

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أمحمد بوقرة بومرداس
Université M'hamedBougara de Boumerdès



Faculté des Sciences - Département de Chimie

Domaine : Science de la matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie des matériaux

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Présenté par

M. MAHGOUN Abdelhafid

Thème

**Etude comparative des propriétés mécaniques et
structurales des fontes élaborées à la fonderie de
ROUIBA**

Devant le jury :

M. CHERFI Abdelhamid	Professeur, UMB Boumerdès	Président
M. OUALIT Mehena	MCA, UMB Boumerdès	Promoteur
M. SITOUAH Nouredine	MAA, UMB Boumerdès	Examineur
M. MANSOUR Yacine	Ingenieur, SNVI FOR	Co-promoteur

Soutenu le 30 Septembre 2021

Remerciement

Au terme de ce travail, l'occasion m'est enfin offerte pour écrire la page qui m'appartient en totalité et sans partage car n'est-il pas vrai qu'un mémoire est la somme de plusieurs connaissances ; mais et surtout le fruit d'une collaboration, aussi dans cette dernière page qui occupera paradoxalement le début du texte, je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à :

Monsieur OUALITMehena, MCA UMBBoumerdès encadrant principal de ce mémoire, par sa compétence a su créer autour de moi toutes les conditions pour que je puisse mener à bien ce travail ; corrigeant avec rigueur mes fautes et mes erreurs, il a su être ce promoteur digne et responsable.

Qu'il trouve ici l'expression de toute ma gratitude Monsieur SITOUAH Nouredine, MAA UMBBoumerdèshumble et honorable, son savoir dans les matériaux a été d'un grand concours pour l'enrichissement et la réalisation de ce manuscrit, en relevant sans cesse mes hésitations, m'encourageant quand il fallait toujours à l'écoute avec patience et abnégation.

Monsieur CHERFI Abdelhamid, professeur qui a accepté d'examiner mon travail et présider le jury de soutenance ; sa présence m'honore, son expérience et sa compétence apportent sans aucun doute des éclaircissements sur beaucoup de questions soulevées dans ce travail, sa grande maîtrise des problèmes chimiques ajoute grandement à ce travail.

A Monsieur MANSOUR Yacine, à qui j'adresse l'expression de ma vive gratitude et le remercier de m'avoir aidé à réaliser la partie expérimentale de ce travail, ses connaissances et son savoir ont contribué efficacement à cette recherche.

Je suis honoré de compter Monsieur CHORFI Abdelhamid et SITOUAH Nouredine parmi les membres du jury.

Je ne peux terminer cette page sans exprimer mes sincères remerciements à ceux qui ont contribué à l'enrichissement et à la relecture de ce mémoire.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Partie bibliographique.....	2
I-Généralités sur les fontes.....	3
I-1. Définition.....	3
I-2. Obtention des fontes	3
I-3. Types de fontes	4
I-4. Influence sur la structure de la fonte des éléments outre de fer et le carbure.....	7
I-5. Diagramme de MAURER	9
I-6. Effets simultanés du silicium et du phosphore.....	10
• Carbone eutectique.....	10
• Carbone équivalent.....	10
• Indice de saturation.....	11
I-7. Diagramme de SIPP	11
I-8. Diagramme de SCHNEIDWIND.....	12
I-9. Influence des éléments spéciaux	12
I-9-1. Effets sur la graphitisation.....	13
I-9-2. Effets sur la matrice.....	13
I-10. Solidification et refroidissement d'une fonte grise.....	14
I-11. Généralité sur les fontes sphéroïdales.....	16
I-11-1. Sphéroïdisation.....	17
I-11-2. Inoculation.....	18
I-12 . Schéma de définition des principes de fonctionnement d'une fonderie.....	19
I-13 . Traitements thermiques.....	20
Chapitre II : Partie expérimentale.....	23
II-1. Introduction.....	24
II-2. Matériels utilisés dans la fonderie.....	24
II-2-1. Four à induction.....	24
II-3. Les matières premières utilisées.....	25
II-4. Elaboration des fontes.....	25
II-5. Analyse chimique.....	25
II-6. Caractérisation mécanique.....	26
II-6-1. La résistance à la traction.....	28
II-6-2. La dureté Brinell.....	31
II-6-3. L'essai de résilience.....	32
II-7. Examen micrographique.....	34
II-7-1. Principe de la métallographie.....	34
II-7-2. Préparation des échantillons.....	34
II-7-3. Etude de la microstructure.....	37
Conclusion générale.....	38

