans noyau magnétique dont les caractéristiques sont les suivantes :
 - Capacité de production —> 14 tonnes
 - Revêtement —————> Acide
 - Puissance —————> 3 MVA

II-4 ELABORATION :

L'élaboration d'une fonte (GS) de structure perlite-ferritique brute de coulée, exige certains paramètres particuliers parmi lesquels on cite.

- Le choix d'une composition chimique adéquate au lit de fusion
- Une teneur en éléments perlitants (manganèse, cuivre) convenable pour régler le rapport perlite – ferrite.
- Une inoculation dans les moules, ...etc.

Donc il est nécessaire de procéder avant tout à un choix judicieux des constituants de la charge.

Les teneurs de carbone et de silicium doivent être comprises pratiquement dans des intervalles de valeurs optimales. Le carbone est pris entre 3,50 – 3,80 % tandis que le silicium entre 2,40 et 2,80 %.

On utilisera dans ce cas des ferrailles d'acier, rébus d'acier d'emboutissage et une fonte neuve. Cette fonte est destinée pour l'élaboration de la fonte (GS), elle a de faibles teneurs en

S et P. Les retours de moulage comme les jets de coulées, les masselottes,... etc, sont recyclés dans la charge en fonction de leur composition chimique.

II-5 PREPARATION DE LA CHARGE :

La préparation de la charge pour l'élaboration des fontes (G.S) doit être faite d'une manière soignée afin de pouvoir introduire les éléments graphitisants tels que le carbone, le silicium, ... etc, et les éléments sphéroïdisants comme le magnésium ainsi que les éléments perlitisants en quantités suffisantes comme le cuivre et le manganèse.

Il faut éviter l'introduction des éléments nuisibles dans la charge tels que le plomb, l'antimoine, ... etc.

La composition chimique et la proportion des constituants de la charge (retour de fonderie, aciers, fonte neuve) sont reportées sur les tableaux II-1 et II-2 (page suivante).

- Les retours de fonderie se composent de masselottes, systèmes de coulée et des pièces rebutées en fonte (G.S) Les pièces rebutées de la fonte GSA apportent une grande quantité de manganèse.

- Les aciers utilisés sont des chutes d'emboutissage profond, des tôles minces, des chutes d'aciers doux ...etc, qui introduisant en plus du manganèse, d'autres éléments tels que : le cuivre, le nickel, le chrome qui sont respectivement perlitisant, alphasène et carburigène.

- La fonte neuve ou fonte de première fusion apporte essentiellement une forte teneur en carbone et de très faibles teneurs en éléments nuisibles tels que le phosphore et le soufre.

Tableau II-1 : Analyse chimique des constituants.

Elément	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Pb	Ce
Retour	3,70	2,50	0,3	0,015	0,05	0,05							4,55
Acier	0,18	0,2	0,64	0,014	0,019	0,014	0,05	0,014	0,011	0,04	0,035	0,015	0,25
Fonte	4,53	0,15	0,008	0,006	0,027								5,58

Tableau II-2 : Quantités des constituants de la charge.

Constituants	Teneurs (%)	Poids (Kg)
Ferraille	10	1000
Retours	70	7000
Fonte neuve	20	2000

II-6 FUSION DE LA CHARGE :

La disposition des constituants de la charge dans le four électrique à arc exige un ordre bien défini :

- Les tôles d'aciers de récupération sont placées au fond du four afin de protéger celui-ci des chocs de constituants plus lourds.
- Au centre du four on place des gueules de fonte neuve.
- Les reteurs de fonderie.
- Au-dessus seront disposées des ferrailles légères.

Un choix judicieux des paramètres du régime électrique (intensité, tension et facteur de puissance) permet une fusion rapide et efficace.

La durée de fusion de l'essai A est 2 h. La température de fusion est $T = 1470$ °c. Pour l'essai B la durée de fusion est 2 h 10 mn et la température de fusion est $T = 1480$ °c.

Les compositions chimiques obtenues après fusion sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau II-3 : Composition chimique des essais A et B après fusion.

Elément Essai	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Pb	Ce
A	3,15	1,39	0,30	0,015	0,030	0,034	0,077	0,00	0,001	0,11	0,01	0,017	3,62
B	3,34	1,61	0,44	0,026	0,65	0,01	0,037	0,00	0,005	0,26	0,010	0,024	3,89

II-7 MAINTIEN ET REAJUSTEMENT :

Après décrassage, la fonte liquide est transféré dans une poche de 10 T du four à arc au four à induction. Ceci afin de procéder durant sont maintien au réajustement de l'analyse chimique et de la température ainsi qu'à la première étape d'inoculation.

Tenant compte de l'affinité du carbone envers l'oxygène, les quantités de graphite sont ajoutées pour les essais A et B s'élèvent à 60 Kg et 50 Kg respectivement.

L'ajustement du Si est réalisé par l'addition du ferro-silicium (80% de si). Les quantités ajoutées sont de 50 et 45 kg pour les essais A et B respectivement.

Les températures enregistrées avant la coulée en poche sont de 1500 °c et 1510 °c pour les essais A et B respectivement.

Le tableau II-4 ci-dessous indique l'analyse des échantillons prélevés après l'homogénéisation du bain.

Tableau II-4 : Composition chimique des bains après réajustement et homogénéisation.

Elément Essai	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Pb	Ce
A	3,82	2,05	0,3	0,016	0,034	0,077	0,077	0,00	0,002	0,1	0,010	0,016	4,51
B	3,81	1,89	0,43	0,025	0,050	0,011	0,036	0,00	0,004	0,070	0,010	0,023	4,45

II-8 TRAITEMENT DE SPHEROÏDISATION :

Le traitement consiste à additionner de ferro-silicium-magnésium (Fe – Si – Mg). La méthode utilisée à l'U.F Rouiba est la méthode Sandwich. Elle s'effectue par une introduction de cet alliage au fond de la poche de coulée. On recouvre cet alliage par des tôles d'acier doux fig. II-2, de façon à retarder le contact avec la fonte liquide. Cela afin de réduire les pertes de magnésium sous l'action de la réaction exothermique. Car la température d'ébullition de magnésium est de 1090 °c et que son immersion brusque dans la fonte liquide provoque sa variation, donc sa teneur dans le bain diminue aussi rapidement que la température est élevée. La coulée doit s'effectuer au plus tard 20 mn après le traitement.

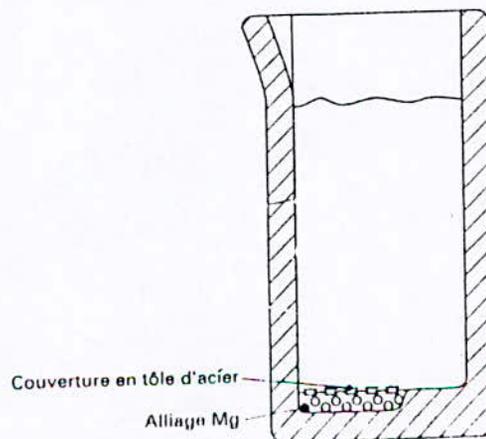


Fig. II-2 : Principe de traitement de sphéroïdisation.

Pour une tonne de fonte, il faut ajouter 17 kg de Fe – Si – Mg et environ 8Kg de couverture (acier doux).

La composition chimique Fe – Si – Mg est :

- 8 % Mg
- 46 % Si
- Et le reste c'est du fer.

Pour les essais A et B la quantité de la fonte traitée est respectivement 500 et 1000 Kg. Les températures de traitement sont de 1500 et 1510 °c respectivement.

La quantité de Fe – Si – Mg ajoutée pour l'essai A est de 9 kg et pour l'essai B de 17 kg

Le Tableau II-5 suivant indique la composition chimique de la fonte après traitement :

Tableau 5 : Composition chimique des fontes A et B après traitement.

Elément Essai	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Pb	Ce
A	3,80	2,44	0,29	0,015	0,029	0,097	0,073	0,00	0,002	0,1	0,009	0,015	4,62
B	3,81	2,40	0,43	0,024	0,048	0,18	0,032	0,00	0,004	0,07	0,011	0,023	4,62

II-9 ADDITION DES ELEMENTS PERLITISANTS :

Après le traitement de la fonte, celle-ci est versée dans des poches de coulées de capacité de 500 Kg.

