

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : METALLURGIE



PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE L'AMELIORATION
DE L'ELABORATION D'UNE
FONTE GRISE DANS LE CUBILOT

Proposé par :

SNTF

Etudié par :

BOUTCHEBAK
MOHAMED

Dirigé par :

M^r MESRATI

PROMOTION

JUIN 91

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste travail

à ma mère .

à la mémoire de mon grand père .

à mes soeurs .

à mes oncles et tantes .

à tous mes proches .

à mes amis .

BOUTCHEBAK MOHAMED

REMERCIEMENT

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je tiens à remercier vivement tous les professeurs du département Métallurgie qui ont contribué à ma formation, en particulier mon promoteur Monsieur MESRATI qui m'a aidé tout au long de l'élaboration de ce sujet de fin d'étude.

J'exprime ma gratitude à l'ensemble du personnel de la fonderie de la SNTF umma Hamma, en particulier Monsieur FOKHDANI.

Je remercie également le personnel de SNVI/UFR et SNVI/CVI qui m'ont beaucoup aidé.

Enfin sans oublier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

PLAN DE TRAVAIL
~~~~~



Introduction  
~~~~~

Partie théorique
~~~~~

Chapitre I : Généralités sur les fontes  
~~~~~

Chapitre II : Fontes grises lamellaires
~~~~~

- II.1 Mécanisme de solidification
- II.2 Mécanisme de formation des lamelles
- II.3 Propriétés structurales de la fonte grise lamellaire.
- II.4 Morphologie du graphite.
- II.5 Influence des divers facteurs sur la structure.
  - II.5.1 Composition chimique.
  - II.5.2 Condition de refroidissement.
  - II.5.3 Surfusion et moclulation.

Chapitre III: Caractéristiques mécaniques et utilisation des fontes grises.  
~~~~~

Chapitre IV : Elaboration de la fonte grise.
~~~~~

- IV.1 Appareil pour fusion de la fonte : cubilot à vent froid.
- IV.2 Fonctionnement du cubilot.
- IV.3 Différentes zones du cubilot.
  - IV.3.1 Paramètres du cubilot.

#### IV.4 Lit de fusion.

IV.4.1 Allumage du cubilot.

IV.4.2 Chargement du cubilot.

#### Partie expérimentale ~~~~~

Chapitre I : Calcul du lit de fusion et techniques  
~~~~~  
expérimentales.

I.1 Calcul du lit de fusion.

I.2 Techniques expérimentales.

Chapitre II : Résultats et interprétations.

Conclusion.

INTRODUCTION

Introduction

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

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

Les très nombreuses applications des fontes grises reposent sur un ensemble de propriétés remarquables : résistance aux contraintes statique , faible sensibilité à l'entaille et résistance à l'usure .

Les fontes grises permettent l'obtention par coulée de formes compliquées et elles ont une excellente usinabilité.

L'utilisation de méthodes précises garantit des qualités très régulières . Dans ce contexte , le présent travail entre dans le cadre d'une étude d'amélioration de l'élaboration de la fonte grise lammellaire pour sabots de frein élaborée à la fonderie Umma-Hamma (SNTF) .

Cette étude a pour but la normalisation de la composition chimique , de la fonte élaborée dans le cubilot , afin de répondre aux exigences technique des chemins de fer ; et permettre de trouver la structure donnant de meilleures caractéristiques mécaniques avec le moins de défauts possibles

Le travail effectué est de faire une analyse de tous les éléments de la charge du cubilot et de refaire le calcul du lit de fusion en prenant en considération les données théoriques et expérimentales afin d'obtenir une fonte ayant les spécificités voulues . Ensuite faire une comparaison entre la fonte obtenue dans le cadre de l'étude et celle élaborée jusqu'à présent par la fonderie .

**PARTIE
THEORIQUE**

CHAPITRE I

Generalites sur les Fontes

Sous le vocable fontes on désigne les alliages fer-carbone dont la teneur est généralement comprise entre 2,3 % et 4 %. Au moment de la solidification, il se forme un eutectique qui, par décomposition au cours du refroidissement, donne un élément insoluble dans l'austénite constitué soit par du carbone pur (graphite), soit par du carbone combiné ou carbure de fer (cémentite) et dont la présence caractérise les fontes. Selon les conditions d'élaboration d'une part et selon la composition chimique et la vitesse de refroidissement d'autre part, la fonte peut se solidifier, puis se refroidir en suivant le diagramme d'équilibre métastable (fer-cémentite) lorsque la vitesse de refroidissement est très rapide, soit le diagramme d'équilibre stable (fer-graphite) lorsque le refroidissement est lent.

I.1 Fontes blanches. Fontes grises

Il existe plusieurs catégories de fontes dont les plus couramment utilisées en fonderie ont une teneur en carbone comprise entre 2,50 et 3,75 %; leurs teneurs en silicium, variable de 0,50 à 3 %, permet de distinguer au départ deux grandes familles de fontes :

I.1.1 Fontes blanches : à cassure blanche dont la teneur en silicium est inférieur à 1,25 %, suivent le diagramme métastable fer-carbure de fer. Ces fontes étant recherchées pour leur grande dureté obtenue à l'état brut de coulée, ne sont utilisées que dans un nombre limité d'applications.

I.1.2 Fontes grises : à cassure grise dont la teneur en silicium est habituellement comprise entre 1,25 et 2,75 % suivent le diagramme stable fer-graphite. La fonte grise est un alliage ternaire fer-carbone-silicium [1]. La structure de ces fontes comprend du graphite en lamelles et une matrice métallique, qui suivant la vitesse de refroidissement et l'analyse chimique est constituée soit de perlite et de ferrite, soit de perlite seule, soit de perlite et de cémentite.

Les fontes grises ont des domaines d'utilisation beaucoup plus vastes par suite de la gamme de structures qu'elles présentent. Leur analyse chimique et leur propriétés mécaniques sont très variables selon le genre d'application.

I.2 Fontes à graphite sphéroïdal

Les métallurgistes cherchaient à obtenir à l'état brut de coulée une fonte qui présenterait les avantages d'élaboration et de coulabilité de la fonte grise et des caractéristiques, résistance et ductilité, proches de celles de l'acier grâce à une addition de magnésium dans la fonte hypoeutectique ($C_{eq} < 4,3 \%$) suivie d'une inoculation de ferro-silicium on obtient une fonte dont le graphite se présente sous forme de nodules sphéroïdaux à contours lisses.

Les caractéristiques mécaniques dépendent essentiellement de la matrice. Ces fontes possèdent, en outre, les mêmes avantages que présentent les fontes usuelles: bonne coulabilité et usinabilité aptitude à amortir les vibrations, haute tenue à l'usure, etc...

Elles constituent en somme un matériau intermédiaire entre la fonte grise et l'acier moulé.

La composition chimique courante d'une F.G.S (norme Française AFNOR) est la suivante :

C = 3,4 à 4 % ; Si = 2 à 3 % , Mn = 0,1 à 0,8 %
P < 0,01 % ; S < 0,02 % ; Mg = 0,02 à 0,1 %