Liste des figures

Figure 1. Précipités de graphite lamellaire et eutectique fin (a) et attaque profonde montrant le réseau interconnecté de lamelles (b).....	5
Figure 2. Classification du graphite lamellaire en fonction de sa taille et sa distribution selon la norme ASTM-A-247	5
Figure 3. Microstructure d'une fonte à graphite vermiculaire.....	6
Figure 4. Microstructure d'une fonte contenant du graphite sphéroïdal et du graphiteVermiculaire.....	6
Figure 5. Fonte G.S. observée au microscope optique (a) et au MEB après dissolution de la matrice (b).....	7
Figure 6. Diagramme de MAURER valable pour barreau de $\phi=30\text{mm}$	9
Figure 7. Diagramme de SIPP.....	11
Figure 8. Diagramme de SCHNEIDWIND.....	12
Figure 9. Diagramme Fer-carbone.....	14
Figure 10. Produit d'inoculation pour une fonte GS.....	18
Figure 11. Schéma de définition de principe de fonctionnement de la fonderie.....	19
Figure 12. Diagramme des traitements thermiques de ferritisation de type T1.....	21
Figure13. Diagramme de traitement thermique normalisation.....	21
Figure 14. Spectromètre.....	26
Figure 15. Keelblock.....	26
Figure 16. Barreaux après coulée.....	27
Figure 17. Barreaux finis.....	27
Figure 18. Barreaux après traitement thermique.....	27
Figure 19 : Eprouvette de traction.....	28
Figure20 : Présentation schématique.....	28
Figure 21. Machine de traction.....	29
Figure 22. Résultats d'essai de traction pour la fonte.....	29
Figure 23. Résultats de l'essai de traction de la fonte GSC.....	31
Figure 24. Résultats de l'essai de traction de la fonte FGL.....	31
Figure 24.a. Histogramme de l'essai de traction.....	32
Figure 25. Dureté Brinell.....	33

Figure 26. Machine de dureté.....	33
Figure 27. Préparation de l'éprouvette.....	33
Figure27.a. histogramme de l'essai de dureté.....	34
Figure 28. Dispositif expérimentale.....	35
Figure 29. Schémas de l'éprouvette de résilience.....	35
Figure 29.a. histogramme de l'essai de résilience.....	36
Figure 30. Polisseuse.....	37
Figure 31. Echantillon du barreau avant polissage.....	37
Figure 32. Echantillon après polissage.....	38
Figure 33. Microscope optique.....	39
Figure 34. Echantillon sans attaque (FGL).....	40
Figure 35. Echantillon avec attaque (FGL).....	40
Figure 36. Avant attaque chimique(STT).....	40
Figure 37. Après attaquechimique(STT).....	40
Figure38. Avant attaque chimique (GSC).....	41
Figure39. Après attaque chimique(GSC).....	41

Liste des tableaux

Tableau 1 : Explicatif du diagramme de MAURER	10
Tableau 2. Compositions chimiques des fontes.....	26
Tableau 3. Résultat de l'essai de traction de la fonte STT	29
Tableau 4. Résultats de l'essai de traction de la fonte GSC	30
Tableau 5. Résultats de l'essai de traction pour une fonte FGL	31
Tableau 6. Résultats de l'essai de dureté des barreaux préparés pour les 3 nuances...	32
Tableau 7. Résultat des essais de résilience	33
Tableau 8. Spécifications des essais mécaniques.....	33

Introduction générale

Les fontes sont des alliages ferreux utilisés par l'homme depuis l'antiquité. Pendant longtemps, seuls deux types de fontes étaient connues, différenciées par l'aspect de leurs surfaces de rupture : fontes blanches ou grises. Le développement de méthodes de caractérisation des matériaux a permis de comprendre que **les propriétés mécaniques** des fontes étaient liées à leur **microstructure**.