Pour obtenir de la fonte (G.S) perlito-ferritique, on y introduit des additions de ferromanganèse (Fe – Mn) et du cuivre.

Les quantités ajoutées sont les suivantes :

- Essai A subdivisé en 5 essais : A₁...A₅, avec une addition croissante d'un Kilogramme de cuivre pour chaque essai.

- Essai B → addition de 2,5 kg de Fe – Mn de rendement de 75 %.

Le Tableau II-6 suivant donne les analyses de la fonte obtenue après l'addition de cuivre et du ferro-manganèse.

Tableau II-6 : Compositions chimiques des différents bains de fontes après les additions.

Elément Essai	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Pb	Ce
A ₁	3,64	2,45	0,27	0,015	0,029	0,097	0,073	0,00	0,002	0,45	0,009	0,015	4,46
A ₂	3,64	2,45	0,27	0,015	0,029	0,097	0,073	0,00	0,002	0,57	0,009	0,015	4,46
A ₃	3,64	2,45	0,27	0,015	0,029	0,097	0,073	0,00	0,002	0,64	0,009	0,015	4,46
A ₄	3,64	2,45	0,27	0,015	0,029	0,097	0,073	0,00	0,002	0,68	0,009	0,015	4,46
A ₅	3,64	2,45	0,27	0,015	0,029	0,097	0,073	0,00	0,002	0,83	0,009	0,015	4,46
B	3,70	2,41	0,60	0,024	0,047	0,18	0,034	0,00	0,004	0,06	0,011	0,023	4,52

II-10 INOCULATION ET COULEE :

L'inoculation qui est l'opération de précipitation du graphite est réalisée au moment de la coulée. Elle se fait à l'aide du ferro-silicium en poudre réparti dans les moules.

Pour caractériser la qualité de la fonte élaborée on a prélevé des éprouvettes (Keel – Blocks) selon les conditions indiquées au tableau II-7 ci-dessous.

Tableau II-7 : Prélèvement d'éprouvettes pour les essais réalisés.

Essais	T. de coulée (°C)	Mode de refroidissement
A ₁	1399	Air libre
A ₂	1384	//
A ₃	1370	//
A ₄	1356	//
A ₅	1329	//
B	1380	//

II-11 METALLOGRAPHIE :**II-11-1 PREPARATION DES ECHANTILLONS :**

Afin de caractériser la structure de la fonte élaborée, ainsi que la morphologie du graphite obtenu, on procède à l'examen micrographique, ceci nécessite une préparation métallographique suivi par une attaque chimique.

II-11-2 LE POLISSAGE :

Les échantillons prélevés ont subi plusieurs opérations successives de polissage à l'aide de papier émeri de différentes tailles de grains décroissante de 120, 240, 400, 600, 1000 et 1200.

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

Le polissage fin consiste à polier l'échantillon sur un disque de feutre avec la suspension de la pâte diamanté répartie à l'aide de papier des grains métallique et abrasifs arrachés.

Le polissage fin consiste à polier l'échantillon sur un disque de feutre avec la suspension de la pâte diamantée répartie à l'aide d'un diluant sur le disque qui joue aussi le rôle d'un refroidisseur.

II-11-3 L'ATTAQUE CHIMIQUE :

La révélation de la microstructure est réalisée par une attaque chimique qui met en évidence les différentes phases de la fonte étudiée. Pour cela les échantillons sont attaqués au nital de 5% acide nitrique (HNO_3) et 95 % d'éthanol.

Les résultats des examens micrographiques des échantillons de tout les essais sont présentés dans le chapitre III.

II-12 ESSAI MECANIQUE DESTRUCTIF :

Notre étude est suivie par la caractérisation de la fonte élaboré de structure perlito-ferritique brut de coulée.

Cette caractérisation consiste à évaluer les propriétés mécaniques qui sont : la résistance à la traction, l'allongement, la résilience et la dureté.

Les éprouvettes pour essai mécaniques ont été usinées selon la norme AFNOR à partir des ébauches (Keel-Blacks) mentionnées précédemment.

Dans les figures ci-dessous nous montrons la forme et les dimensions des éprouvettes de traction et de résilience.

II-12-1 ESSAI DE TRACTION :

L'essai de traction consiste à exercer un effort de traction de façon continue, suivant l'axe longitudinal d'une éprouvette portant deux repères sur une même génératrice et à étudier les déformations de cette éprouvette jusqu'à sa rupture.

L'essai est réalisé sur une éprouvette de forme et dimensions définies par la norme AFNOR NF A32-201, avec une machine de traction universelle U5DR selon la norme AO3-151.

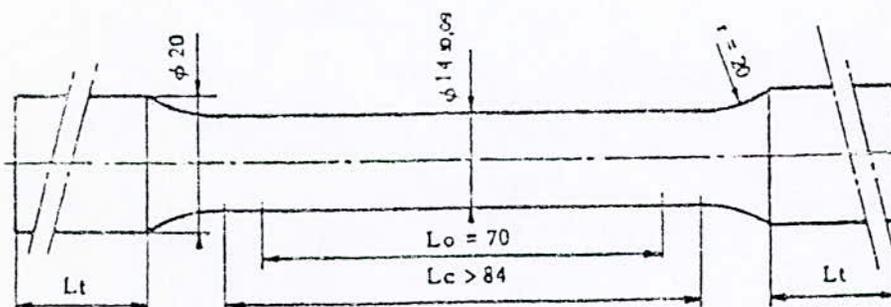


Fig II-3 : Epreuve de traction.

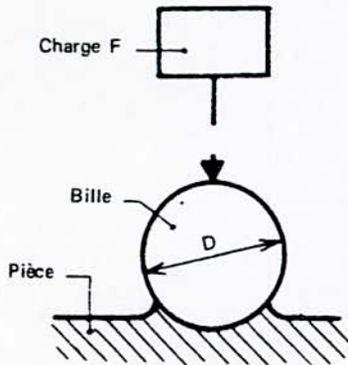
II-12-2 ESSAI DE DURETE ET RESILIENCE :

L'essai de dureté Brinell consiste à appliquer sur la surface polie d'une charge constante et statique F pendant un temps défini (10 à 15 s). Cette charge s'applique par l'intermédiaire d'une bille de diamètre D et à mesurer le diamètre de l'empreinte laissée après suppression de la charge.

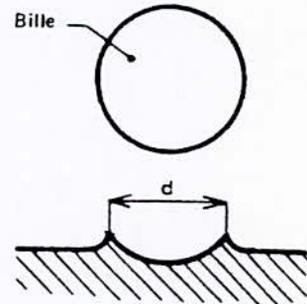
La dureté Brinell (HB) est le quotient de la charge F en Kg (ou $1,02 F'$ en da N) pour la surface S en mm^2 de l'empreinte considéré comme la calotte d'une sphère de diamètre d [4].

$$HB = F/5 \text{ (si } F \text{ en Kgf)} \quad [4].$$

$$HB = 1,02 F/5 \text{ (si } F' \text{ en da N)} \quad [4].$$



Principe de l'essai



Mesure de l'empreinte

Fig : Essai de dureté Brinell

- L'essai de la dureté Brinell a été réalisé sur une machine Wolpert selon norme AFNOR NFA 03-201.

L'essai de résilience consiste à rompre d'un seul coup de monton-pendule, dans des conditions bien définies, une éprouvette généralement entaillée du milieu et reposant sur 2 appuis.

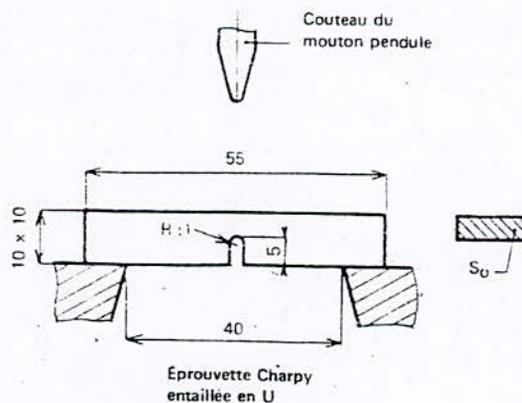


Fig II-5 : Principe de l'essai de choc et de l'essai de résilience

- L'essai de résilience a été réalisé à l'aide d'une machine CHARPY sur des éprouvettes de caractéristique dimensionnelles bien défini selon la norme AFNOR NF A03-156.