I.3 Fontes truitées

~~~~~  
Pour des conditions intermédiaires de vitesse de refroidissement, l'alliage peut suivre le diagramme stable pendant la solidification puis passer ensuite au diagramme d'équilibre métastable pendant le refroidissement. Dans ce cas la structure finale est mixte on trouve alors du graphite libre et de la cémentite libre et de la perlite. Cette nuance accidentelle n'a pas d'application industrielle [2] .

# CHAPITRE II

Fontes Grises  
Lamellaires

C'est un alliage ternaire Fe-C-Si qui contient comme impuretés inévitables Mn, P et S.

La forme graphitique est une caractéristique de cette fonte qui détermine un certain nombre de ses propriétés.

#### II-1 Mécanisme de solidification ~~~~~

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

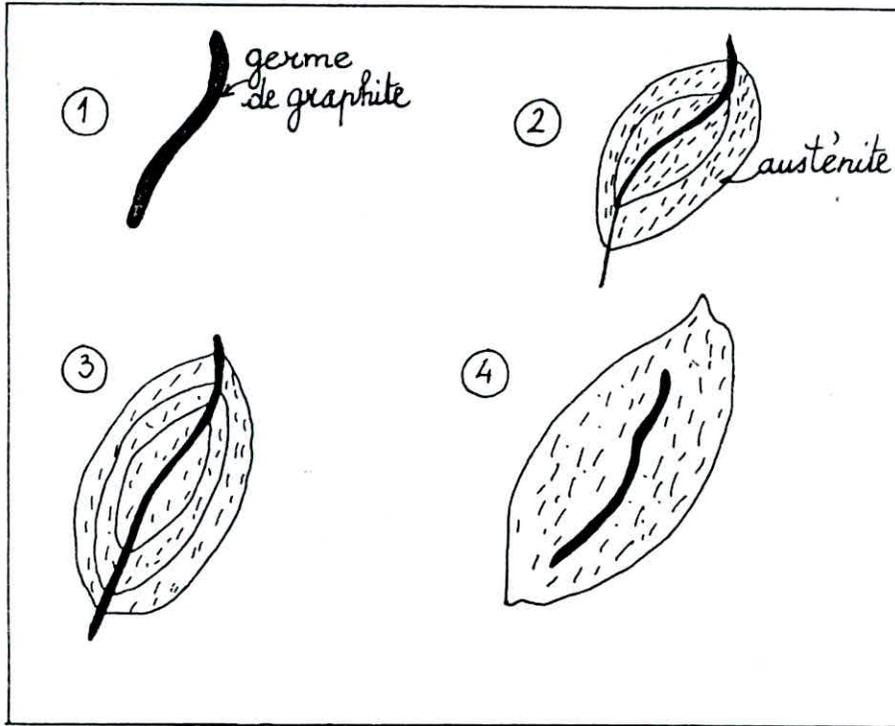
#### II-2 Mécanisme de formation des lamelles. ~~~~~

Selon A. Desy et J. Vidts [ 3].

Le graphite lamellaire prend naissance et se développe au sein du liquide eutectique (figure 1).

Au cours du refroidissement suffisamment lent, le liquide eutectique se solidifie en graphite et austénite. A chaque lamelle d'austenite correspond une lamelle de graphite qui pour son développement exige une diffusion des atomes de carbone du liquide qui l'entoure.

La phase austénite se développe plus vite et enrobe la lamelle de graphite. De nouveaux germes de graphite apparaissent aux extrémités des lamelles d'austenite. Rapidement cernés par l'austenite, ils se développent surtout radialement en recevant des atomes de C, il n'y'a pas de croissance en longueur car la diffusion à l'état solide étant très lente.



Mécanisme de cristallisation du graphite lamellaire dans le liquide eutectique ( figure 1)

### II-3 Propriétés structurales de la fonte grise lamellaire.

La structure des fontes grises a une incidence très importante sur leurs caractéristiques. Elle dépend des vitesses de solidification et de refroidissement.

Les fontes grises sont constituées d'une matrice perlitique, ferrito-perlitique ou ferritique dans laquelle sont présentes des lamelles de graphite et des zones d'eutectique phosphoreux, comme c'est le cas pour la fonte étudiée.

Les propriétés de ces fontes varient très largement avec les caractères du graphite.

A - Ferrite : Solution solide d'insertion de carbone dans le fer (CC) ou (CFC). Elle est peu résistante et de faible dureté. La ferrite est très ductile (A=35 %), facilement usinable.

B - Cémentite : la caractéristique essentielle de la cémentite est sa dureté élevée ( HB de l'ordre 700 à 800 ). Etant très fragile sa résistance mécanique est difficilement mesurable.

C - Perlite : C'est un agrégat de deux phases (ferrite et cémentite).

Les caractéristiques mécaniques de la perlite dépendent avant tout de sa finesse. La matrice perlitique est obtenue avec une vitesse de refroidissement rapide, les lamelles de perlite sont très minces, la résistance au cisaillement s'accroît et la perlite devient plus dure et plus résistante

(Rm = 75 - 95 daN/mm<sup>2</sup> et HB = 200-300)

D - Steatite : C'est un constituant d'inclusions solides dures d'un eutectique phosphoreux ternaire. Il est souvent reparti en réseau autour des cellules eutectiques. Sa dureté varie de 400 à 600 HB.

En l'absence de cementite libre, il constitue la partie la plus dure du métal. HB voisine de 600

#### II-4 Morphologie du graphite

Sur la forme et les dimensions du graphite influent divers facteurs, entre autres le pouvoir de germination du bain et le titre en carbone de la fonte. on distingue six formes de graphite [ 4 ] repérées par des chiffres ( I à VI ), la forme I correspond au graphite lamellaire, cette forme est classée en 5 types :A, B, C, D, E assortis d'une indication sur la dimension des lamelles (AFNOR-FDA 32-101) :

- Type A : graphite en lamelles réparties uniformément.
- Type B : graphite en rosettes.
- Type C : graphite en lamelles grossières et en amas.
- Type D : Graphite interdendritique sans orientation préférentielle ou de surfusion.
- Type E : graphite interdendritique orienté.

Les types A,B,D,E se rencontrent dans les fontes grises lamellaires hypo-eutectiques, par contre le type C, se trouve dans les fontes grises lamellaires hypereutectiques [ 5 ].

## II- 5 Influence des divers facteurs sur la structure

### II-5-1 Composition chimique.

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

Ces éléments peuvent être classés en comparant leur influence sur le comportement du carbone en leur présence au moment de la solidification. Ceux qui ont tendance à favoriser la précipitation du carbone sous forme de graphite, qui sont les plus importants pour le cas de notre fonte, sont appelés graphitisants.

Les plus courants sont : Si,P,Al,Ni,Cu.

Ceux qui ont tendance à maintenir le carbone sous forme combiné sont appelés anti-graphitisants ou encore stabilisants des carbures les plus courants sont Mn, Cr, Mo, V.

Dans la composition de la fonte étudiée, les éléments anti-graphitisants à part le manganèse se trouvent sous forme de traces, ce qui est justifiable pour une fonte grise.

#### - Carbone

Les fontes grises courantes ont une teneur totale en carbone  $C_t$  généralement comprise entre 2,8 et 3,8 % une partie de ce carbone reste combinée au fer pour donner la cémentite de la perlite, structure recherchée dans le cas de notre étude, c'est le carbone combiné  $C_c$  (0.7 % environ ).

Le reste précipite sous forme de graphite lamellaire libre de couleur noire:

C'est le carbure graphititique  $C_g$  d'où la relation  $C_t = C_c + C_g$

Le carbone améliore la coulabilité des fontes grises; il est d'une grande importance parmi tous les éléments graphitisants en changeant sa teneur on obtient souvent tel ou tel degré de graphitisation désirée de la fonte.

#### - Silicium ~~~~~

Le silicium exerce une influence directrice essentielle sur le passage du système métastable au système stable [ 6 ]. sa présence est indispensable pour la précipitation du carbone en graphite .

Le Silicium accroît la coulabilité et la résistance de notre fonte et réduit sa tendance aux tapures. La teneur en carbone total et celle en Silicium doivent varier en sens inverses afin d'éviter d'amoinrir les propriétés mécaniques par une teneur en carbone graphitique (Cg) élevée.

#### - Phosphore ~~~~~

Dans les fontes industrielles courantes, la teneur en phosphore est comprise entre 0.03 % et 1.2 % [ 7 ] ce qui amène, par analogie avec la classification des producteurs de fonte neuve à distinguer entre les fontes hématites (  $P < 0.15$  %) et les fontes phosphoreuses (  $P > 1$  %).

Pour le cas de la fonte phosphoreuse étudiée, d'après l'union internationale des chemins de fer le pourcentage de phosphore doit être compris entre 1,35 et 1,55 %.

Le phosphore élément graphitisant, améliore très sensiblement la coulabilité de la fonte et augmente légèrement ses résistances

mécaniques. Lorsque la teneur en phosphore dépasse 0,2%, il y a formation d'une eutectique ternaire de composition approximative

$$C \approx 2\% ; P \approx 6,90\% ; Fe \approx 91,1\%$$

Cela indique l'importante tendance à la ségrégation du phosphore dans les alliages ferreux.

Le phosphore de fer qui se forme au cours de la solidification d'une fonte est le plus souvent accompagné de cémentite; ces deux phases forment avec l'austenite un mélange, eutectique ternaire, à bas point de fusion (953°C) appelé stéadite.

La fonte élaborée à la fonderie de la SNTF-Hamma présente une teneur élevée en phosphore ceci provoque la formation d'importantes quantités d'eutectique ternaire à bas point de fusion, ce qui améliore considérablement la coulabilité de notre fonte et la rend plus résistante à l'usure.

#### - Manganèse et soufre

Le manganèse à peu d'influence sur la structure des fontes grises ordinaires, il affine la perlite. Son rôle essentiel est de neutraliser l'effet néfaste du soufre sur les propriétés mécaniques des fontes grises, par formation du Mns. Le soufre gêne la graphitisation et augmente la dureté de la fonte qui devient de plus en plus fragile. C'est pourquoi, dans l'obtention des fontes grises devant présenter des résistances mécaniques élevées, la teneur en soufre ne doit pas dépasser 0,15%.

La teneur en Manganèse doit répondre à la formule empirique :

$$Mn \% \geq 1,72 \times S\% + 0,30.$$

De façon à éviter la formation de FeS et de prévenir une fragilisation de la fonte.

Les résistances mécaniques des fontes grises sont plus élevées lorsque la teneur en Mn est voisine de 0,70 à 0,80 %, il y a donc intérêt à viser une teneur en soufre voisine de 0,10 % mais inférieure à 0,15 %.

Enfin pour tenir compte de l'effet des éléments de la composition de la fonte grise sur la position du point eutectique et afin de comparer les fontes grises entre elles, on utilise soit la notion de carbone équivalent  $C_{\text{éq}}$ , soit la notion d'indice de saturation  $Sc$ .

Le carbone équivalent  $C_{\text{éq}}$  est donné par la relation :

$$C_{\text{éq}} = C_{\text{total}} + 1/3 ( Si \% + P \% ).$$

L'indice de saturation nous permet de savoir si une fonte a un comportement hypoeutectique ou hypereutectique.

$$Sc = C_{\text{total}} / D\%$$

$$D\% = 4,25 - 0,31 Si - 0,25 P + 0,07(Mn-2S) - 0,16 Al - 0,31 Ti - 0,11 Ni - 0,10 Cu + 0,10 Mo + 0,31 Cr$$

pour  $C_{\text{éq}} > 4,3\%$  ou  $Sc > 1$  la fonte est hyper-eutectique.

pour  $C_{\text{éq}} < 4,3\%$  ou  $Sc < 1$  la fonte est hypoeutectique.

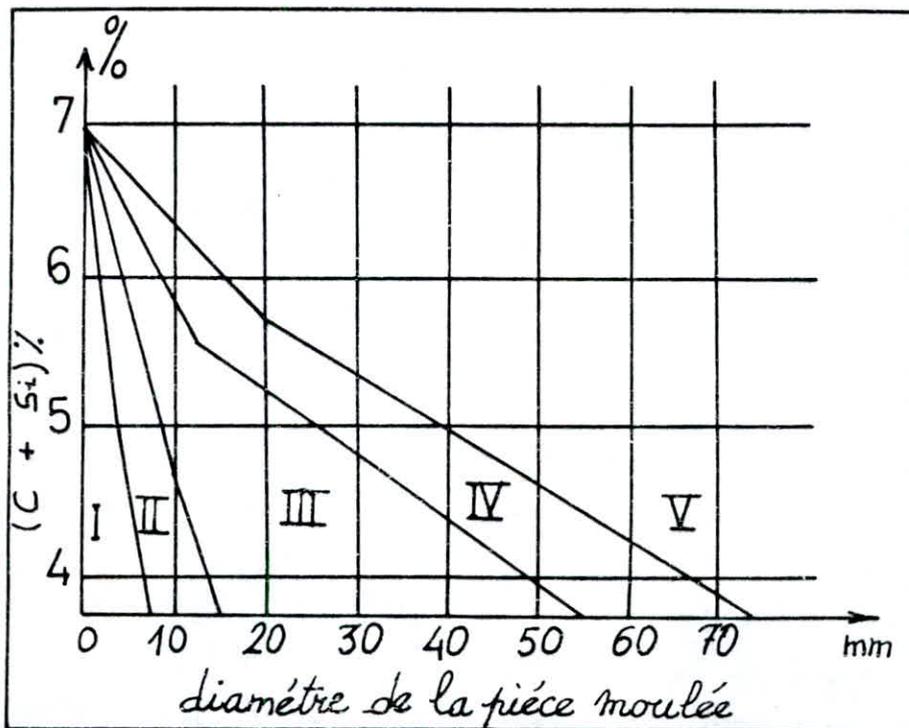
## II.5.2 Conditions de refroidissement.

Elles sont déterminées par divers facteurs tels que :

- Température de coulée : Pour des fontes grises, elle se situe dans l'intervalle (1300°C - 1400°C), celles-ci étant caractérisées par une bonne coulabilité: aptitude à bien remplir le moule et à se conformer aux détails de l'empreinte.

- Vitesse de refroidissement: La variation de la structure et la microstructure en fonction de la vitesse de refroidissement est une caractéristique originale des fontes grises. La vitesse de refroidissement est intimement liée à la diffusivité thermique du moule et à la massivité de la pièce.

Diagramme de Grenier



- I Fonte blanche
- II Fonte traitée
- III Fonte grise à matrice perlitique
- IV Fonte grise à matrice ferrito-perlitique
- V Fonte grise à matrice ferritique

### II.5.3 Surfusion et Inoculation

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

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

CHAPITRE III

Caracteristiques
Mecaniques et
Utilisation des Fontes
Grises

- Caractéristiques mécaniques des fontes grises

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



(fig 2) Répartition du graphite : effet d entaille

Les propriétés mécaniques varient selon le type de structure métallique. Il est établi que la meilleure structure correspond à celle où la matrice est entièrement constituée de perlite. Cette structure assure des résistances et duretés élevées, par contre la structure ferritique les diminue.

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

Le graphite joue le rôle de lubrifiant, améliore la tenue au frottement et diminue le risque de grippage, pour la même raison cet élément améliore l'usinabilité. Il confère à la fonte un coefficient d'amortissement des vibrations très élevé.

- Utilisation des fontes grises

Les très nombreuses applications des fontes grises reposent sur un ensemble de propriétés fondamentales : résistances aux contraintes statiques et aux efforts alternés, résistance à l'usure et résistance aux corrosions par les milieux humides et par les sols. Les pièces moulées en fonte constituent le tonnage le plus important et le plus varié des fabrications de fonderie par leur facilité d'être coulée et moulée. Leur usinabilité est excellente et leur prix de revient relativement bas. Nous rappelons quelques uns de leurs usages les plus traditionnels :

- Batiment, sanitaire, cuisine, baignoire, pièces de voirie.
- Résistance à la chaleur et aux choc thermique : creusets, pièce de four, moule de verrerie.
- Résistance mécanique : cylindre de laminoirs, machines-outils, matrices d'emboutissage, nombreuses pièces d'automobile (blocs-moteurs, chemises,...), poulies,...[9]

CHAPITRE IV

Elaboration de la
Fonte Grise

IV.1 Appareil pour fusion de la fonte

* Le cubilot à vent froid

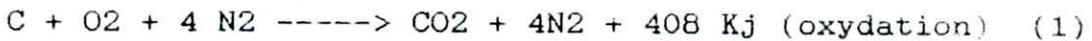
Le cubilot est l'un des plus anciens appareils de fusion et, quoique de nombreuses améliorations lui aient été apportées, sa forme générale a peu évolué. Le cubilot doit sa pérennité à son rendement thermique qui est supérieur à celui de tous les appareils de fusion.

Le rendement thermique peut atteindre 40%. Le cubilot doit cet avantage au fait que les charges métalliques sont intimement mélangées au remarquable combustible solide qu'est le coke, combustible qui permet d'obtenir des températures avoisinant 1700°C

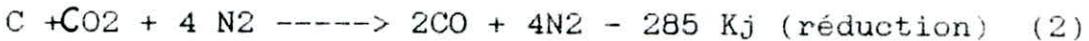
IV.2 Fonctionnement du cubilot.

Le cubilot est un four à cuve relativement étroit dans lequel on introduit à la partie supérieure le mélange métal + coke + castine et par les tuyères, on souffle de l'air nécessaire à la combustion du coke. On charge un lit de coke (paillasse), puis les charges alternées de métal, castine et coke.

Le cubilot étant prêt à la fusion, le ventilateur est mis en route et les tuyères ouvertes. L'air qui pénètre dans la colonne du cubilot permet au coke en ignition de brûler suivant la réaction exothermique.



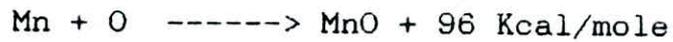
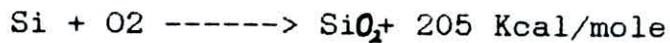
La température s'élève et le carbone du coke réagit sur le gaz carbonique formé. La réaction est endothermique.



La température dimunie alors.

Afin d'être certain d'une combustion complète du coke, l'air est soufflé en excès, l'atmosphère du cubilot est donc oxydante.

Une partie du silicium surtout et du manganèse de la charge est oxydée selon les réactions :



Les oxydes MnO et SiO₂ formés passent dans le laitier pour compenser ces pertes, on introduit dans la charge des ferro-silicium et ferro-manganèse.

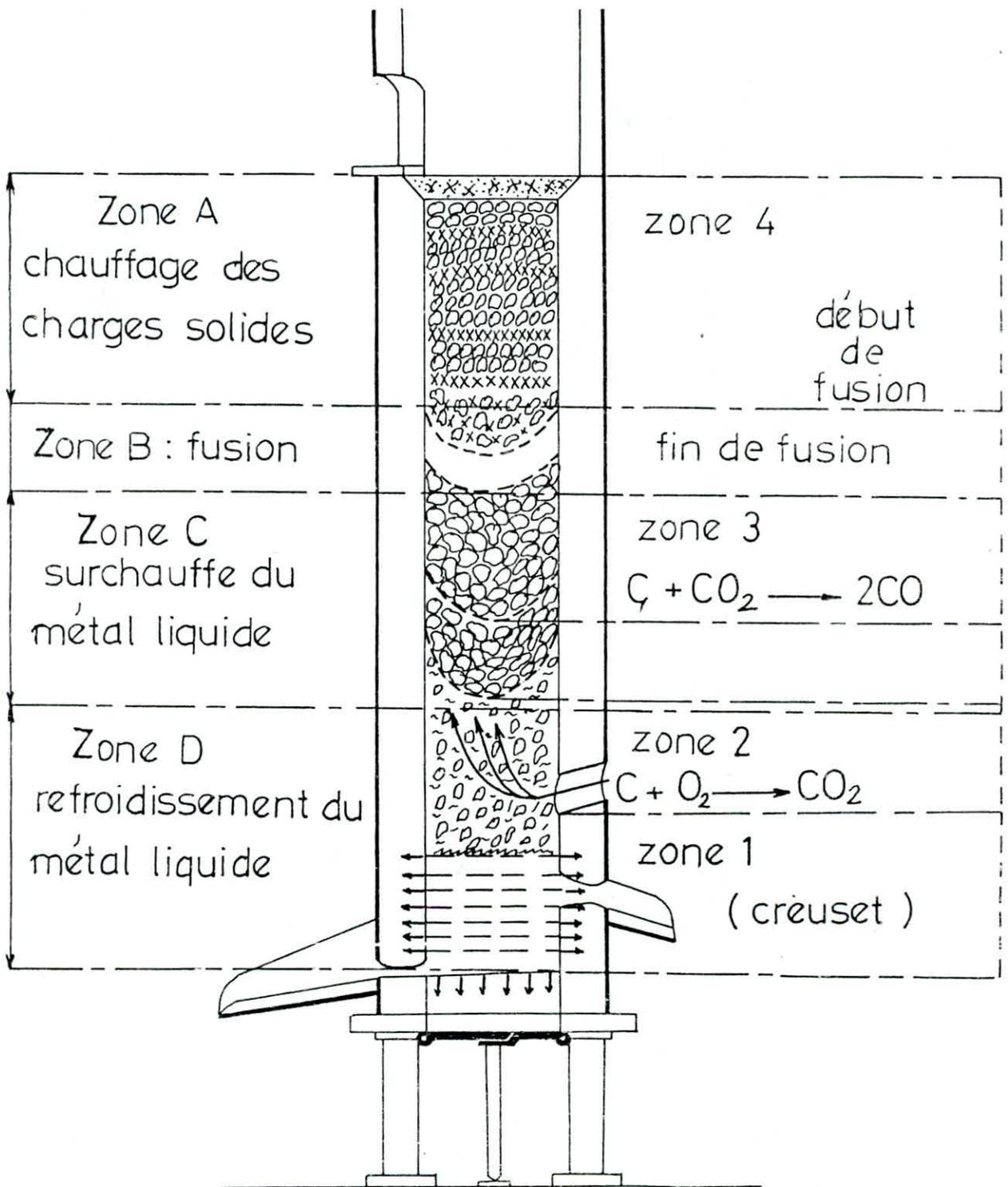
Le soufre du coke est partiellement éliminé par oxydation selon la réaction :



SO₂ passe dans les gaz d'échappement.

IV-3 Les différentes zones du cubilot.

On peut schématiquement partager le cubilot en différentes zones.



1. La zone du creuset dans laquelle il ne se produit pas de combustion.
2. La zone immédiatement située au dessus des tuyères dans laquelle la température s'éleve graduellement et la réaction oxydante (1) est prépondérante.
3. La zone de réduction dans laquelle la réaction de réduction abaisse la température.
4. La zone située à la partie supérieure du cubilot ou les équilibres physico-chimiques sont établis et dans laquelle il n'y a pas de combustion.

Lorsque les charges métalliques sont enfournées dans le cubilot il faut qu'elles arrivent à la température de fusion à une distance des tuyères telle que les gouttes métalliques provenant de leur fusion atteignent la température optimale en ruisselant sur le coke incandescent. L'échauffement des charges est représenté par les différentes zones:

- A: La zone immédiatement au dessous du gueulard dans laquelle des charges métalliques s'échauffent pour atteindre la température de fusion: c'est la zone de chauffage des charges solides.
- B: La zone dans laquelle les charges métalliques fondent : c'est la zone de fusion.
- C: La zone comprise entre la zone de fusion et celle de la température maximale de combustion du coke, dans laquelle les gouttes métalliques vont s'échauffer encore pour atteindre la température maximale: c'est la zone de surchauffe du métal liquide.

D: La zone du creuset dans laquelle la fonte liquide vient s'accumuler et refroidir pendant le temps de séjour : c'est la zone de refroidissement du métal liquide.

IV.3.1 Paramètres du cubilot.

- Hauteur du cubilot.

Pour assurer un fonctionnement adéquat du cubilot il faut :

a/ Que le chemin parcouru par les charges solides du gueulard à la zone de fusion soit suffisamment long pour que leur température passe de la température ambiante à la température de fusion

b/ Que la hauteur du ruissellement des gouttelettes métalliques soit suffisante pour leur permettre d'atteindre la température optimale compte tenu du contact rapide qu'elles ont avec le coke

- Diamètre du cubilot

C'est la production horaire de fonte que l'on désire obtenir en pratique qui fixe le diamètre intérieur du cubilot.

La production moyenne de fonte est environ 75 kg/dm² de section.

Pour un cubilot de diamètre D elle est égale à :

$$Ph = (75 \pi D^2) / 4 \approx 60 D^2 \text{ (kg, D en dm) [10]}$$

IV.4 Lit de fusion

Le lit de fusion est constitué par du coke, des retours de fonderie, des gueuses de fonte de première fusion, du fondant.

a) Le coke
~~~~~