Malgré leur très bonne dureté et résistance à l'usure, les fontes blanches sont relativement peu utilisées. Les fontes graphitiques possèdent une très grande variété de propriétés mécaniques, et se comportent comme des composites car leurs propriétés dépendent de la forme et la distribution des précipités de graphite présents dans la matrice riche en fer. Pendant longtemps, seul le graphite lamellaire était connu et l'effet d'entaille à la pointe des lamelles limitait les applications des fontes. La découverte, dans les années 1950, du traitement de sphéroïdisation a permis d'élargir la gamme de propriétés mécaniques des fontes et d'utiliser ces matériaux pour des applications très variées. De nos jours, en raison d'un faible coût et de propriétés mécaniques comparables à celles de certains aciers, les fontes sont présentes dans tous les domaines de l'industrie et notamment dans l'automobile, la tuyauterie et la construction mécanique.

Ce mémoire a pour objectif d'étudier les propriétés mécaniques et structurales des différentes fontes élaborées à la fonderie de ROUIBA et d'établir une étude comparative

Ce mémoire se divise en deux chapitres essentiels :

- Le premier chapitre constitue une présentation générale des fontes, le graphite dans les fontes, leur constituants et composition chimique ainsi que leurs traitements thermiques.
- Dans le deuxième chapitre, nous avons exposé les procédures et les techniques expérimentales d'élaboration des échantillons, pour objectif de déterminer et interpréter les résultats obtenus à savoir les propriétés mécaniques ainsi que l'analyse de la microstructure des différents types de fontes.

Ce manuscrit s'achève par une conclusion générale.

Chapitre 1

Partie bibliographique

Introduction

Le but de ce chapitre est de donner des généralités sur l'obtention des fontes de premières et deuxième fusion (types, les différents constituants et composition chimique), puis l'attention sera portée sur les fontes grises et leurs différentes microstructures.

I-Généralités sur les fontes

I-1. Définition

La fonte est un alliage de fer et de carbone, contenant en outre le fer et le carbone, un certain nombre d'éléments secondaire (Si, Mn, P, S...)

Sa teneur en carbone est supérieure à celle que peut, au maximum, dissoudre le fer

Les fontes sont constituées par une matrice (analogue à celle d'un acier mais à teneur variable en carbone) dans laquelle se trouvent toujours des particules de graphite ou de carbures.

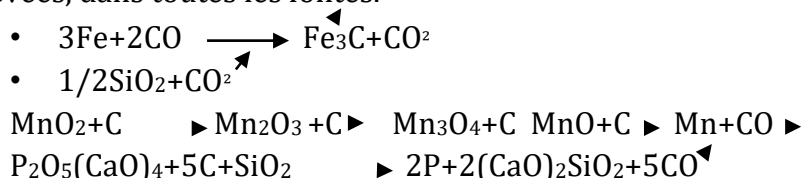
I-2. Obtention de la fonte

La fonte est obtenue dans le haut fourneau (HF), des minerais de fer composés de (Fe_2O_3 ; Fe_3O_4 ; FeCO_3 ; FeS), et gangue (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , TiO_2 , MnO , MgO), lesquels sont chauffés à haute température, par le coke métallurgique qui libère le fer de son oxygène par l'oxyde de carbone (excellent réducteur), on recueille dans la partie inférieure du haut fourneau (creuset), un alliage de fer et de carbone, la fonte celle-ci est coulée

- Soit dans des rigoles en sable, donnant après solidification des gueuses
- Soit dans des lingotières métalliques donnant après, solidification, des lingots.