CHAPITRE III

PARTIE DES RESULTATS

&

DISCUSSION

III-1- INTRODUCTION :

Après les essais de caractérisation métallographiques et mécaniques on procède à l'interprétation des résultats en tenant compte de la variation du pourcentage de cuivre dans les essais effectués.

Ces fontes illustrent l'influence du cuivre sur la précipitation du graphite, ainsi que les proportions de perlite et de ferrite formé et leurs influences sur les caractéristiques mécaniques (résistance à la traction, dureté, allongement et résistance).

III-2- PRECIPITATION DU GRAPHITE DANS LES FONTES (G.S) :

Les micrographies III.1(a), III.2(a) et III.3(a), correspondent aux teneurs de cuivre de 0.45, 0.64 et 0.83% respectivement, elles illustrent la morphologie du graphite dans la fonte.

Celle-ci présente une allure presque sphéroïdale du graphite.

Le taux des particules sphéroïdales est presque égal à 90%.

On constate aussi que certains nodules sont plus développés que les autres, ce-ci illustre la nature du graphite précipité au cours du refroidissement. Le graphite primaire est plus développé que le graphite secondaire.

- Le graphite primaire (assez développé), apparaît au cours de la transformation eutectique.

- Le graphite secondaire (moins développé) est le résultat des transformations ultérieures notamment eutectoïdes.

Le tableau ci-dessous donne la fraction volumique du graphite précipité en fonction du pourcentage de cuivre.

Tableau III-1- : Précipitation de graphite en fonction de pourcentage de cuivre.

Pourcentage cuivre (%)	0.45	0.57	0.64	0.68	0.83
Graphite précipité (%)	10.25	6	9.75	8.75	12.25

La figure III-6 (page suivante) représente la fraction du graphite en fonction de cuivre, on remarque que celui-ci n'a pas d'influence marquée sur la précipitation.

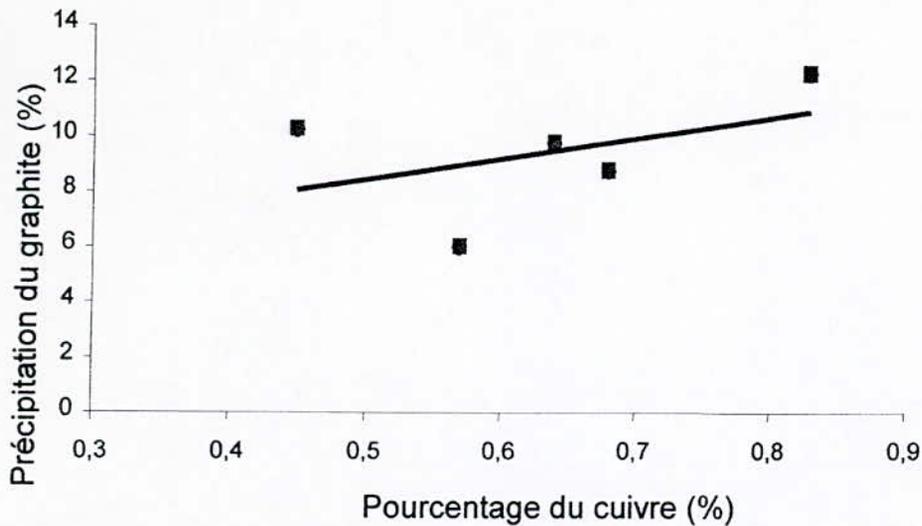


Fig III-6 : Précipitation du graphite en fonction du pourcentage du cuivre

Notons qu'en peut avoir des informations complémentaires concernant la germination des particules de graphite cependant elles n'ont pu être obtenue à l'aide d'expériences de trempe en cours de solidification dirigée (T.S.D), cette technique permet de suivre le déroulement de la solidification du point de vue cinétique, par la mesure de l'évolution avec la température de la fraction volumique de solide et du nombre de cellules eutectiques ou de modules de graphite.

III -3 INFLUENCE DE CUIVRE SUR LE RAPPORT FERRITE-PERLITE :

Les micrographies montrées sur les figures III.1(b), III.2 (b), III.3(b), III.4(b) et III.5(b), (pages 33, 34, 35, 36 et 37) montrent l'influence du cuivre sur le rapport ferrite-perlite.

On constate qu'après l'examen de toutes les micrographies que les nodules de graphite sont entourés par une enveloppe de ferrite.

On constate aussi que les plages de ferrite communiquent entre elles, et cela est montré clairement dans les micrographies III.1(b), III.2 (b).

Pour la micrographie III.1(b), la quantité de la fraction de la ferrite dépasse légèrement celle de la perlite.

Pour les autres essais, la proportion de perlite dépasse de loin celle de la ferrite et cela est dû à l'effet perlitisant du cuivre et de l'augmentation de ce dernier le montre clairement sur les micrographies suscités.

Rappelant que pour ces essais le pourcentage du cuivre s'élève de 0.45 à 0.83%.

Le tableau ci dessous donne les proportions de ferrite et la perlite en fonction du pourcentage du cuivre.

Tableau III-2 : Les Fractions volumiques de ferrite et de perlite en fonction de la teneur en cuivre.

% de cuivre	0.45	0.57	0.64	0.68	0.83
Phases					
Ferrite (%)	50	28	32.75	23	13.13
Perlite (%)	39	66	55.5	68.25	74.75

La figure III.7 montre les courbes de variation de ferrite et de la perlite en fonction du pourcentage de cuivre.

L'examen de ces courbes montre clairement l'augmentation du taux de perlite et la diminution du taux de ferrite en fonction de la teneur en cuivre, ainsi la divergence entre ces deux courbes, illustre parfaitement l'effet perlitisant du cuivre.

Les résultats obtenus durant nos recherches sont en parfaites concordances avec les rapports de recherches sur les fontes (G.S) selon lesquels 1% de cuivre dans ces fontes donnerait une structure presque entièrement perlitique avec seulement quelques îlots ferritiques autour du graphite [8].

Les figures III.1(c), III.2 (c), III.3(c), III.4(c)etIII.5(c) mettent en évidence les lamelles de la perlite avec un grossissement plus grand.