C'est un charbon particulier obtenu par la distillation en vase clos des houilles grasses. Ses caractéristiques essentielles sont

- Une grande porosité qui permet au vent de circuler.
- Une grande résistance à l'écrasement pour soutenir la charge de fonte.
- Un bon pouvoir calorifique : 7200 kcal/kg

La masse du coke représente 8 à 15% de la charge métallique [11]

La hauteur de chaque lit de coke ne doit pas être supérieur à 0.2m. La masse des charges du coke est égale (en kg)

$$450 \pi / 4 D^2 * 0,2 = 70 D^2$$

(masse volumique apparente du coke : 450 Kg/m<sup>3</sup> , D en mètres )

b) le fondant  
~~~~~

Les cendres du coke sont généralement de la silice SiO₂, difficile à fondre (1700°C). Pour les transformer en une scorie fusible vers 1400°C, on ajoute un antagoniste chimique, ici la castine, CaCO₃ [12].

Au voisinage des tuyères, la chaux (CaO) provenant de la décomposition de la castine selon :



se combine avec SiO₂ pour former un laitier fusible de silicate de calcium contenant en plus des oxydes FeO et des sulfures.

La castine représente 30 à 45% du poids du coke.

c) La charge métallique ~~~~~

L'élément de base de l'élaboration des fontes au cubilot est la fonte neuve, caractérisée par un carbone équivalent élevé.

Les charges comprennent également les retours de fabrications en général 25 à 40% du poids total de la charge. Elles sont complétées avec des matériaux de récupération (vieilles fontes ou ferrailles).

Enfin pour ajuster les teneurs silicium et manganèse des additions de ferro-alliages sont effectuées. Ces additions de ferro-silicium et ferro-manganèse sont ajoutés à la charge métallique ou dans la poche du coulé ce qui diminue la perte au feu du ferro-silicium.

IV.4.1 Allumage du cubilot ~~~~~

Quel que soit le métal élaboré et l'appareil de fusion utilisé il est nécessaire d'allumer et de rechauffer l'appareil avant de le charger. L'allumage peut se faire au bois à l'aide d'un brûleur à mazout. L'emploi du brûleur est rapide et propre; il permet un premier chauffage de la sole.

Les réparations, consistant à décaper l'intérieur de la colonne de fusion c'est-à-dire d'en détacher le laitier et les morceaux de coke qui y adhèrent puis à reconstituer à l'aide de boules de pisé réfractaire la zone de fusion cylindrique, doivent être bien sèches avant l'allumage.

L'allumage doit avoir lieu suffisamment à temps pour que la zone incandescente ait dépassé le niveau des tuyères lorsque le

soufflage commencera.

Le chauffage préalable de la sole permet d'éviter le lingotage de la première fonte coulée.

La sole chauffée, on arrête le vent. On bouche le trou de coulée avec du sable sec et un tampon de terre. On ferme la porte d'allumage et le trou à crasses, le trou de coulée reste ouvert afin de sécher.

On le bouche quand le réfractaire qui le compose est rouge. On procède à l'opération suivante qui est le chargement du cubilot.

IV.4.2 Chargement du cubilot [13]

Avant de commencer le chargement du cubilot, il y a un intérêt à préparer les charges à l'avance et les disposer dans des bennes sur des wagonnets pour chariot à soulevement, que d'opérer au fur et à mesure de la fusion.

On charge la quantité de coke jusqu'à atteindre le niveau optimum pour la zone de fusion (généralement 70cm à 1m au dessus des tuyères supérieures). On recouvre le lit de coke de la quantité de castine correspondante à une charge. On poursuit le chargement dans l'ordre suivant : ferro-alliages, ferrails d'acier (s'il y a lieu), fonte (d'abord les gros bocages, puis les gueuses et les petits bocages), coke et castine.

Le chargement se poursuit pendant la fusion de façon que le cubilot demeure constamment plein.

PARTIE

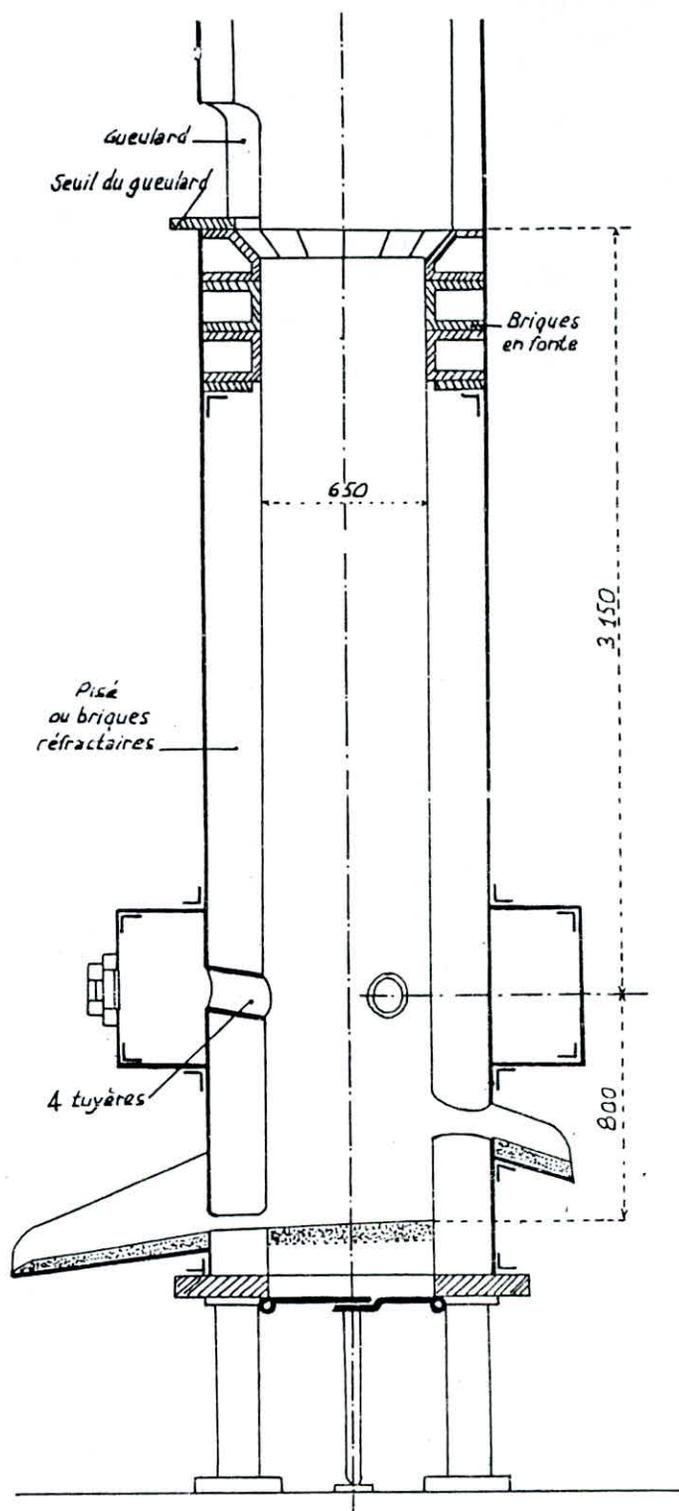
EXPERIMENTALE

CHAPITRE I

Calcul du lit de fusion
et
Techniques
Experimentales

I.1.3 Schéma du cubilot utilisé.

CUBILOT DE 2.5 TONNES/HEURE



I.1 Calcul du lit de fusion

I.1.1 Cahier de charge

La charge du cubilot, destinée à élaborer les sabots de frein à la fonderie de la S.N.T.F se compose :

A Charge métallique.

- 1/ Les jets et pièces rebutées des coulées précédentes.
- 2/ vieux sabots use de la fonderie DUCROS d'Oran : vieille fonte.
- 3/ fonte de première fusion sous forme de gueuses : fonte neuve.
- 4/ Des briquettes de ferro-silicium et ferro-manganèse.

B Fondant.

- 1/ la castine.

C Combustible.

- 1/ Le coke métallurgique.

I.1.2 Analyse des différents éléments de la charge.

L'analyse des trois types de fontes a été effectuée au niveau du laboratoire de la S.N.V.I-C.V.I et nous a donné les résultats suivants:

Eléments	C%	Si%	Mn%	P%	Cu%	Mo%
fonte élaborée fonderie SNTF	3.46	2.19	0.60	0.40÷0.50	0.070	0.06
vielle fonte	3.07	1.98	0.46	0.44	0.11	<0.1
fonte neuve	3.11	1.94	0.70	0.40÷0.50	<0.01	<0.1

L'analyse des différents éléments de la charge métallique nous a permis de vérifier que la fonte neuve utilisée n'est pas la fonte phosphoreuse PL3, nécessaire pour l'élaboration des sabots de frein des chemins de fer et dont l'analyse type est:

C : 3.5% environ.

Si: 1.5% a 4.5%.

Mn: 0.60%.

S : 0.03%.

P : 1.4% a 1.6% ou 1.6% a 1.8%.

Ti: 0.10% environ.

V : 0.10% environ.

* Le ferro-silicium utilisé est celui de la fonderie de Rouiba SNVI-UFR c'est le ZL 80.C'est un ferro-silicium à 80% de Si avec un rendement de 95%.

REMARQUE:

La briquette de ferro-silicium utilisée a la fonderie de la SNTF est dosée a 38.46% en Si;analyse dont on n'a pas pu vérifier l'exactitude ce qui nous a poussé a utilisé le ferro-silicium de la fonderie (SNVI-UFR) dont on connaît toutes les caractéristiques .

* Le ferro-manganèse utilisé est dosé à 75% en Mn (fonderie SNVI-UFR).

* La Castine(pierre bleu qui provient de la carrière Jobert à Alger)

La pierre bleu est à 90.91% CaCO_3 .

L'analyse faite nous a donnée les résultats suivants:

CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Perte au feu
50.40%	0.30%	5.60%	2.20%	0.80%	Traces

* Le coke métallurgique provenant d'el Hadjar"Annaba"

C :70%.

S :0.70% Pratiquement 0.70 a 0.75%.