Les oxydes contenus dans la gangue. Tels que (oxyde de manganèse, oxyde de phosphore, silice ...) lesquels dans le haut fourneau, sont réduits par le carbone, libérant ainsi des éléments composants (manganèse, phosphore, silicium, ...) que l'on retrouve dans la fonte. De plus, le coke contient toujours un peu de soufre dont une partie passe dans la fonte, et en définitive, la fonte est alors un alliage carburé formé de fer, de silicium, de manganèse de phosphore et de soufre

Ces éléments sont dits composants normaux des fontes ; avec des teneurs plus ou moins élevées, dans toutes les fontes.



Le soufre peut être apporté par les minerais sulfurés, soufre organique et de sulfate alcalinoterreux. Le plus grand apport provient du métallurgique.

En plus de ces éléments normaux certaines fontes produites par les hauts fourneaux, contiennent en proportion variable, mais faibles, d'autres éléments tels que le titane présent sous forme de TiO_2 dans le minerai de fer.

I-3. Les types de fontes

a) Les fontes blanches

Les hauts fourneaux produisent ce que l'on appelle des fontes de premières fusion, (fonte blanche, fonte grises) les quelles sont dirigées suivant leurs compositions chimiques et sous le nom de fontes brutes :

- Soit vers des aciers, afin d'être transformées après affinage dans les convertisseurs en aciers.

On obtient ce type de fonte par une température de coulée basse et un refroidissement rapide, une haute teneur en éléments perlitisants (ex : manganèse, cuivre, etc.) ou une faible teneur en éléments graphitisants (ex : silicium).

Les fontes blanches sont constituées de perlite et de lédéburite possédant une mauvaise coulabilité, et un aspect blanc brillant, la fonte blanche est principalement utilisée pour les pièces d'aspect, les pièces d'usure et ce grâce à la présence de carbure qui la rend très résistante à l'usure et à l'abrasion, mais la rend aussi très difficilement usinable.

Les principales qualités des fontes blanches sont :

- Une excellente résistance à l'usure et à l'abrasion à froid et à chaud
- Un bel aspect

Leurs principaux défauts sont :

- Difficilement usinables
- Pièces fragiles

b) Les fontes grises

Elles sont destinées vers des fonderies où elles sont refondues afin d'être coulées dans des moules, il s'agit des fontes dites fontes brutes de moulage. Ces fontes sont appelées aussi fontes grises où le carbone se trouve sous forme de graphite. La structure graphitique du carbone est obtenue par un refroidissement très lent de la fonte, ou l'ajout de composants graphitisants comme le silicium. L'appellation de fonte grise est due à l'aspect de la cassure qui est grise contrairement à la fonte blanche dont la couleur de la cassure est blanche.

Il existe également des fontes dont l'aspect est gris et blanc, ce sont les fontes truitées, bien que le début du refroidissement se fasse selon le diagramme stable (fer-graphite), lorsque la température s'abaisse les facteurs de graphitisation n'ayant plus d'effet, le refroidissement se fait selon le diagramme métastable leur microstructure peut contenir de la ferrite, de la perlite, de la cémentite et du graphite sous forme lamellaire ou sphéroïdal.

La proportion de chacune de ces phases dépend de la composition de l'alliage et de la vitesse de refroidissement on distingue :

▪ La fonte à graphite lamellaire

Sur une section métallographique, le graphite apparaît sous forme de lamelles plus ou moins épaisses qui présentent des branchements fréquents et forment un réseau tridimensionnel. Dans les fontes hypereutectiques des lamelles de graphite primaires se forment par croissance libre dans le liquide puis sont entourées par un halo d'austénite (Figure 1). Dans le cas des fontes hypoeutectiques, la formation d'austénite précède la croissance.