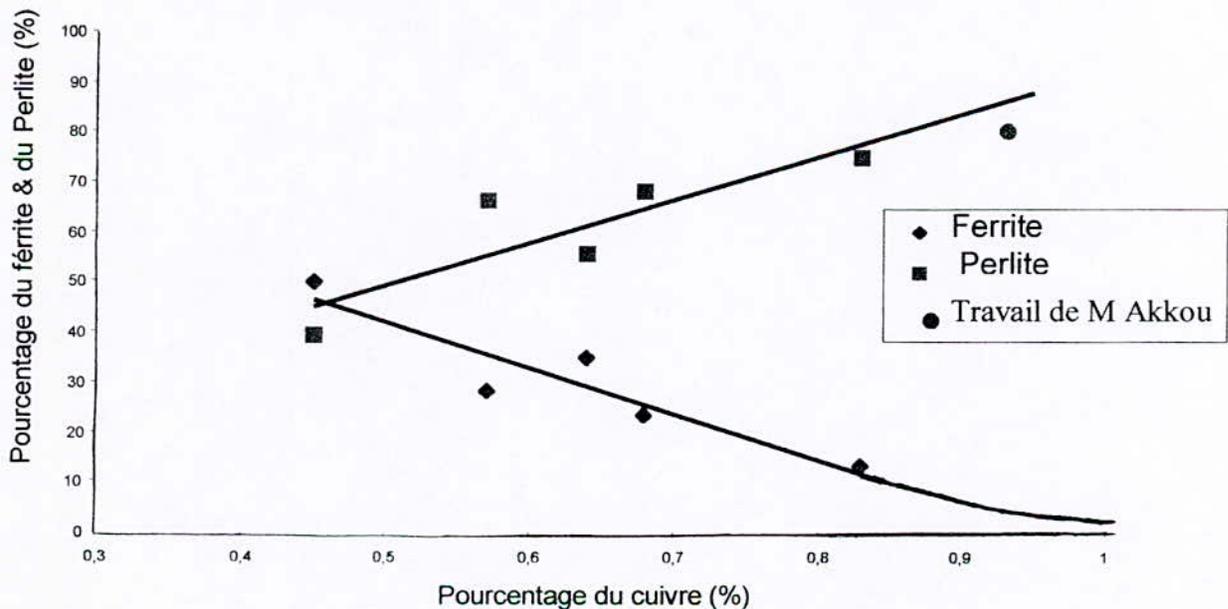


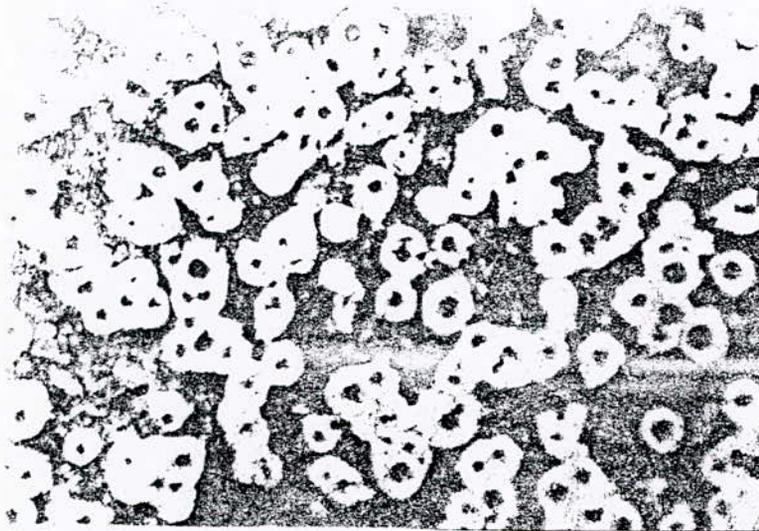
Fig III-7 : Fraction volumique du ferrite & du perlite en fonction du cuivre

(a)
Echantillon non attaqué



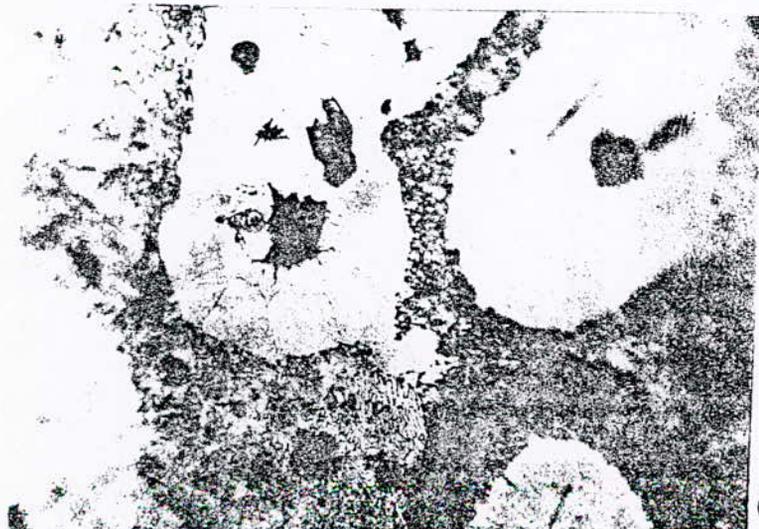
(x 130)

(b)
Echantillon attaqué



(x 130)

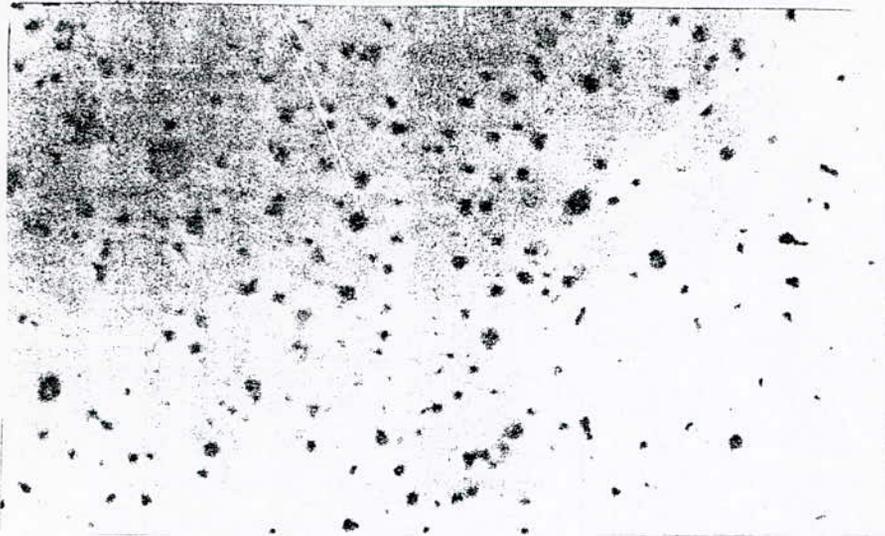
(c)



(x 642)

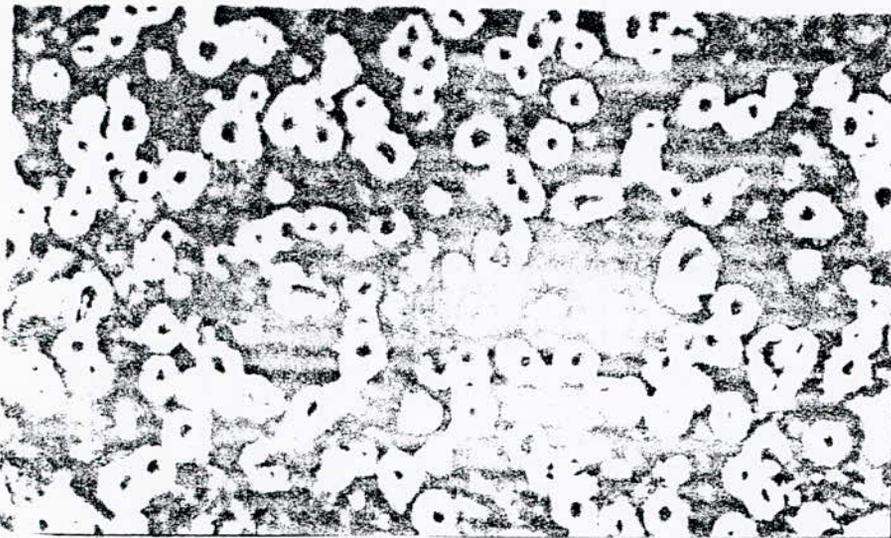
Figure III-1 : Fonte à 0,45 % de cuivre

(a)
chantillon non attaqué



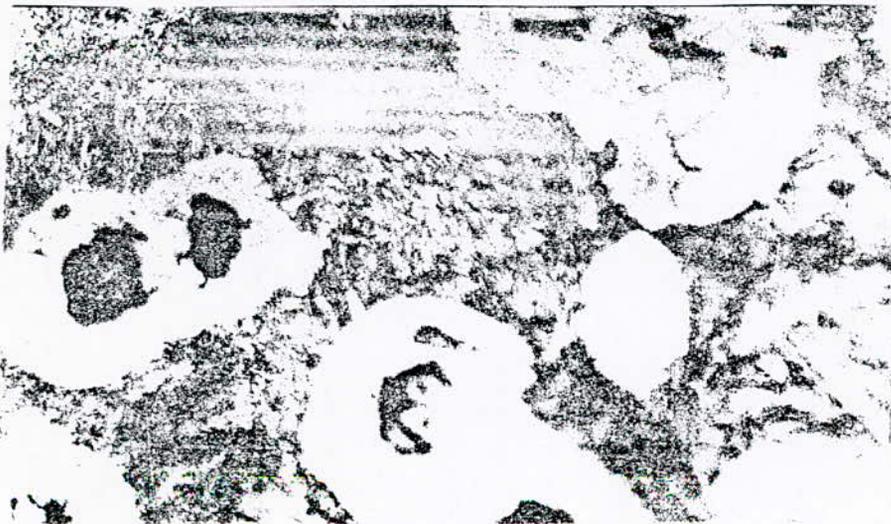
(x 130)

(b)
Echantillon attaqué



(x 130)

(c)



(x 642)