Cendres : 6% ÷ 10.5%.

Humidité : 6% ÷ 8%.

Matières volatiles : 0.6 ÷ 1.2%.

I.1.4 Dimensions des différents éléments de la charge dans le cubilot .

La hauteur de la paillasse au dessus des tuyères à été fixé à 900 mm.

* La hauteur de la paillasse est alors : $H_p = 800 + 900 = 1700$ mm.

* Masse du coke de la paillasse : $M_p = S_c.H_p.d$

S_c : section intérieure du cubilot : $\pi D^2/4$.

d : densité du coke : 450 Kg / m³

D : diamètre intérieur du cubilot ; 650 mm .

D'ou : $M_p = 0.33 * 1.7 * 0.45 = 0.245$ t = 245 Kg de coke .

* La hauteur de chaque lit de coke entre charge est de 0.2 m.

Ce qui correspond a : $M_c = 450.(\pi.D^2/4).0.2 = 29,6$ Kg \approx 30 Kg .

* Masse de castine et hauteur de son lit:

a/ La charge de castine constitue environ 30% du coke entre charge.

Soit M_f : masse du fondant (castine)

$$M_f = 0.30 * M_c = 8.9 \text{ Kg} \approx 9 \text{ Kg}$$

b/ La hauteur de son lit:

La densité en vrac de la castine est $d_c = 1.7$ t/m³.

$$M_f = d_c.H_c.S_c \implies H_c = M_f/(d_c.S_c) = 9/(1700*0,33) = 0,016 \text{ m.}$$

* La hauteur de la charge métallique:

La densité en vrac est $d_m = 3$ t/m³.

Soit M_m : masse de la charge métallique : 250 Kg.

$$M_m = S_c.H_m.d_m \implies H_m = M_m/(d_m.S_c) = 0,25/(3*0,33) = 0,253 \text{ m.}$$

Le lit de fusion est :

- Charge métallique : 250 Kg .

- Coke métallurgique : 30 Kg .

- Castine : 9 Kg .

- Total : 289 Kg .

* La hauteur d'un lit de fusion est H_{lf} :

$$H_{lf} = H_m + H_c + H_f$$

$$H_{lf} = 0.253 + 0.200 + 0.016 = 0.469 \text{ m} \approx 0.470 \text{ m} .$$

* Le nombre de lits de fusion à enfourner avant la mise en marche du cubilot.

$$N_{lf} = (H_u - H_p) / H_{lf} .$$

H_u : Hauteur utile du cubilot , c'est la hauteur de l'axe des tuyères jusqu'au gueulard .

$$H_u : 3.15 \text{ m} .$$

$$H_p : 1.70 \text{ m} .$$

$$H_{lf} : 0.47 \text{ m} .$$

$$N_{lf} = (3.15 - 1.70) / 0.47 = 3.1 \approx 3 \text{ lits de fusion} .$$

I.1.5 Méthode de calcul du lit de fusion.

Soit à obtenir une pièce coulée en fonte grise à matrice perlitique de structure composée de perlite , graphite lamellaire et steadite .

La teneur des différents éléments à été fixe selon la norme AFNOR [12]

C	Si	Mn	S
2.8÷3.5%	1.2÷2.8%	0.4÷1.0%	< 0.15%

La teneur en phosphore pour le cas de notre fonte est comprise entre 1.35% et 1.55 .

Après avoir fixer la composition chimique de la fonte destinée à l'exécution de la pièce . Il faut préciser la composition de la fonte de la charge en tenant compte des gains et des pertes qu'occasionne chaque élément:

- La teneur en carbone augmente généralement de 10% lors du ruissellement des gouttelletes de fonte liquide sur la paillasse du coke en ignition.

- On admet que la teneur en phosphore ne change pas, alors que la teneur en soufre augmente toujours de 40 à 50% à cause du passage du

soufre du coke au métal.

- Les pertes au feu du silicium sont de 15 à 20% alors que celles du manganèse sont de 20 à 25% [14].

I.1.6 Les différents lits de fusion proposés .

a/ lit de fusion utilise par la fonderie (SNTF-Hamma).

Celui ci est reparti comme suit :

* Masse de la charge métallique : 250 Kg.

Cette charge métallique est composée de:

- vielle fonte (vieux sabots) : 212.5 Kg.

- fonte neuve : 37.5 Kg.

additions:- 2 briquettes de Fe-Si(36,46% de Si): 2.6 Kg.

- Coke entre charges : 18 Kg.

- Castine : 12 Kg.

Ce lit de fusion a permis l'elaboration de la fonte dont on a donné l'analyse au paragraphe I.1.2 à la page (26).

- on a étudié les différentes possibilités suivantes .

b/ Afin d'élaborer une fonte grise ayant pour composition :

C	Si	Mn	P	S
3.46%	2.20%	0.70%	1.40%	<0.15%

La charge métallique de 250 Kg a ete repartie comme suit :

- 10% de jets de coulées et pièces rebutées de coulées précédentes de même analyse que la fonte élaborée à la fonderie "SNTF".

- 75% de vielle fonte (vieux sabots de frein).

- 15% de fonte neuve .

pratiquement les pertes et les gains sont comme suit :

- C: un gain de 10% .

- Si : une de 20% .

- Mn : une perte de 25% .

- P : variation négligeable
- S : un gain allant jusqu'à 50% .

En raison des gains et des pertes au feu la composition moyenne de la charge doit être :

- C = $3.46 - 0.10 * 3.46 = 3.11\%$ ce qui représente 7.80 Kg.
- Si = $2.20 + 0.20 * 2.20 = 2.64\%$ - - - - - 6.60 Kg.
- Mn = $0.70 + 0.25 * 0.70 = 0.88\%$ - - - - - 2.20 Kg.
- P = $1.40 + 0 * 1.40 = 1.40\%$ - - - - - 3.50 Kg.

- Calcul de la quantité des différents éléments dans la charge .

1- Élément carbone 3.11% équivaut à $7.78 \approx 7.80$ Kg

jets et rebut 10% -----> 25kg		vielle fonte 75% -----> 187.5 Kg		Fonte neuve 15% -----> 37.5 Kg	
3.46 %	0.87 Kg	3.07 %	5.76 Kg	3.11 %	1.17 Kg

$$\Sigma_{Kg} = 0.87 + 5.76 + 1.17 = 7.80 \text{ Kg} \implies 3.12 \%$$

Avec les proportions des différents éléments de la charge métallique on a pu atteindre l'analyse projetée qui est de 7.80 Kg de C

2- Élément silicium 2.64% équivaut à 6.60 Kg .

jets et rebut 10% -----> 25kg		vielle fonte 75% -----> 187.5 Kg		Fonte neuve 15% -----> 37.5 Kg	
2.19 %	0.55 Kg	1.98 %	3.71 Kg	1.94 %	0.73 Kg

$$\Sigma_{Kg} = 0.55 + 3.71 + 0.73 = 5.00 \text{ Kg}.$$

Il y'a un manque de $6.60 - 5.00 = 1.60$ Kg de Si.

1.60 Kg représente pour la charge de 250 Kg un manque de :

$$\delta = 1.60 * 100 / 250 = 0.64 \% \text{ de Si}$$

Pour compenser ce manque on a utilisé le Fe-Si de la fonderie de

Rouiba le ZL 80 pour les raisons qui ont été déjà évoquées auparavant

La masse de Fe-Si nécessaire pour compenser le manque est:

$$M_{Fe-Si} = \delta * \text{masse de la charge} / (80 * 0,95)$$

pour $\delta = 0.64$.

$$M_{\text{Fe-Si}} = 0.64 * 250 / (80 * 0.95) = 2.11 \text{ Kg de Fe-Si}$$

Dans le cas ou on utilisé la briquette de Fe-Si de la fonderie de la SNTF (une briquette pesant 1.300 Kg est dosée a 500 g en Si).

La masse de Fe-Si à ajoutée sera : $M_{\text{Fe-Si}} = 4.600 \text{ Kg}$.

3-Elément Manganèse 0.88 % équivaut à 2.20 Kg.

jets et rebut 10% -----> 25kg		vielle fonte 75% -----> 187.5 Kg		Fonte neuve 15% -----> 37.5 Kg	