Des lamelles de graphite eutectiques. Une structure constituée de dendrites d'austénite et de graphite fin dit de surfusion est observée suite à la réaction eutectique. La Figure montre un réseau de lamelles de graphite eutectique après une attaque profonde.

La finesse de l'eutectique dépend des conditions de solidification et de la composition du liquide [1]. Il existe différentes tailles, formes et distributions des lamelles de graphite et celles-ci sont classées selon la norme ASTM-A-247 (Figure 2).

Les extrémités des lamelles sont des zones de concentration de contraintes où peuvent s'initier des fissures lors de sollicitations en traction alors que les efforts en compression sont mieux tolérés. Les fontes à graphite lamellaire sont utilisées en raison de leur très bonne usinabilité et de leur bonne capacité d'absorption des vibrations dans des applications telles que les bâtis de machines-outils ou les disques de freins.

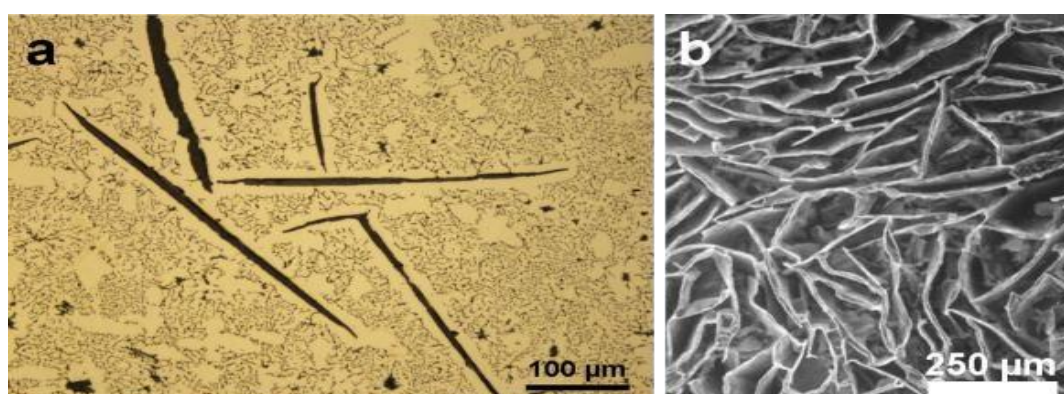


Figure 1. Précipités de graphite lamellaire et eutectique fin (a) et attaque profonde montrant le réseau interconnecté de lamelles (b)

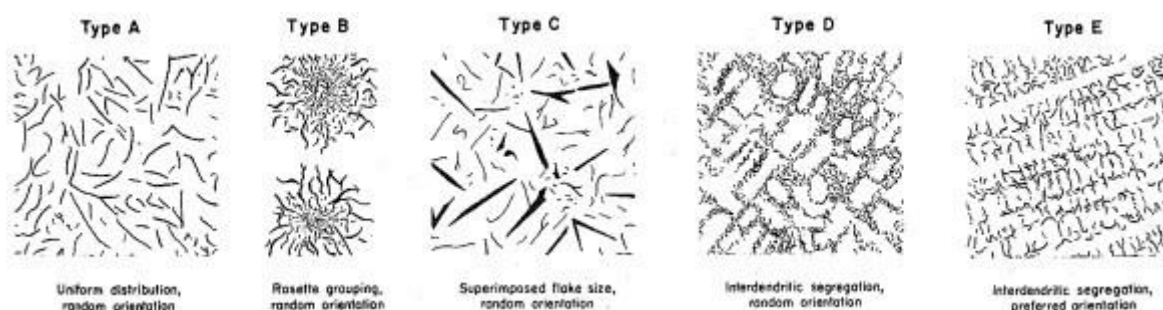


Figure 2. Classification du graphite lamellaire en fonction de sa taille et sa distribution selon la norme ASTM-A-247 [2]

▪ Les fontes à graphite vermiculaire

Le graphite se présente sous forme de particules épaisses avec des extrémités arrondies (Figure 3).