Figure III-2 : Fonte à 0,57 % de cuivre

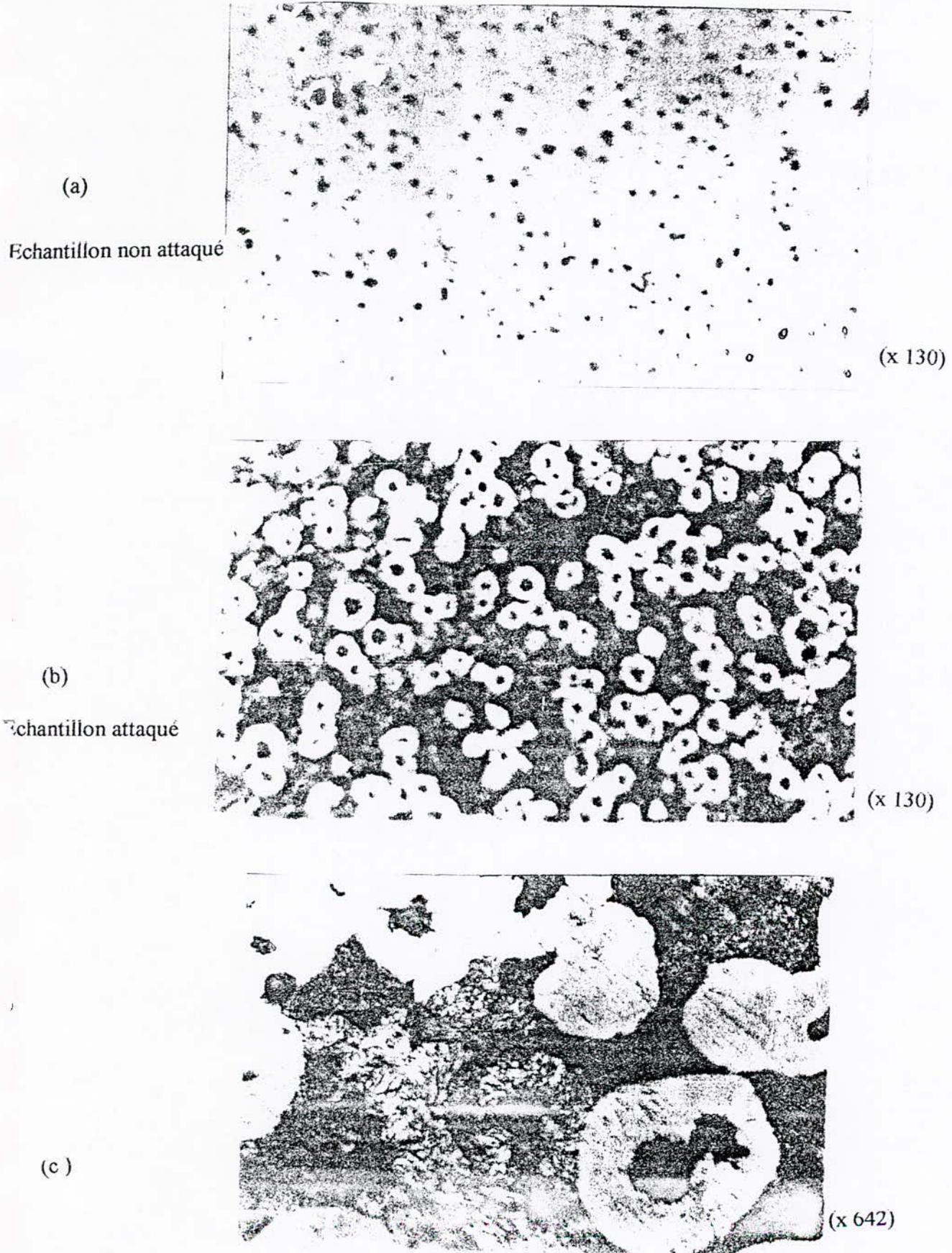
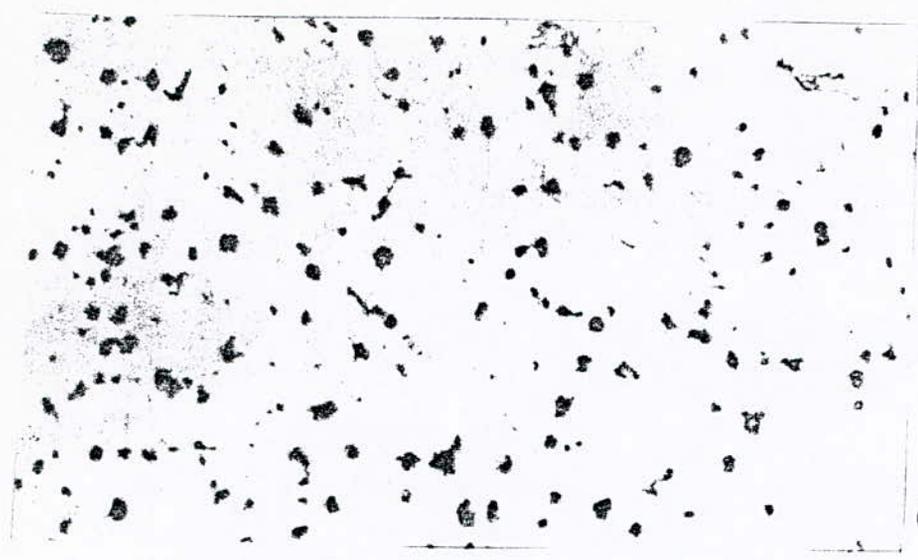


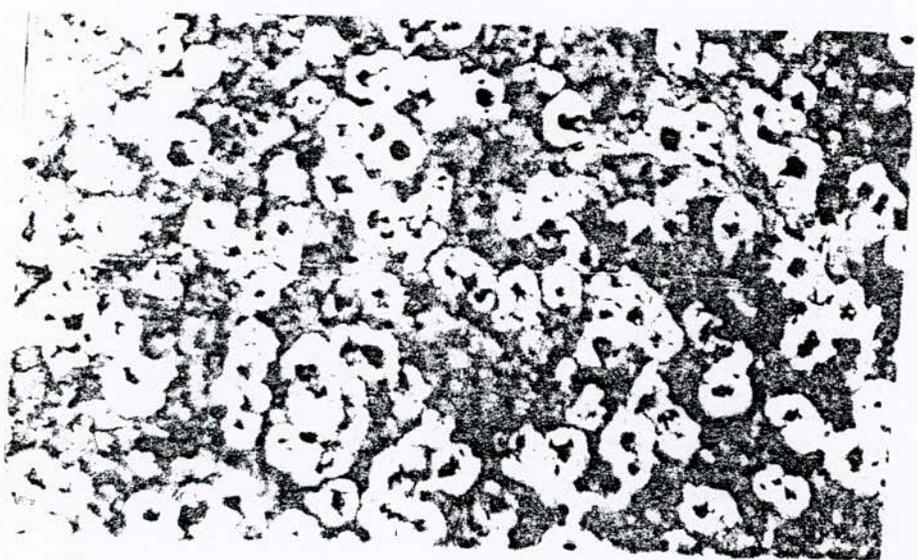
Figure III-13 : Fonte à 0,64 % de cuivre

(a)
Echantillon non attaqué



(x 130)

(b)
Echantillon attaqué



(x 130)

(c)



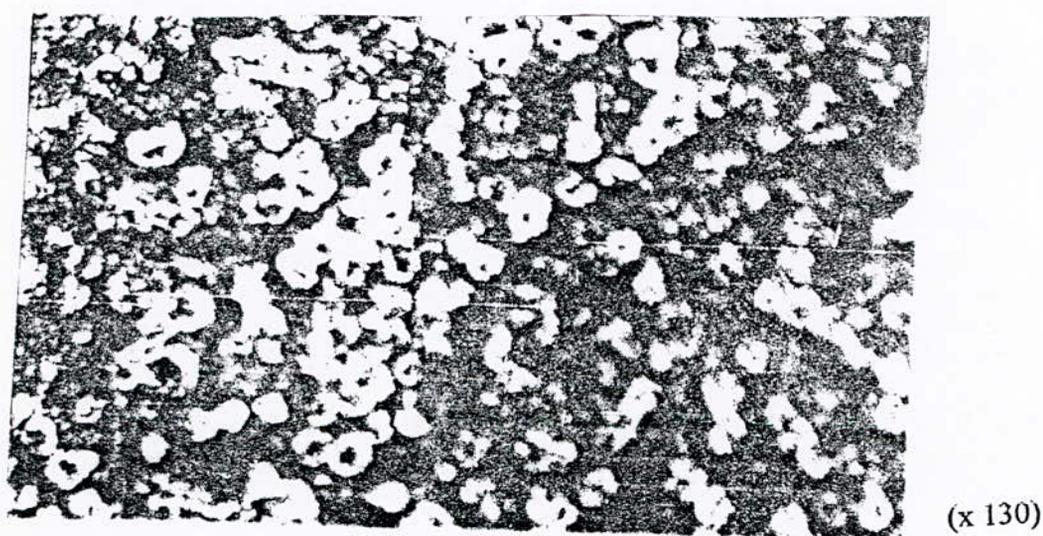
(x 642)

Figure III-4 : Fonte à 0,68 % de cuivre

(a)
Echantillon non attaqué



(b)
Echantillon attaqué



(c)



Figure III-5 : Fonte à 0,83 % de cuivre

III-4 INFLUENCE DU CUIVRE SUR LA DURETE ET LA RESILIENCE :

Le tableau ci dessous donne les résultats des tests de la dureté et de la résilience en fonction de la teneur en cuivre.