0.60 %	0.15 Kg	0.46 %	0.86 Kg	0.70 %	0.26 Kg

$$\Sigma_{\text{Mn}} = 0.15 + 0.86 + 0.26 = 1.27 \text{ Kg de Mn} .$$

Il y'a un manque de : $2.20 - 1.27 = 0.93 \text{ Kg de Mn}$.

$$\delta = (0.93 * 100) / 250 = 0.37 \% .$$

Pour compenser le manque on a utiliser un Fe-Mn a 75 % de Mn .

La masse de Fe-Mn à ajouter est :

$$M_{\text{Fe-Mn}} = (0.37 * 250) / 75 = 1.23 \approx 1.3 \text{ Kg}$$

$$\Sigma_{\text{P}} = 0.13 + 0.83 + 0.15 = 1.11 \text{ Kg} .$$

Il y'a un manque de : $3.50 - 1.11 = 2.39 \text{ Kg de P}$

$$\delta = (2.39 * 100) / 250 = 0.96 \% \text{ de P}$$

Il faut donc enrichir le bain de coulée par du ferro- phosphore permettant d'atteindre la fourchette imposée : $1.35 \leq P \leq 1.55 \%$.

1/ Tableau récapitulatif du premier lit de fusion:

		C	Si	Mn	P	
Analyse projetée	%	3.46	2.20	0.70	1.40	
Perte	%	-10	+20	+25	0	
Analyse des charges	%	3.11	2.64	0.88	1.40	
Poids des charges	Kg	250				
Élément contenu	Kg	7.78	6.60	2.20	3.50	
Jets et rebuts	Kg	25				
Élément contenu	%	3.46	2.19	0.60	0.50	
Élément contenu	Kg	0.87	0.55	0.15	0.13	
Reste à changer	Kg	6.91	6.05	2.05	3.37	
Vielle fonte	Kg	187.5	5.76	3.71	0.86	0.83
Fonte neuve	Kg	37.5	1.17	0.73	0.26	0.15
Total des éléments contenus dans jets et fontes en	Kg	6.93 + 0.87 7.80	4.44 + 0.55 5.00	1.12 + 0.15 1.27	0.98 + 0.13 1.11	
Manque	Kg	0	1.60	0.93	2.39	
Ferro-silicium	Kg		2.11			
Ferro-manganèse	Kg			1.30		

Le deuxième lit de fusion proposé se présente avec une charge qui est répartie de la façon suivante:

35 % de jet de coulées et pièces rebutées.

50 % de vieille fonte.

15 % de fonte neuve.

2/ Tableau récapitulatif du deuxième lit de fusion

		C	Si	Mn	P	
Analyse projetée	%	3.52	1.9	0.7	1.4	
Perte	%	-10	+20	+25	0	
Analyse des charges	%	3.17	2.28	0.88	1.4	
Poids des charges	Kg	250				
Élément contenu	Kg	7.93	5.70	2.20	3.50	
Jets et rebuts	Kg	87.5				
Élément contenu	%	3.46	2.19	0.60	0.50	
Élément contenu	Kg	3.03	1.92	0.53	0.44	
Reste à changer	Kg	4.90	3.78	1.70	3.06	
Vielle fonte	Kg	125	3.84	2.48	0.58	0.55
Fonte neuve	Kg	37.5	1.17	0.73	0.26	0.15
Total des éléments contenus dans jets et fontes en	Kg	5.01 + 3.03 8.04	3.21 + 1.92 5.13	0.84 + 0.53 1.37	0.70 + 0.044 1.14	
Manque	Kg	0	0.57	0.83	2.36	
Ferro-silicium	Kg		0.80			
Ferro-manganèse	Kg			1.10		

d/ et enfin on a proposé un dernier lit de fusion dont la composition est la suivante:

35 % de jet de coulées et pièces rebutées.

40 % de vieille fonte.

25 % de fonte neuve.

3/ Tableau récapitulatif du troisième lit de fusion:

		C	Si	Mn	P	
Analyse projetée	%	3.54	1.9	0.88	1.40	
Perte	%	-10	+20	+25	0	
Analyse des charges	%	3.19	2.28	0.88	1.40	
Poids des charges	Kg	250				
Élément contenu	Kg	7.98	5.70	2.20	3.50	
Jets et rebuts	Kg	87.5				
Élément contenu	%	3.46	2.19	0.60	0.50	
Élément contenu	Kg	3.03	1.92	0.53	0.44	
Reste à changer	Kg	4.95	3.78	1.70	3.06	
Vielle fonte	Kg	100	3.07	1.98	0.46	0.44
Fonte neuve	Kg	62.5	1.94	1.21	0.44	0.25
Total des éléments contenus dans jets et fontes en	Kg	5.01 + 3.03 8.04	3.19 + 1.92 5.11	0.90 + 0.53 1.43	0.69 + 0.44 1.13	
Manque	Kg	0	0.59	0.77	2.37	
Ferro-silicium	Kg		0.80			
Ferro-manganèse	Kg			1.03		

I.2 Techniques expérimentales

1. Micrographie

C'est une observation microscopique par réflexion sur la structure microscopique des métaux et des alliages.

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

- Enrobage : L'échantillon est enrobé à chaud avec de la résine.

- Polissage : Consiste à rendre la surface plane et brillante et présente aucune rayure susceptible de gêner l'observation microscopique. Le polissage a été effectué avec du papier abrasif.

+ Polissage grossier avec papier émeri : 120 - 320 - 600

+ Polissage fin avec papier émeri : 1000

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

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

Le Nital agit par coloration superficielle différenciant ainsi divers constituants.

- Observation et photographie : l'observation microscopique a été effectuée à l'aide d'un microscope métallographique qui comprend un appareil photographique.

Des photographies ont été prises sur des échantillons avant et après attaque.

2) Essais mécaniques

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

- Dureté Brinell : On a souvent recours à l'essai de dureté parce que il est rapide, peu coûteux et non destructif. Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille de diamètre D sous une charge F et à mesurer le diamètre d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge

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

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

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

- Essai de traction: Il consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture en vue de déterminer l'une ou les plusieurs caractéristiques mécaniques visées. Les éprouvettes destinées à cet essai sont usinées à partir de barreaux cylindriques bruts de coulée suivant la norme AFNOR , A32-101 concernant les fontes grises (Voir fig 3)

- Essai de résilience : C'est un des moyens les plus classiques utilisé pour mettre en évidence les aptitudes des matériaux à résister au choc.

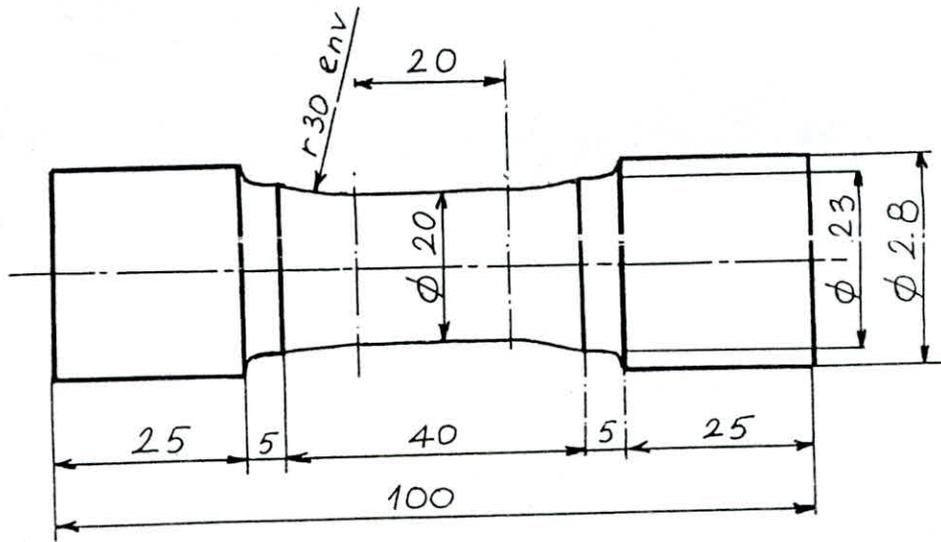
Il consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux(02) appuis.

On détermine le travail absorbé par la rupture de l'éprouvette.

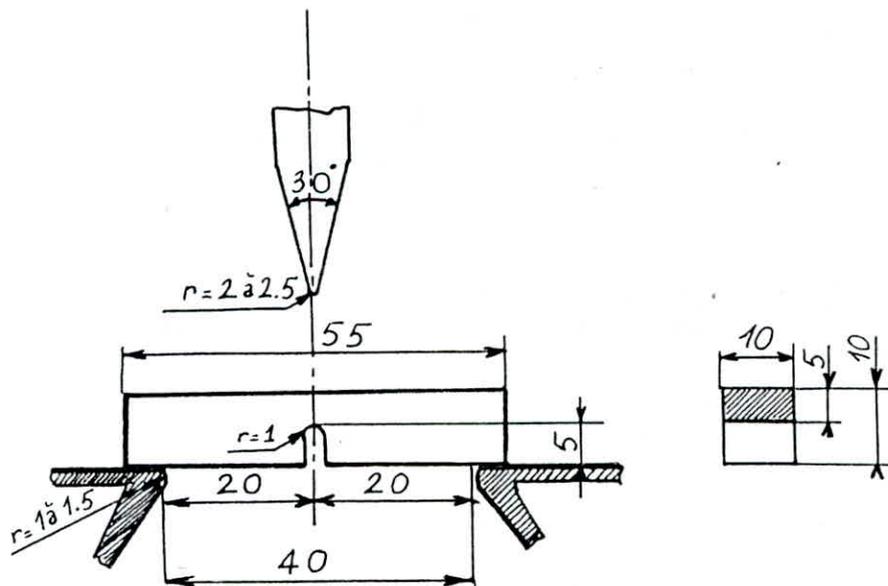
La résilience est exprimée en joules par cm^2 .

L'éprouvette en U est définie par la norme AFNOR :A03-156

concernant les fontes grises (voir fig 4).



(fig3) Eprouvette de traction usinée
de 30mm (NF A32 - 101)



(fig4) Eprouvette de résilience
entaillée eu(U) (NF A03-156)

CHAPITRE II

Resultats

Et

Interpretations

A - Analyse de la fonte obtenue dans le cadre de l'étude .

du troisième lit de fusion

L'analyse chimique donnée par spectrometrie est la suivante .

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu	Cr	Mo	Pb	Al	Mg
3.56	1.85	0.60	0.108	0.772	0.078	0.162	0.052	0.025	0.013	0.004	0.003