Les précipités de graphite qui apparaissent isolés sur des sections métallographiques sont en réalité interconnectés au sein des cellules eutectiques. Les fontes à graphite vermiculaire ont des propriétés mécaniques supérieures à celles des fontes à graphite lamellaire, notamment en termes de résistance et de ductilité, car l'épaisseur des précipités de graphite ainsi que leurs extrémités arrondies réduisent les concentrations de contraintes à l'interface graphite-matrice. Par ailleurs, la forme vermiculaire du graphite permet d'avoir une meilleure conductivité thermique et une meilleure capacité d'amortissement que celles des fontes GS. Ces matériaux sont produits intentionnellement par différentes méthodes.

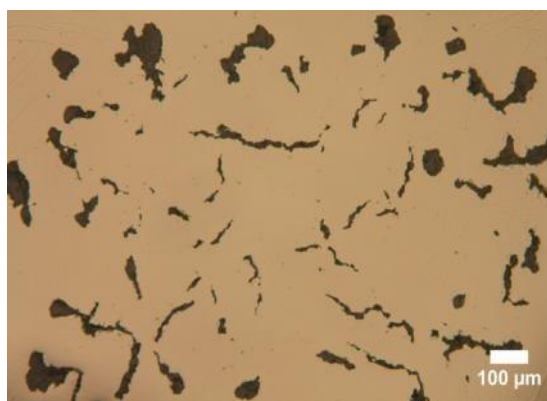


Figure 3. Microstructure d'une fonte à graphite vermiculaire

Les fontes à graphite vermiculaire peuvent être produites de façon similaire à celle des fontes à graphite sphéroïdal mais avec une quantité moindre d'éléments sphéroïdisants. (0,01% à 0,02%) de magnésium

. Un autre moyen d'obtenir ce type de graphite est d'utiliser un traitement combiné d'éléments sphéroïdisants et anti-sphéroïdisants (Ti, Al...). Il est d'ailleurs courant de retrouver des lamelles et/ou sphéroïdes de graphite dans des fontes à graphite vermiculaire [3] comme le montre la Figure 4.

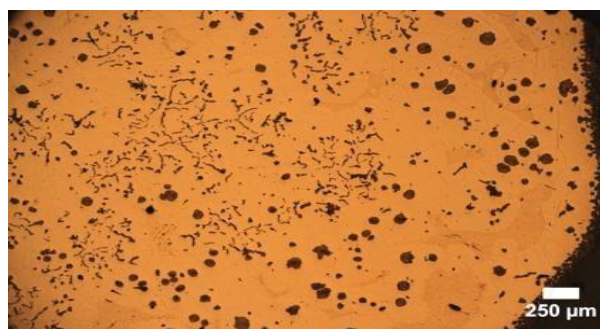


Figure 4. Microstructure d'une fonte contenant du graphite sphéroïdal et du graphite Vermiculaire

▪ Les fontes à graphite sphéroïdal

Dans les années 1950 [4], il a été découvert que l'ajout d'une faible quantité de magnésium ou cérium et même d'autres éléments, dans une fonte liquide avant sa coulée menait à la production de graphite sous forme de précipités sphériques.

Les sphéroïdes sont en général isolés, ils croissent individuellement dans le liquide et s'entourent ensuite d'une couche d'austénite. La croissance se poursuit alors par diffusion du carbone à travers cette couche. Les surfaces externes des sphéroïdes ne sont pas lisses, elles présentent parfois des irrégularités qui peuvent être observées sur des sections métallographiques ou à l'aide de la microscopie électronique à balayage [5] (Figure 5). La ductilité et la ténacité des fontes à graphite sphéroïdal sont supérieures à celles des fontes à graphite lamellaire puisqu'il n'y a plus l'effet d'entaille en pointe de lamelle. Il est ainsi possible d'obtenir des fontes à graphite sphéroïdal avec des propriétés mécaniques très diverses en jouant sur la nature de la matrice (ferrique, ferrito-perlitique, perlitique...). Grâce à leurs propriétés mécaniques comparables à celles de l'acier et de leur faible coût, ce type de fontes est très utilisé industriellement pour de nombreuses applications. Même si leur élaboration est industriellement maîtrisée, le contrôle de certains paramètres (composition, temps et température avant la coulée...) est essentiel