Tableau III-3 : Résultat des tests de dureté et résilience

Cuivre	Dureté (HB)	Résilience daj/cm2
0.45	211.5	1.03
0.57	222.5	0.731
0.64	227	0.68
0.68	231	0.593
0.83	242.5	0.75

Ces résultats sont montrés graphiquement sur la figure III-8, et III-9 pour la dureté et la résilience respectivement.

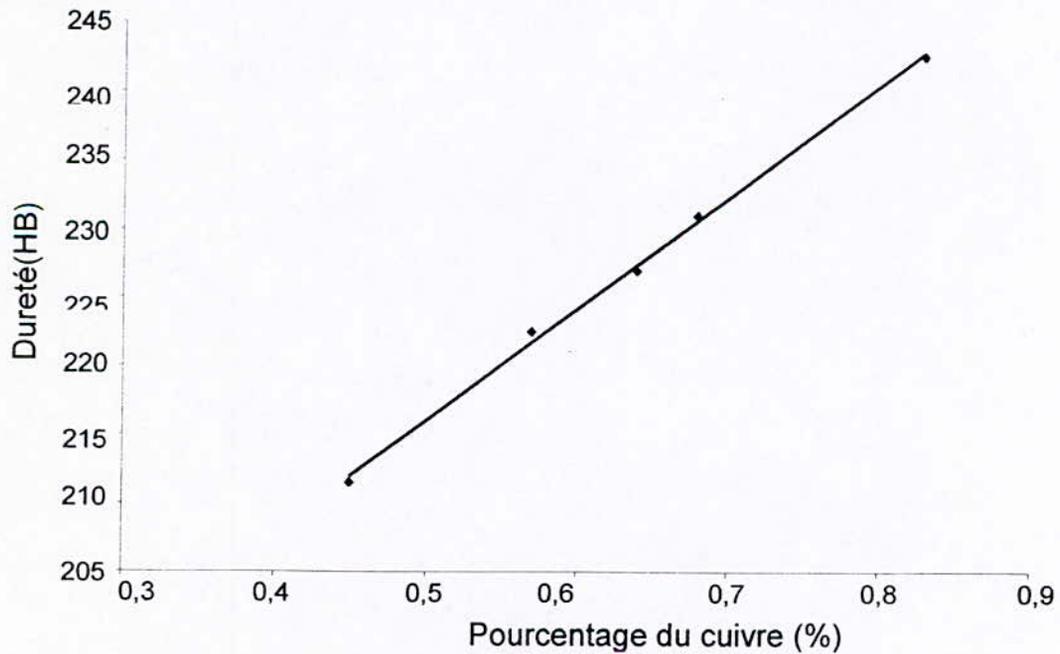


Fig III-8 : Variation de la dureté en fonction du pourcentage de cuivre

La fig III-8 illustre la variation de la dureté en fonction du pourcentage du cuivre. On remarque que l'augmentation de la dureté est en fonction de l'augmentation du pourcentage du cuivre.

Cela est dû à l'effet perlitisant du cuivre qui augmente la fraction de la perlite qui est une phase plus dure que la ferrite d'où l'augmentation de cuivre engendre une augmentation de la phase perlitique cette dernière élève la dureté.

Aussi on constate que les caractéristiques de résistance aux chocs et la dureté sont étroitement liées entre elles :

L'augmentation de l'une provoque la diminution de l'autre et vis-versa. Ces propriétés sont les résultats directs de la microstructure qui est grandement influencé par la teneur en cuivre comme montré précédemment.

Les fontes ferritiques à graphite sphéroïdal ont une capacité de déformation élevée, présentant les plus hautes valeurs de résistance au choc.

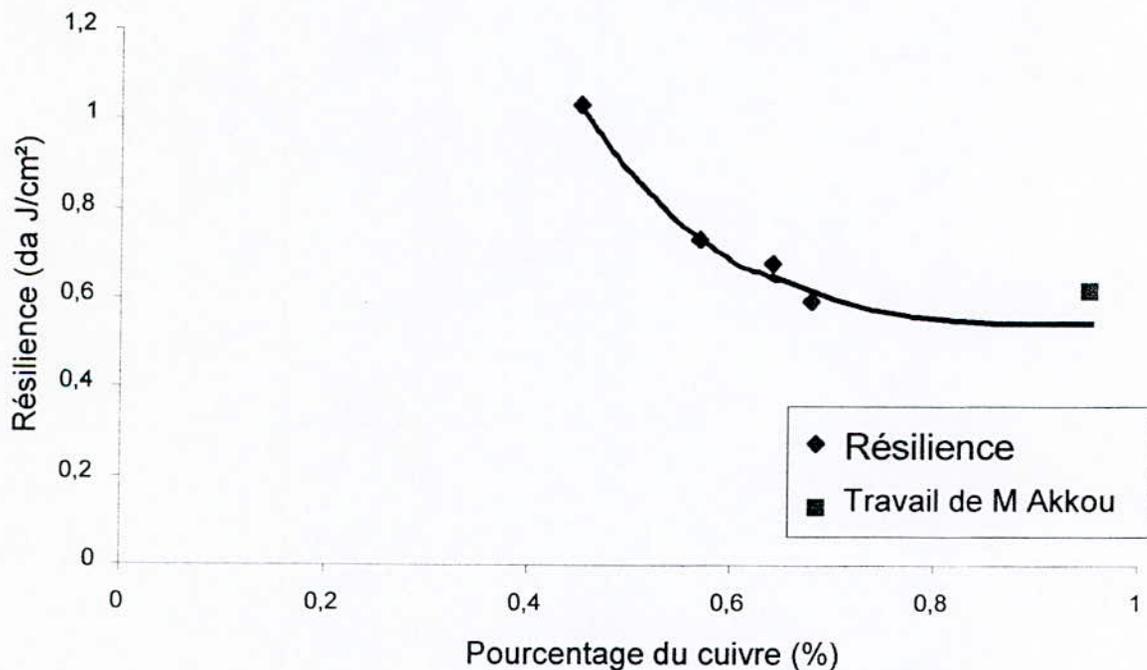


Fig III-9 : Variation de la résistance en fonction du pourcentage du cuivre

La fig III-9 : On remarque que la résilience diminue à mesure que la teneur en cuivre augmente ce qui implique que la ductilité diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage de cuivre, comme déjà mentionné, si la phase ferritique donne à la fonte une haute valeur de résilience au choc, donc le contraire se produit en présence de la phase perlitique qui donne des valeurs faibles de résistance au choc à ces fontes.

C'est le résultat logique de l'influence du cuivre sur le rapport ferrite-perlite dans les fontes (G.S).

Finalement il est utile de mentionner ici que des travaux sur les fontes (G.S) effectués par M.AKKOU [17] ont aboutit à des résultats allant dans le même sens que les nôtres. Ainsi une fonte élaborée par M.AKKOU avec une teneur en cuivre égale à 0.95% de cuivre a donné les résultats suivants :

Pourcentage de perlite $\approx 78\%$
 dureté = 247 HB
 Résilience = 0.62 da J/cm².

Les résultats à l'exception de la résilience sont sensiblement supérieurs à ceux de notre fonte ayant un pourcentage de cuivre de 0.83% et dont les propriétés sont les suivantes :

Pourcentage de perlite $\approx 74\%$
 dureté = 242 HB
 Résilience = 0.75 da J/cm².

D'ici on peut affirmer logiquement que la résilience de 0.75 da J/cm² obtenue pour notre fonte constitue une erreur de mesure.