- Carbone équivalent : $C_{eq} = 4.43$ (fonte hyper-eutectique) .

NB :

- La fonte élaborée par la fonderie (SNTF) est désignée par : fonte A .

- La fonte élaborée dans le cadre de l'étude est désignée par : fonte B

B - Observations micrographiques .

- Morphologie du graphite .

L'examen du graphite au microscope est généralement effectué sur la section non attaquée. On fait d'abord une comparaison avec les images-types de la forme et la répartition du graphite (voir planches 1 et 2)

On détermine ensuite au grossissement 100 , les dimensions des particules du graphite indiquées sur le tableau ci-dessous et la planche 3 .

Numéro de référence	Dimensions (en mm) des lamelles au grossissement 100	Dimensions réelles (en mm)
1	> 100	> 1
2	50 à 100	0.50 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

Pour caractériser le graphite observé, il est généralement nécessaire de fournir des indications sur la forme, la répartition et la dimension des particules de graphite. A cet effet, on utilise respectivement dans l'ordre suivant les chiffres romains de la planche 1 pour la forme, les lettres majuscules de la planche 2 pour la répartition et les chiffres arabes de la planche 3 pour la dimension.

PLANCHE 1. — Diagrammes de référence pour la forme du grophille (répartition A).

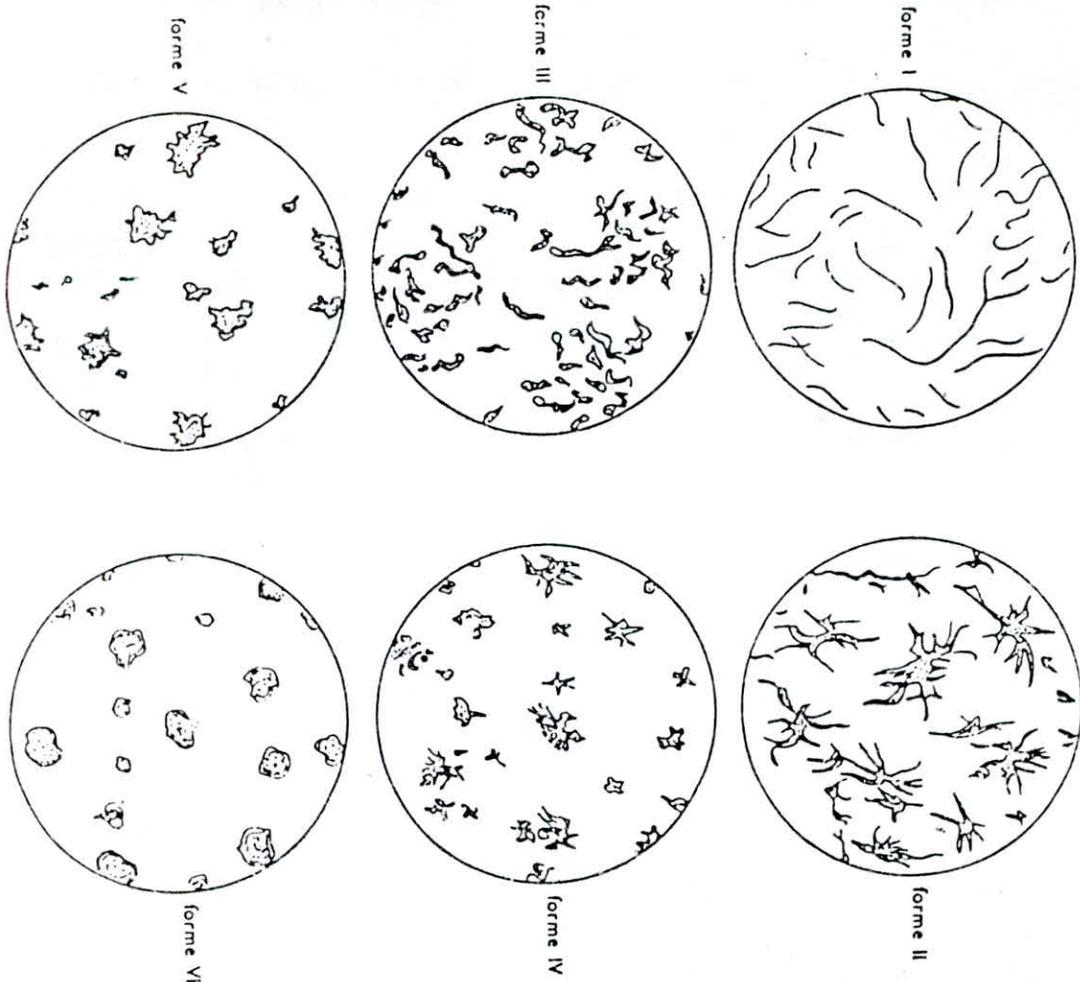
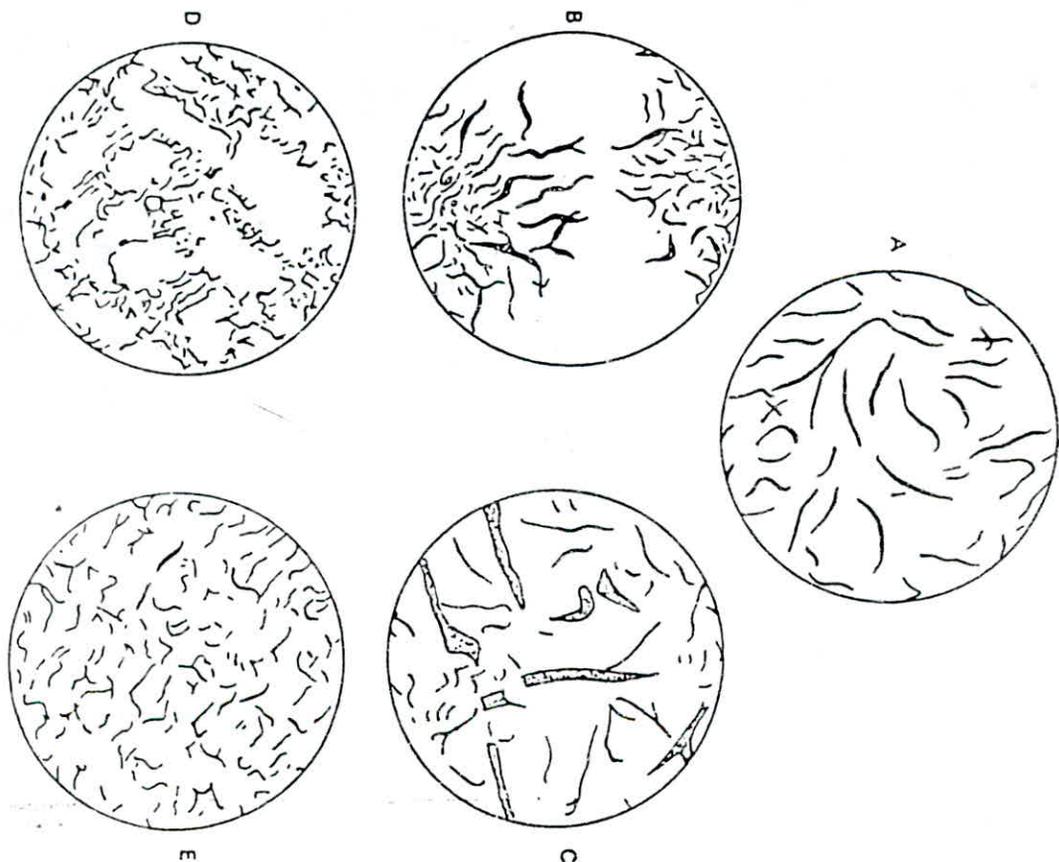
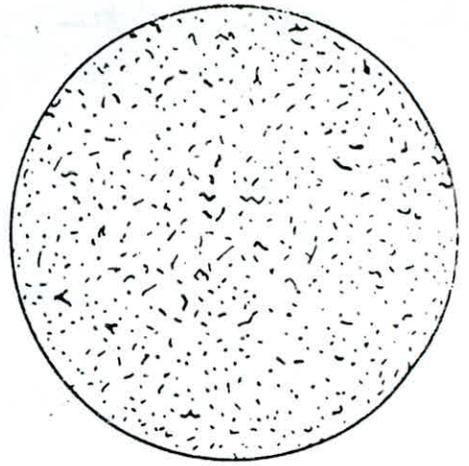
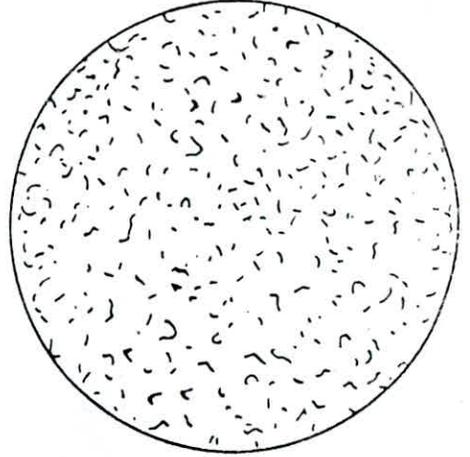
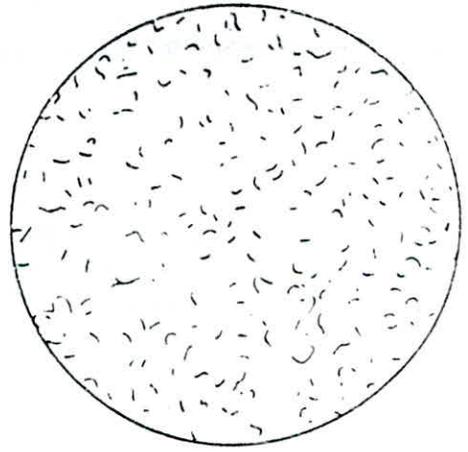
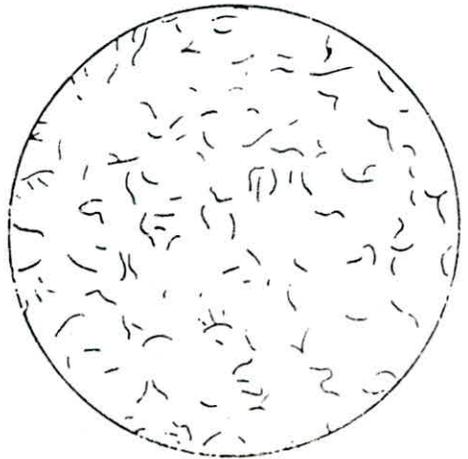
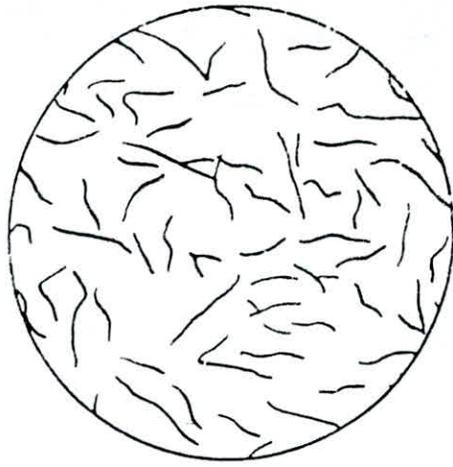
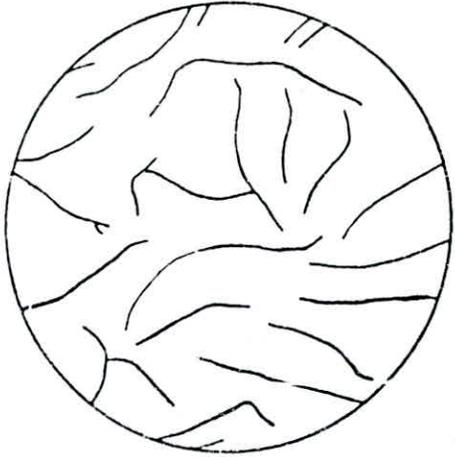
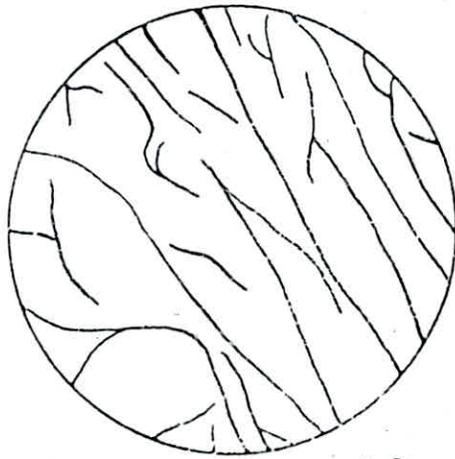


PLANCHE 2. — Diagrammes de référence pour la répartition du grophille (forme I).



FLANCHE 3 — Diagrammes de référence pour les dimensions du graphite

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



Résultats:

On a prélevé deux échantillons d'une semelle de frein, après observation au microscope des lamelles du graphite de la périphérie au coeur on a trouvé les résultats suivants:

	1er échantillon	2ème échantillon
Fonte A	(A,B,C)1 I A 4 (3,4)1	(A,B)2 I B 4
Fonte B	I A 6 (A,B)3	I A 5 (4,5)4

1-Présence des distributions A,B,C avec prédominance A et des dimensions

3 et 4 à prédominance 4.

2-Présence des distributions A,B avec prédominance B .

3-Présence des distributions A,B avec prédominance A.

4-Présence des dimensions 4 et 5 à prédominance 5 .

a) Four la fonte A .

On a une germination hétérogène du graphite sous forme de rosettes en périphérie en quantité très dense et légèrement interdendritique à coeur . Le graphite est mal réparti , concentré dans des endroits alors que dans d'autres on en trouve très peu .

La forme en rosettes en prédominance est inacceptable dans le cas de la fonte grise lamellaire pour sabots de frein , car elle s'accompagne dans la matrice , au centre du graphite en rosettes , d'une formation de ferrite douce par suite d'un approvisionnement du carbone en son voisinage . Les lamelles sont longues et défavorables à une résistance élevée .

b) Four la fonte B .

La germination du graphite a donné les A et B à prédominance A. le graphite en rosettes est en petite quantité ce qui n'a pas occasionné la formation d'une ferrite abondante . Les lamelles du graphite sont unifor-

-mément réparties et fines (dimensions 5 et 6) , ceci correspond à l'obtention de bonnes caractéristiques mécaniques meilleures que celles de la fonte A .

Nous remarquons que les lamelles du graphite sont plus longues est cela on se dirigeant vers le centre de l'échantillon . Ceci peut s'expliquer par le fait que la croissance des germes du graphite se fait au dépend du liquide eutectique du fait de sa richesse en carbone .

- Analyse Matricielle .

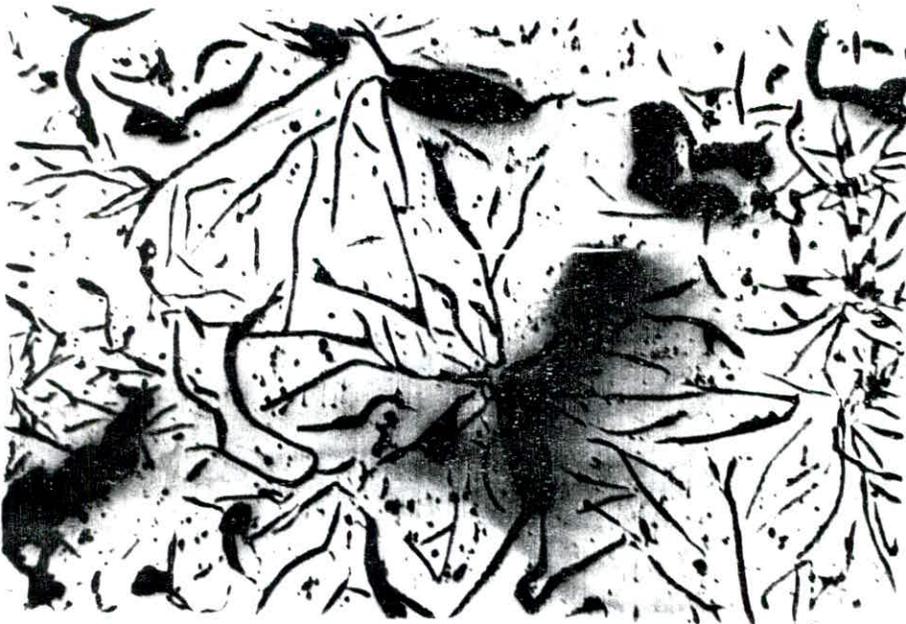
Fonte A.

La structure visualisée au microscope, des échantillons polis et attaqués au Nital (5%) , est perlitique avec présence d'eutectique phosphoreux mal réparti ,ne contournant pas les anciens joints de grains (état austénitique). La présence de la ferrite dépassant le taux toléré par la fiche technique concernant les sabots et semelles de frein est fixé à 5% . Cette abondance de la ferrite est due à la prédominance du graphite en rosettes. On a enfin constaté une forte hétérogénéité de l'eutectique phosphoreux à la périphérie ; on trouve une très grande concentration dans des endroits alors que dans d'autres il est presque inexistant .

Sur la couche adjacente sur 5/10 on a une forte concentration de lamelles en rosettes sans présence d'eutectique phosphoreux .

Fonte B.

La structure est résolument perlitique avec de l'eutectique phosphoreux en grande quantité et légèrement en réseau ,on remarque aussi la présence de quelques îlots de ferrite isolés , on se dirigeant vers le coeur la structure devient entièrement perlitique avec présence d'eutectique phosphoreux ,la ferrite n'est pas présente ,les lamelles du graphite étant du type A .



Sans attaque
Graphite en rosettes
grossières
type IB4

G x 100.



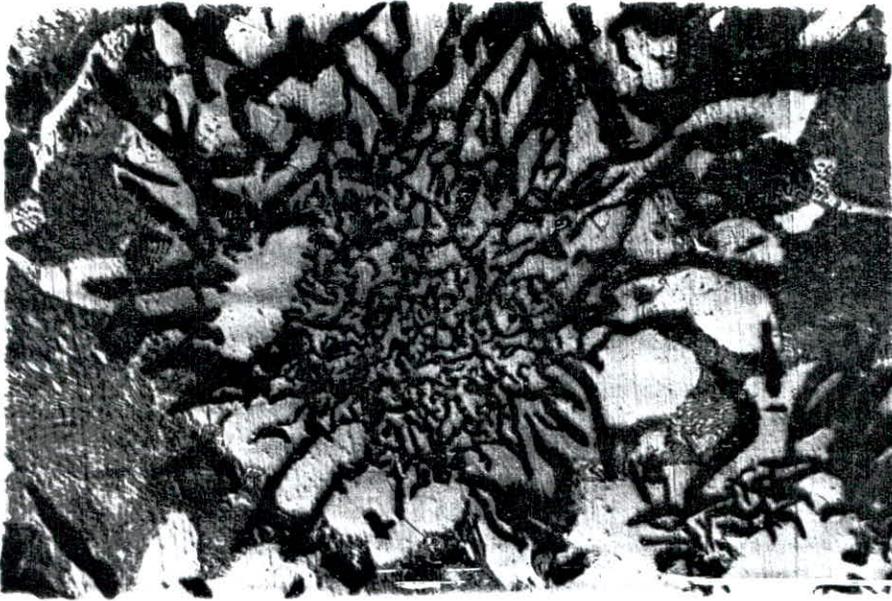
Sans attaque
Graphite en lamelle
et en rosettes
type IA4

G x 100.



attaque nital 5%
Graphite en rosettes
très dense et
interdendritique

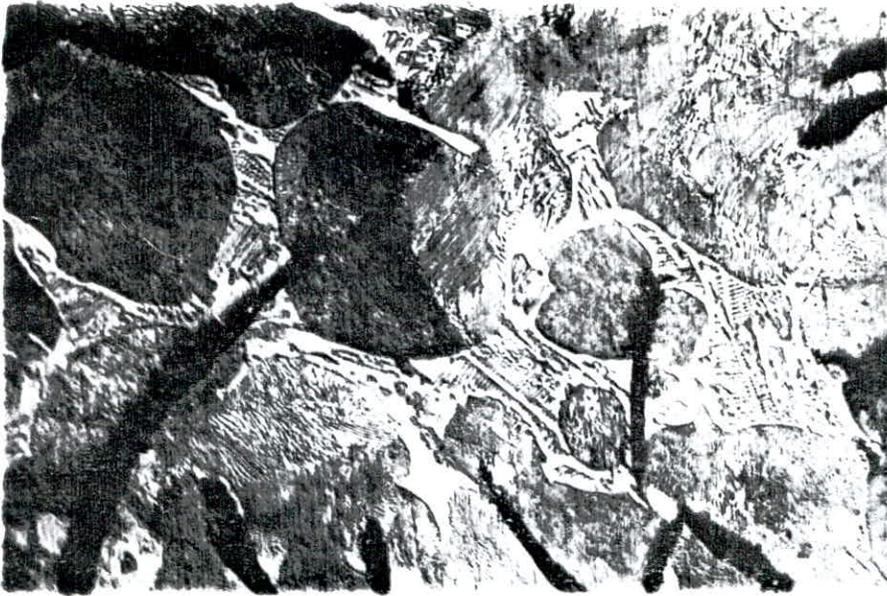
G x 100.



attaque nital 5%

- Graphite en rosette
- Ferrite en abondance en îlots clairs
- Perlite en gris

Gx 500.



attaque nital 5%

- Graphite en lamelles noires courbes et pointues
- Perlite en gris
- Îlots d'eutectique phosphoreux ponctué steadite

Gx 500.



attaque nital 5%

- Graphite en rosette (noires) type B.
- ferrite en clairs
- eutectique phosphoreux ponctué en périphérie
- perlite en gris

Gx 100.



Sans attaque

Graphite lamellaire

- petites lames (types)

- quelques rosettes (types)

IA6

Gx 100.



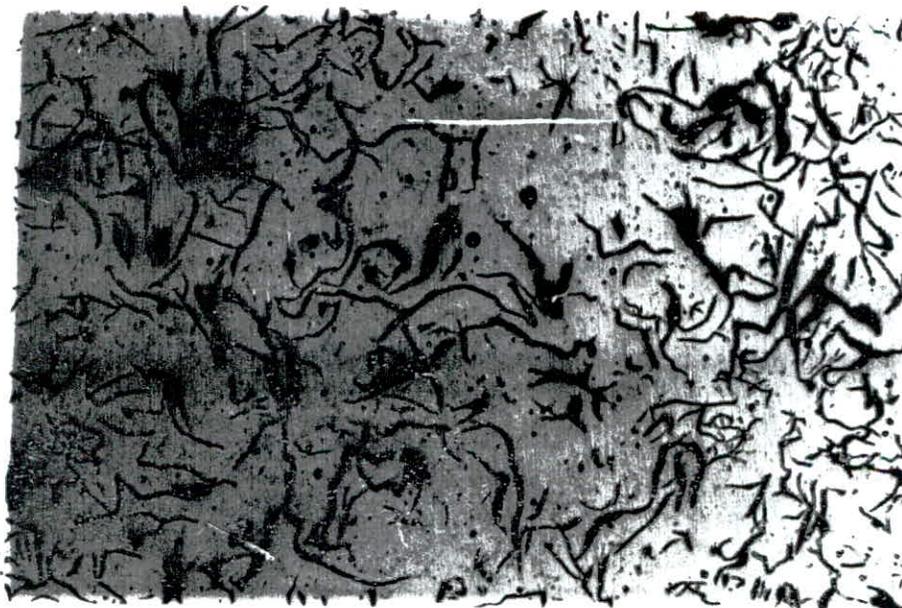
Sans attaque

Graphite uniformément

ponctué

IA4 et IA5

Gx 100.



Sans attaque

Graphite uniformément

ponctué

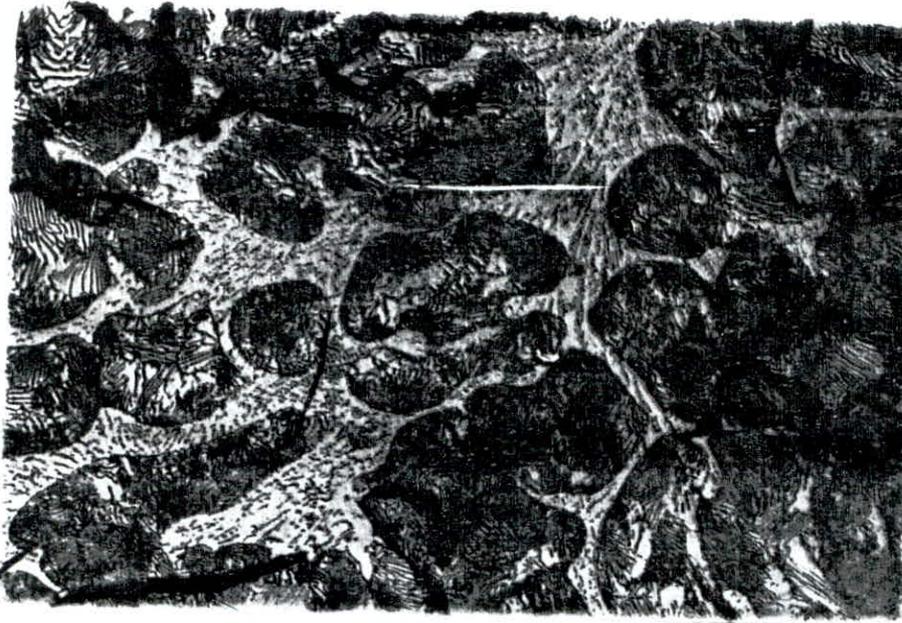
IA4

Gx 100.



attaque nital 5%

- en sombre lamelles pointues de graphite type I-A
 - fond gris de perlite lamellaire
 - Flôts d'eutectique phosphoreux
- Gx 500.



attaque nital 5%

- Mise en évidence la présence d'eutectique phosphoreux contourant les anciens joints de grains

Gx 500.



attaque nital 5%

- lamelles noires courbes et pointues de graphite
- matrice lamellaire de perlite (ferrite + cémentite).

Gx 500.

C - Essai de traction .

Les différents types de fontes grises sont classés d'après la valeur de leur résistance à la rupture par traction .

Pour les deux fontes étudiées on a effectué les essais sur trois éprouvettes de chaque nuance et on a pris la moyenne .

Fonte A .

$$R_m = 17.14 \text{ DaN/mm}^2.$$

L'allongement total est très difficile à mesurer ce qui nous a poussé à nous référer à la norme AFNOR (A 32-101) $A = 0.8 \%$.

Fonte B .

$$R_m = 19.98 \approx 20 \text{ DaN/mm}^2$$

$$A = 0.8 \% \text{ (A 32-101)}.$$

Cette différence de la valeur de R_m est due essentiellement à certains facteurs qui sont entre autres la proportion des matières premières des charges , la répartition des éléments de la structure ainsi que leurs pourcentages relatifs [5] .

La résistance à la traction de la fonte grise est d'autant plus importante que les lamelles de la perlite sont plus fines et la taille des inclusions (plus isolées) ; plus petite .

La présence du graphite du type C diminue les caractéristiques en traction en particulier la résistance à la traction , ce qui est le cas pour la Fonte A .

D - Essai de dureté .

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

Deux éprouvettes témoins ont été utilisées pour mettre en évidence

l'influence de la vitesse de refroidissement sur la dureté . les deux éprouvettes ont été prises directement de la poche de coulée est refroidies à l'air libre .

Fonte A .

- 1) échantillon prélevé sur le sabot de frein : Bille 5 , F = 750 Kg ,
diamètre : 5.00 mm , Dureté : 143 HB .
- 2) éprouvette témoin : Bille 10, F = 3000 Kg , diamètre : 3.59 mm
Dureté : 286 HB .

Fonte B .

- 1) échantillon prélevé sur le sabot de frein : Bille 5 , F = 750 Kg ,
diamètre : 3.90 mm , Dureté : 235 HB .
- 2) éprouvette témoin : Bille 10 , F = 3000Kg , diamètre : 2.93 mm
Dureté : 432 HB .

On constate une grande différence de dureté entre la fonte A et la fonte B . Cela est du au fait que la fonte A à une structure matricielle qui présente une assez importante quantité de ferrite ce qui nous pousse à la qualifier de fonte douce (dureté comprise entre 120 et 180 HB) [5] ainsi que le graphite qui est du type B (rosettes déchiquetées) .

La fonte B présente une dureté acceptable qui est dans la fourchette fixée par la spécification technique (190 + 250HB) , la structure étant presque entièrement perlitique .

En effet la vitesse de refroidissement influe sur la structure , la distance interlamellaire de la perlite provoque ces différences de dureté .

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

E - Microdureté .

La dureté vickers à été mesurée de la surface au coeur de chaque échantillon avec un pas de 0.5 mm . les résultats obtenus sont rapportés dans les tableaux ci-dessous .

a/ Fonte A (sous $Hv_{0,05}(300)$)

Dist (mm)	1/10	3/10	5/10	10/10	15/10	20/10	25/10	30/10	35/10	40/10	45/10
Hv	396	263	348	218	407	315	275	248	227	300	181
Dist (mm)	50/10	55/10	60/10	65/10	70/10	75/10	80/10	85/10	90/10	95/10	100/10
Hv	210	215	247	184	143	139	186	132	113	110	106

b/ Fonte B (sous $Hv_{0,05}(300)$)

Dist (mm)	1/10	3/10	5/10	10/10	15/10	20/10	25/10	30/10	35/10	40/10	45/10
Hv	281	288	288	281	300	348	300	315	407	263	269
Dist (mm)	50/10	55/10	60/10	65/10	70/10	75/10	80/10	85/10	90/10	95/10	100/10
Hv	315	454	269	348	257	289	300	281	308	418	275

Fonte A

en examinant l'allure du graphe A ,on remarque une diminution notable de la dureté de la périphérie au coeur, ceci s'explique par le fait que la dureté est essentiellement influencée par la structure de la matrice et par la morphologie du graphite (en rosettes).

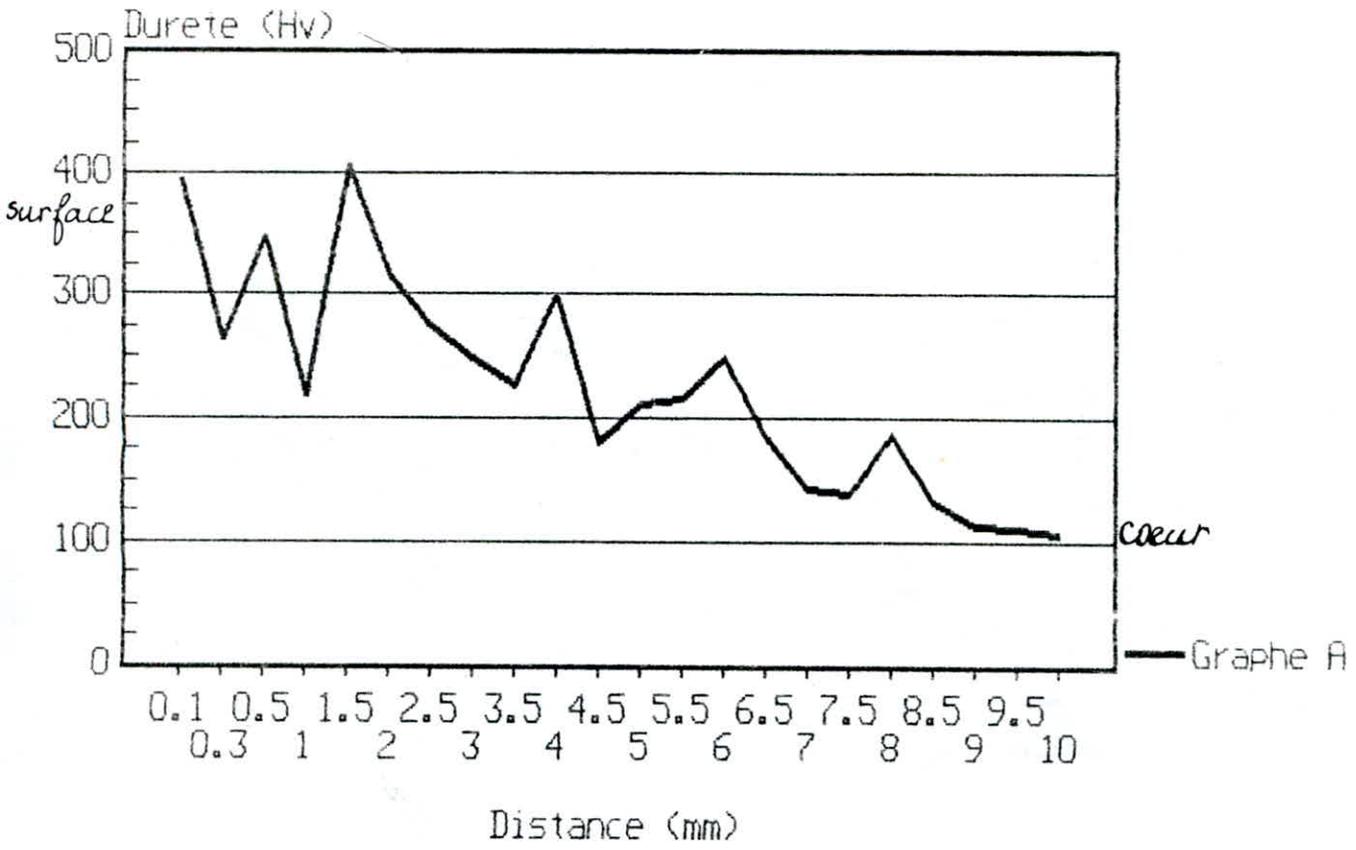
Ce type de graphite grossier a donné naissance à d'importantes plages de ferrite.

Fonte B

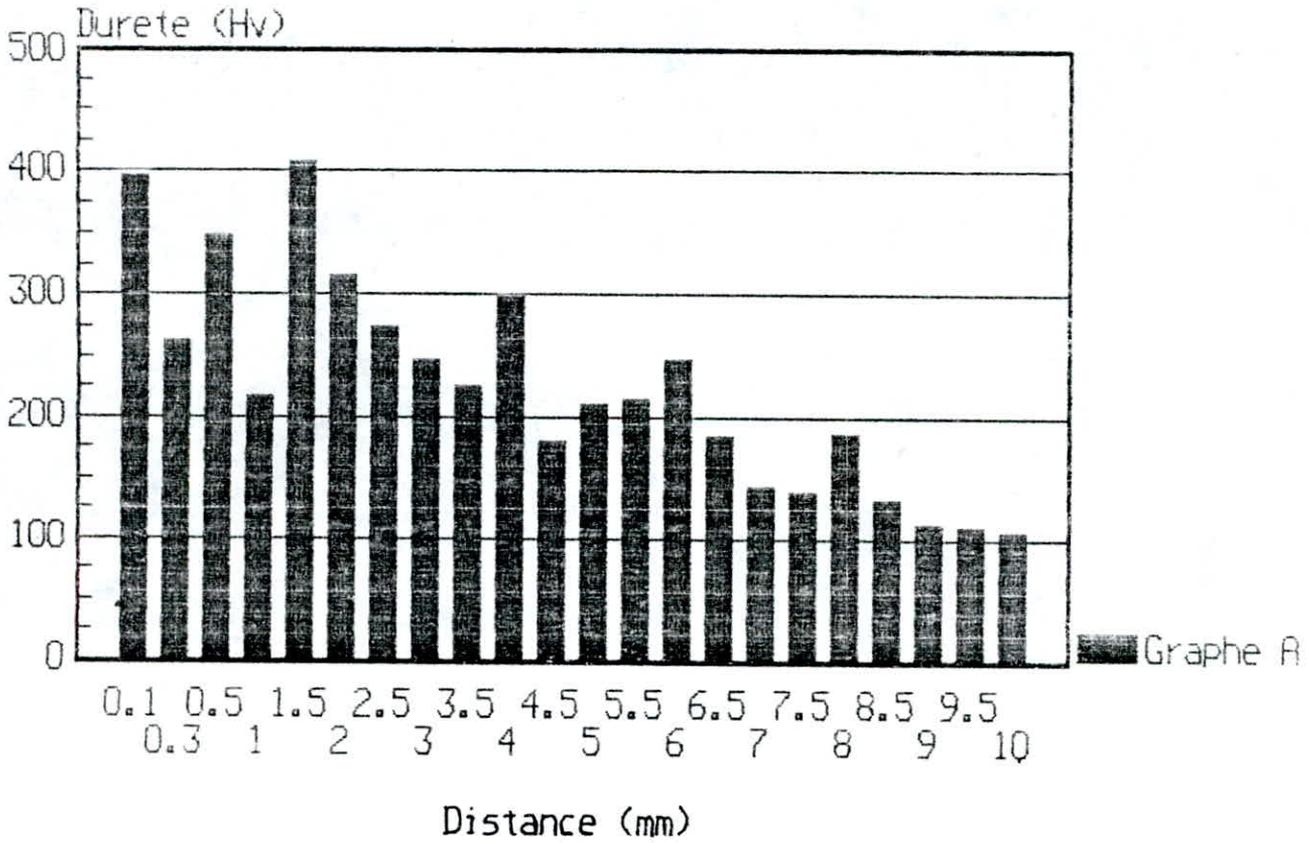
On remarque une variation plus ou moins régulière de la dureté entre la surface et le coeur et ceci à cause de la répartition de l'eutectique phosphoreux légèrement en réseau et la présence d'un graphite à prédominance A ainsi qu'une ferrite en faible proportion.

La présence de la perlite dans la fonte B est majoritaire.

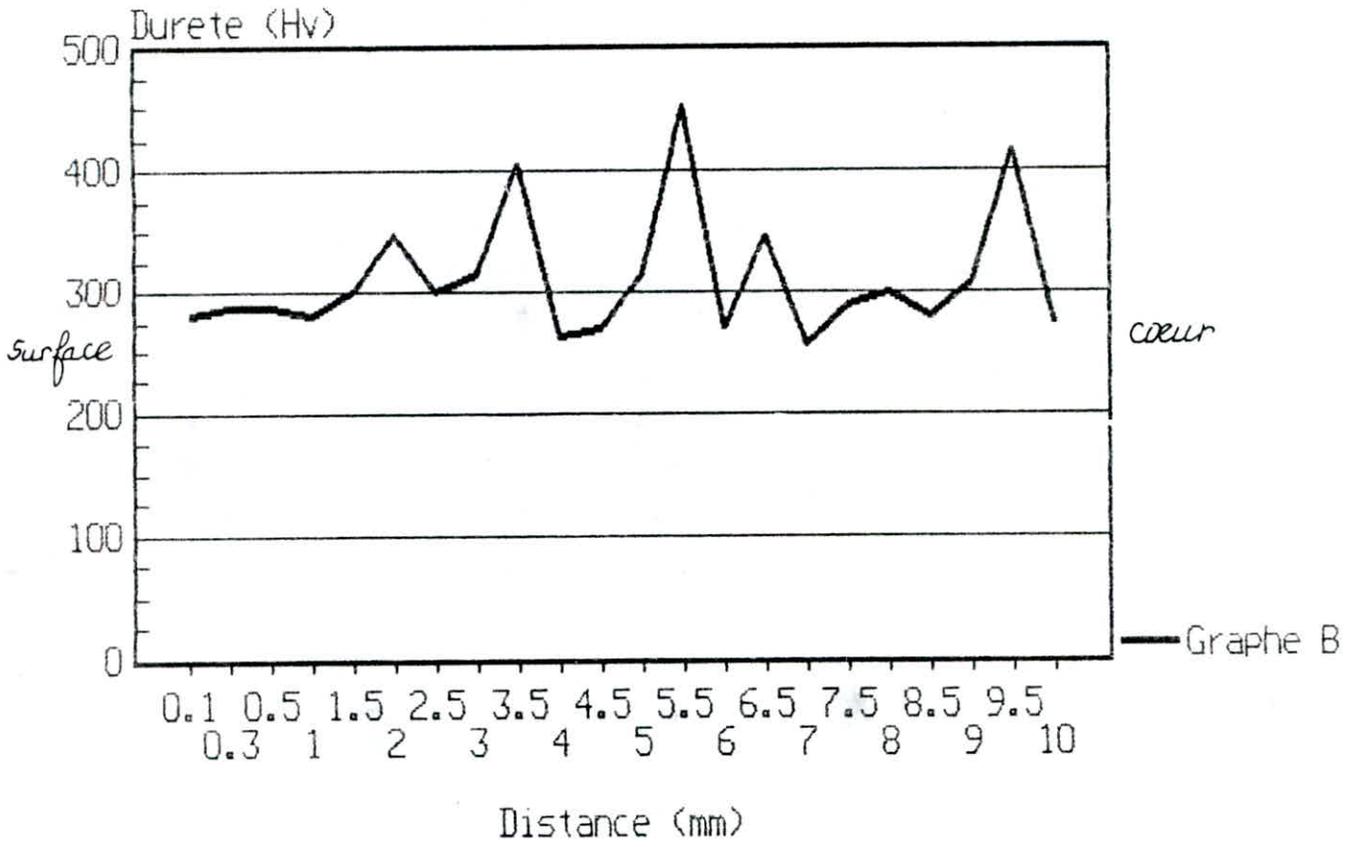
MICRODURETE--FONTE A



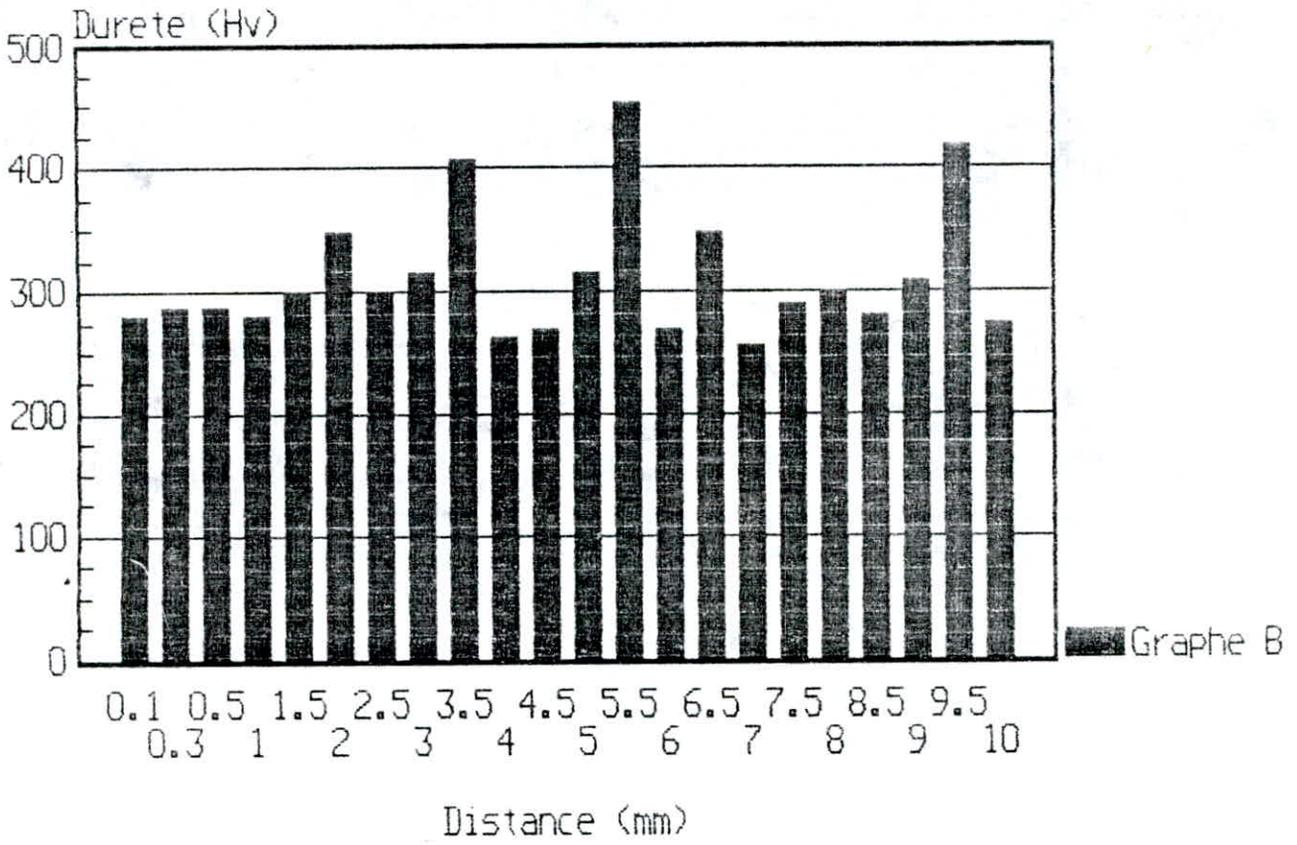
MICRODURETE--FONTE A



MICRODURETE--FONTE B



MICRODURETE--FONTE B



F/ Essai de résilience.

Fonte A

$$W(\text{absorbé})(\text{daj}) = 0.68 \text{ daj}$$

Fonte B

$$W(\text{absorbé})(\text{daj}) = 0.62 \text{ daj}$$

La résilience pour les fontes grises lamellaire est généralement ^{faible} Vest
varie peu. Ceci est dû à la structure, car plus elle est résistante plus elle est fragile. Cette fragilité s'explique par le fait que les paillettes de graphite sont des sources de concentration de contraintes en leurs extrémités pointues.

Le phosphore réduit la résilience de façon notable, approximativement de 5 pour 100 chaque fois que sa teneur augmente de 0.1%.

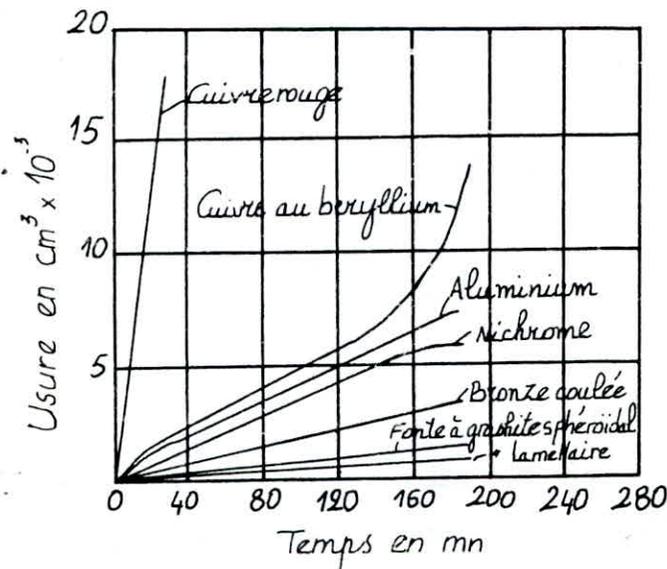
La présence d'eutectique phosphoreux provoque la fragilité de la fonte grise [5].

F/ Résistance à l'usure.

L'usure se définit comme la détérioration mécanique ou physique d'une surface au contact d'une autre par suite du mouvement relatif de l'une par rapport à l'autre.

L'usure dépend plus des conditions imposées en service que des propriétés des métaux en contact.

La fonte grise offre dans beaucoup de cas une excellente résistance à l'usure par frottement comme le montre la figure(5)



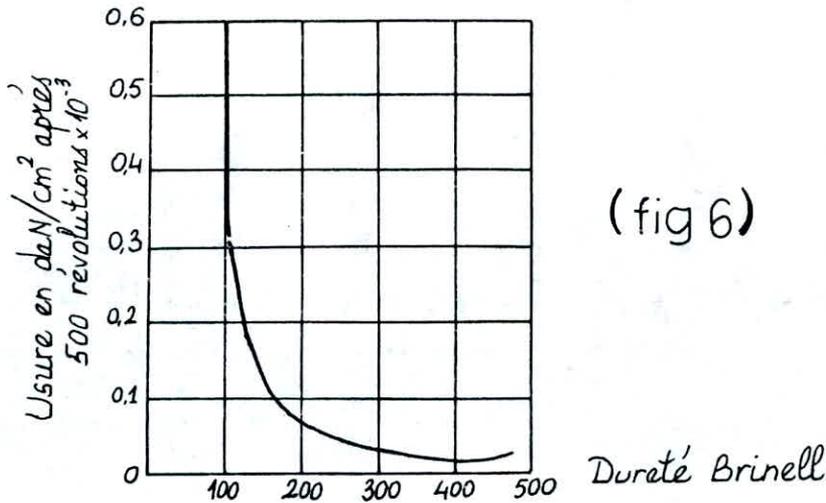
(fig 5)

Usure De Matériaux Divers
glissant sur de l'acier trempé