III-5 INFLUENCE DU POURCENTAGE DE CUIVRE SUR LA RESISTANCE A LA TRACTION :

Tableau III-4 : Résultat des tests de la résistance à la traction et l'allongement

Pourcentage de cuivre (%)	Limite élastique (da N/mm ²)	Résistance a la traction (da N/mm ²)	Allongement (%)
0.45	39	56.87	9.28
0.57	40.95	58.165	8.57
0.64	42.25	62.06	7.86
0.68	42.89	61.64	7.77
0.83	44.35	63.79	7.14

La figure III-10(page suivante), montre l'influence de la teneur en cuivre sur la résistance à la rupture des fontes élaborées. Ainsi comme attendu, la résistance a la rupture augmente en fonction de la teneur en cuivre et ce conformément à l'influence de ce dernier sur la fraction de la perlite dans la fonte, qui augmente linéairement à l'influence de ce dernier sur la fraction de la perlite dans la fonte, qui augmente linéairement avec l'augmentation du cuivre, comme montré dans la figure III-10. Sachant que la phase perlitique est plus dure que la phase ferritique il en découle que plus le pourcentage de cuivre augmente, plus la fraction de perlite augmente, plus leurs fontes sont plus durs et par conséquent leur résistance à la rupture sont plus grande.

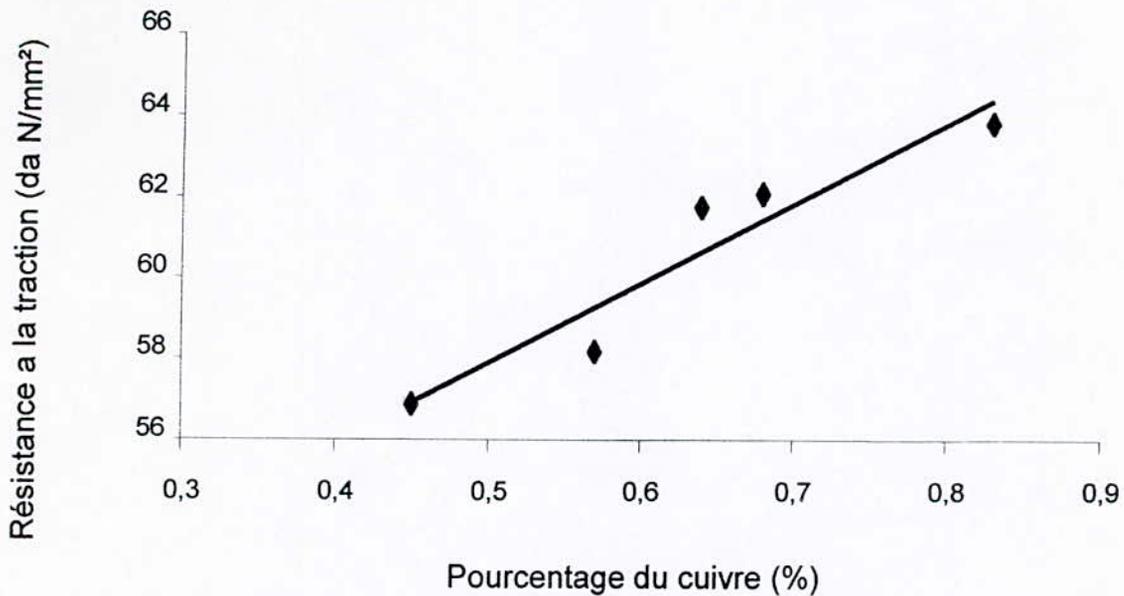


Fig III-10 : Vriation de la résistance a la traction en fonction du pourcentage du cuivre

III-6 INFLUENCE DU POURCENTAGE DE CUIVRE SUR L'ALLONGEMENT :

A l'inverse de ce qui a été dit ci-dessus, une teneur en cuivre plus grande donne des allongements plus faibles aux fontes élaborées Fig III-11. L'explication de ce comportement réside toujours dans l'action perlitisante du cuivre.

Ainsi, une fonte à bas de cuivre possède une microstructure majoritairement ferritique.

Sachant que cette phase est moins dure et plus malléable que la perlite, il est donc logique que des fontes ferritiques- perlitiques, ayant un allongement plus grand que les fontes perlito-ferritiques.

Une augmentation de la teneur en cuivre provoque des effets inverses comme le montre le résultat en fig III-11.

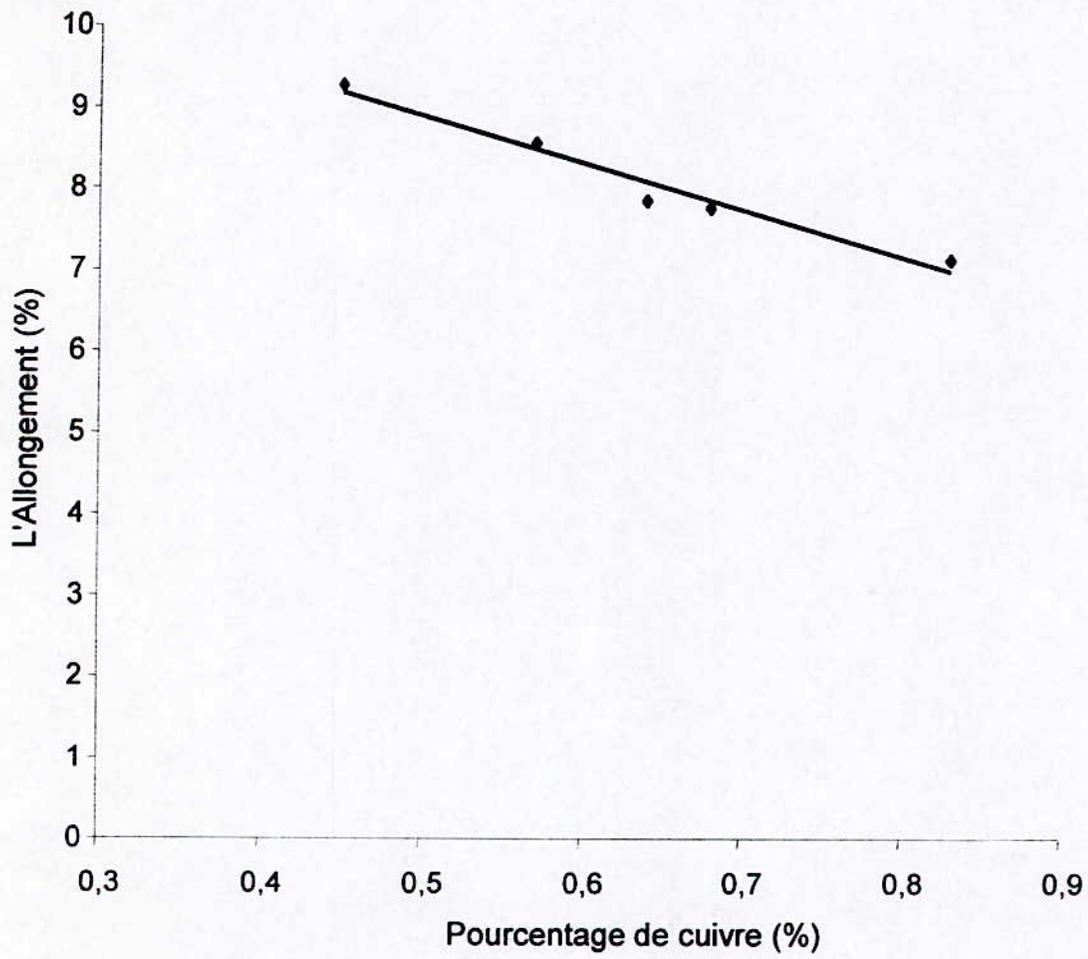


Fig III-11 : Variation de l'allongement en fonction du pourcentage de cuivre

III-7 INTERPRETATION DES RESULTATS DU L'ESSAI B :**III-7-1 MICROGRAPHIE :**

La figure III-12 (a), (page suivante) montre la morphologie du graphite dans les fontes élaborées avec 0.6%de manganèse et un pourcentage de cuivre très faible. On constate comme pour les autres essais que la fonte de graphite est presque entièrement sphéroïdal, avec une distribution uniforme des sphéroïdes de graphite. Sa fraction volumique est de l'ordre de 17.25%.