Pour l'essai des sabots de frein, une méthode d'essai a été mise au point reproduisant les conditions réelles en service. L'essai consiste à appliquer une éprouvette ayant la forme de la pièce sous pression contre un tambour d'acier trempé en rotation [15]. L'usure totale de la surface de l'éprouvette, mesurée suivant des conditions normalisées, indique la résistance relative à l'usure.

On n'a pas constaté de corrélation précise entre la résistance à l'usure et l'une des caractéristiques mécaniques [5]. Mais on a ~~fait~~ souvent fait appel à la dureté Brinell pour apprécier la résistance à l'usure.

La figure (6) [16] montre l'influence de la dureté sur l'usure de la fonte grise au cours d'essais de glissement.



(fig 6)

La résistance à l'usure n'est pas influencée par des duretés supérieures à 250 HB environ.

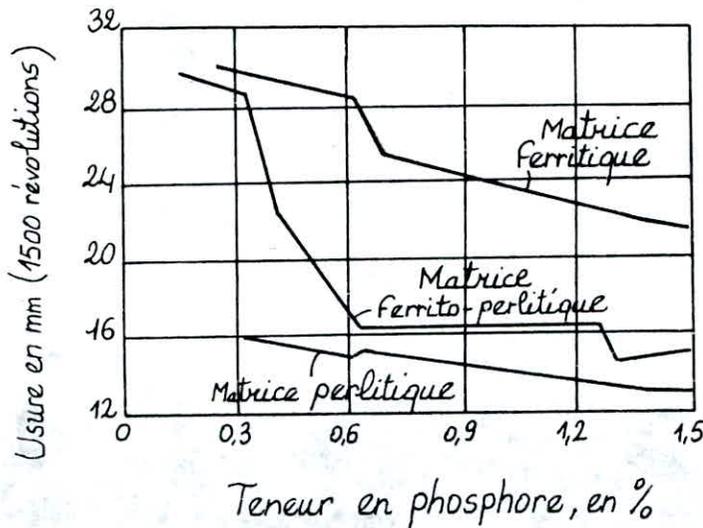
En règle générale, c'est aux duretés supérieures à 200 HB que la fonte présente une bonne résistance à l'usure [17].

La structure de la fonte grise exerce une grande influence sur la résistance à l'usure. La résistance à l'usure et au grippage, à condition qu'il soit ni trop fin, ni irrégulièrement réparti [18]. Le graphite du type B est à proscrire parce qu'il s'accompagne généralement de plages de ferrite qui risquent de se décoller au frottement et de produire un grippage.

Le graphite du type A est le plus favorable à une bonne résistance à l'usure [19].

La nature de la matrice a aussi une grande influence sur la résistance à l'usure. Une perlite fine donne à ce point de vue de bons résultats quand sa dureté est élevée.

Le phosphore contribue à accroître la résistance à l'usure en formant un eutectique phosphoreux dur, comme le montre la figure (7)



(fig 7)
Influence du phosphore sur l'usure des fontes grises suivant la nature de la matrice métallique

Interprétation générale

La fonte élaborée à la fonderie de la SNTF présente plusieurs défauts qui ont occasionnés des propriétés mécaniques médiocres. Parmi les défauts présents dans les pièces, il y'a qui sont dûs aux conditions opératoires, d'autres sont le résultats d'une mauvaise maîtrise des procédés de moulage et de fonderie de la fonte.

On a constaté dans les pièces (sabots de frein) la présence d'une porosité très accentuée ainsi que des soufflures, ceci est due essentiellement à une coulée trop turbulente ce qui a entraîné la formation de bulles de gaz qui sont restés prisonniers dans la pièce.

La fonte A est ductile, on a rencontré une très grande facilité dans son usinage, la dureté est de 143 HB ce qui confirme cette affirmation.

La normalisation de la composition chimique de la fonte de la fonderie d'el Hamma, n'est pas facile à réaliser car la charge utilisée dans le lit de fusion ne permet d'atteindre la fourchette fixée par l'union internationale des chemins de fer, en ce qui concene l'élément phosphore, qui varie de 1.35 à 1.55%.

On a donc proposé d'utiliser du ferro-phosphore afin d'élever la teneur en phosphore, chose qu'on a pas pu mettre en oeuvre à cause de la non disponibilité de la matière.

D'après les résultats trouvés, on constate visiblement la différence dans les caractéristiques mécaniques des deux fontes A et B.

Une légère amélioration est à noté dans les caractéristiques de la fonte élaborée dans le cadre de l'étude, et ceci peut s'expliquer par le fait d'une utilisation d'un calcul précis du lit de fusion, après avoir fait l'analyse des différents éléments de la charge, et voir leur influence respective sur la fonte élaborée.

La vitesse de refroidissement influe à la fois sur la grosseur du graphite, et sur la structure de la matrice. La structure dont le graphite est

uniformément réparti, correspond aux meilleures caractéristiques mécaniques.

Dans ce contexte, on a proposé l'utilisation de refroidisseurs dans le moule, ainsi on augmentera la vitesse de refroidissement sur la surface frottante du sabot de frein, ce qui entraînerait une élévation de la dureté, ainsi on aura une meilleure résistance à l'usure.

CONCLUSION

Conclusion

Au cours de ce travail, nous avons été amené à nous familiariser avec des techniques expérimentales diverses, les unes permettant l'élaboration des pièces, les autres la détermination de leurs caractéristiques mécaniques et micrographiques.

nous avons remarqué que la composition chimique seule ne suffit pas pour désigner une fonte ayant certaines caractéristiques mécaniques déterminées. Celles-ci dépendent des caractéristiques de la matrice d'une part et celles de la morphologie du graphite d'autre part.

Les caractéristiques de la structure résultent non seulement de la composition chimique mais aussi de la technique de fusion et de coulée de la vitesse de refroidissement de la pièce. En outre, la répartition des éléments de la structure est aussi importante que leurs pourcentages relatifs.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Chaussin-Hilly Métallurgie Tome 1 P 129-137.
- [2] Encyclopédie des sciences industrielles Quillet P 482-485
- [3] A.Desy et Jullien Vidts Métallurgie Stucturale .
- [4] Fonderie / AFNOR (1987) (receuil de normalisation Française)
- [5] Manuel des fontes moulées
Centre d'information des fontes moulées 1965 .
- [6] Lakhtine Métallurgie et traitement thermique des métaux 1986 .
- [7] Jean Claude Margerie Technique de L'ingénieur .
- [8] Michel Geier Métallurgie de fonderie Tome 2 (1976)
- [9] Maurice Decrop Technique de L'ingénieur P(M 760-4)-(M760-5).
- [10] Quillet fonderie P 507-511 .
- [11] Jean Laine moulage et fonderie de la fonte P(M760-8)-(M760-9).
- [12] Michel Geier Tome 1. P 70-77.
- [13] Jean Raty Editions du centre de recherche de fonderie le Cubilot.
- [14] Jean Largeteau La fonderie Tome 2 Fusion des métaux.
- [15] A.L Boegehold Wear test and value of hardness for control of product
- [16] E.Piwowsky Usure de la fonte par frottement de glissement .
- [17] F.G Sefing Gray iron wear résistance P 755-758.
- [18] Mahin et Lownie Microstructure related of cast iron P 20-28.
- [19] E.Piwowsky Contributions au problèmes des additions à la poche.