En comparant cette microstructure avec celle des autres essais où on a introduit de cuivre, on remarque que la quantité de graphite primaire est plus grande par apport au secondaire. Par contre pour les tests avec une haute teneur en cuivre où on observe la quantité du graphite secondaire et plus grande que le graphite primaire. Ceci illustre que le manganèse est un élément fortement graphitisant que le cuivre. La figure III-12 (b) :

Cette structure met en évidence la structure perlite-ferritique ou la proportion de la ferrite est 29.75% et celle de la perlite 53%.

Cette figure est similaire aux autres figures des fontes où on a introduit du cuivre. La seule différence est seulement dans la quantité de perlite et de ferrite. Dans la figure III-12 (c) avec un plus grand grossissement met en évidence les lamelles de la perlite.

III-7-2 CARACTERISTIQUES MECANIQUES :

Le tableau ci-dessous donne les résultats des caractéristiques mécaniques de la fonte élaboré

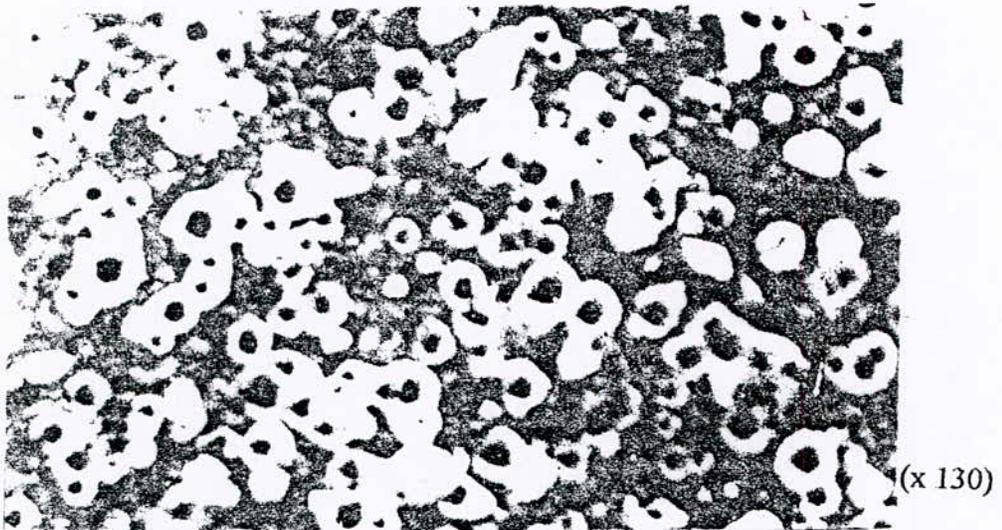
ESSAI	Limite élastique (da N/mm ²)	Résistance a la traction (da N/mm ²)	Allongement (%)	Dureté HB	Résilience (daJ/cm ²)
B	48.8	59.9	8.57	229	0.71

A l'exception de la résilience tous les résultats se conforment à la norme.

(a)
chantillon non attaqué



(b)
Echantillon attaqué



(c)

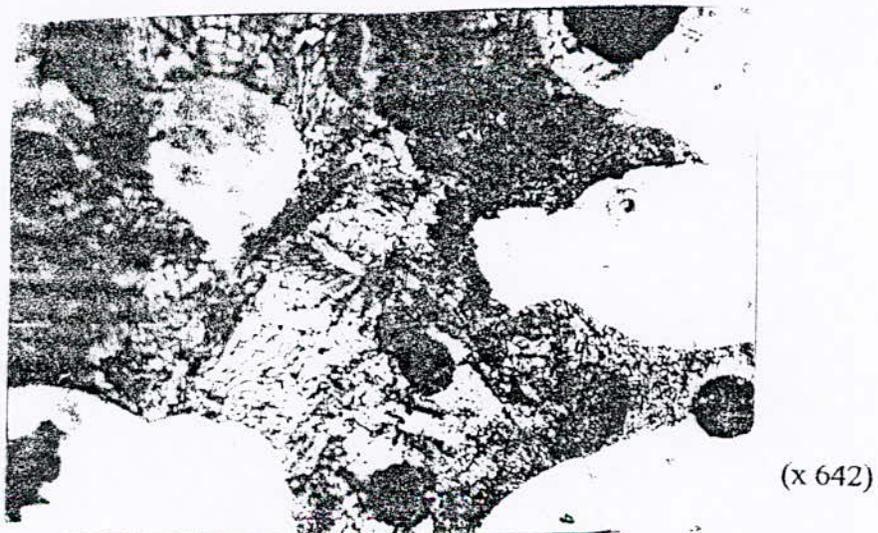


Figure III-12 : Fonte à 0,60 % de manganèse

CONCLUSION

Conclusion et suggestions pour travaux ultérieurs:

Les résultats de nos investigations ont montré comme attendu, que le cuivre est un élément chimique non graphitisant mais fortement perlitisant. Le pourcentage du précipité du graphite est presque insensible à l'augmentation en teneur du cuivre. Cependant, la fraction volumique de la perlite augmente de 50 à 90 % quand la teneur en cuivre de la fonte varie de 0,45 à 0,83 % respectivement.

Evidemment puis que la phase perlitique est plus dure que celle de la ferrite, il s'ensuit une amélioration sensible de la dureté et de la résistance à la rupture. En revanche l'allongement et la résilience, se trouvent sensiblement réduits pour les mêmes raisons. Ainsi à la lumière des résultats obtenus, nous pouvons dire que l'objectif de notre étude a été atteint, puisque nous avons réussi à obtenir une fonte avec une forte fraction de perlite qui donne à cette fonte des propriétés mécaniques conformes au cahier de charge de l'U.F.R sans aucun traitement thermique.

Ces résultats sont satisfaisants dans l'intervalle de cuivre [0.45-0.83] à l'exception de la résilience qui ne tombe dans le cahier de charge que pour la borne inférieure de l'intervalle de cuivre. Pour cette raison, nous proposons à l'U.F.R d'utiliser un pourcentage de cuivre ne dépassant pas les 0.5 %.

D'autre part nous proposons de faire d'autres études en jouant cette fois-ci sur l'influence de la variation du manganèse sur la structure de la fonte avec un pourcentage de cuivre faible, ainsi que sur la vitesse de refroidissement.

Cette étude permettra certainement d'aboutir à une meilleure combinaison entre les pourcentages du cuivre, du manganèse et une certaine vitesse de solidification sur la structure optimale et les propriétés mécaniques correspondantes et conformes à l'usage et aux normes.

• REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] P. Borel – Propriétés des fontes à graphite modulaire
technique de l'ingénieur M 392, 1984 Page 1 à 3.
- [2] J. C Margerie – Elaboration des fontes
technique de l'ingénieur M 760, 1995 P. 12-15
- [3] P. Cuenin – Métallurgie des alliages de fonderie
technique de l'ingénieur M 3520, 1990 p. 2-15
- [4] P. Balcouche – Fonderie : Mémento de Métallurgie appliquée Paris 1976 p. 50-80
- [5] H LEIRIS – Métaux et alliages p.160-170
- [6] J. Barralis – Précis de métallurgie Ed. Nathan Paris 1990 p.50-60
- [7] Lakhine Métallographie et traitement thermiques des métaux. Ed. Mir Moscou 1978
p.140-150
- [8] Gérer – Métallurgie de fonderie. Ed. Eyrolles 1978 p.150-160
- [9] A. ROOS et B. MILET– Précis de métallurgie appliquée 1978 P.120-125
- [10] I. Minkoff – The physical metallurgy of cast iron A. WILAY – Interscience Publication
1983 p.35-40.
- [11] J – Lacaze – Formation des structures dans les fontes ferrito-perlitiques à graphite
sphéroïdal. Revue de métallurgie –CIT/ Science et Génie des Matériaux. Mai 1996.
P.643-645
- [12] W.A. OLDFIELD – Trans of the ASM, 1966 p.945-961
- [13] J.M THERET and J. LESOULT – Hommes et Fonderie, 1984 p.19-30.
- [14] Norme AFLOR NF A 32-201, A 03-151, NFA 03-201, NFA 03-156.
- [15] V. COCHARD et Al – Actes de la Conférence « Cast iron »
- [16] M. CASTRO et Al – Actes de la Conférence annuelle de la DGM information
gesellschaft –Verlag, 1988 p.225-233.
- [17] M. AKKOU – Elaboration des fontes à graphite sphéroïdal (FGS 500-7) et (FGS 600-3).
Brutes de Coulée, 1992.