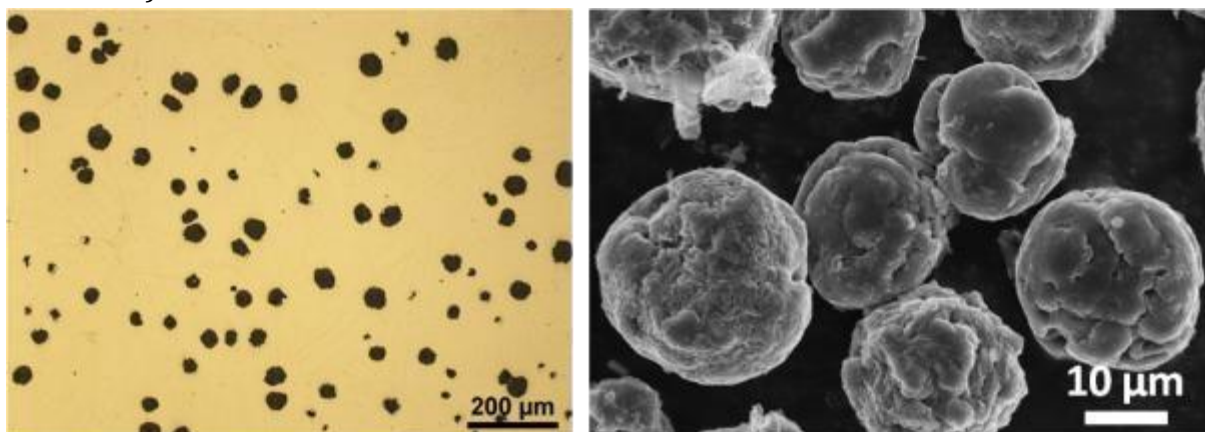


Figure 5. Fonte G.S. observée au microscope optique (a) et au MEB après dissolution de la matrice (b)

I-4. Influence sur la structure de la fonte des éléments outre le fer et le carbone :

a) Silicium :

Il se dissout dans le fer γ avec plus de facilité que le carbone il diminue la stabilité du carbone dans le fer γ

C'est ainsi sur le fer γ pur, peut au maximum, dissoudre 1,7%C (carbone) lorsqu'il a déjà dissout 4%Si, il suffit d'une teneur de 1,3% de carbone pour le saturer. C'est un élément graphitisant ainsi une fonte dans laquelle le carbone total(C_T), $C_T=3\%$ et Si=1,8% présente une structure :

- Blanche sur pièces de 5mm d'épaisseur

- Truitée sur pièces de 10mm d'épaisseur
- Grise sur pièces de 30mm d'épaisseur et plus

De même

Une pièce de 10mm d'épaisseur, coulée en fonte a 3,3% de carbone a une structure.

- Blanche, si la teneur en Si est de 1%
- Truitée si la teneur en Si est de 1,5%
- Grise dès que la teneur en Si dépasse 2%

La teneur en Si d'une fonte, doit être (ajustée) en fonction :

- De la teneur en carbone de la fonte
- De la vitesse de refroidissement des pièces moulées [10]

b) Phosphore : il est présent dans toutes les fontes, se combine facilement au fer pour donner un phosphore de fer Fe_3P . lequel forme :

- Avec le fer, un eutectique phosphoreux binaire.
- Fe_3P steadite. Dont la température de fusion est de 1050 °C
- Avec le fer et la cémentite un eutectique phosphoreux ternaire $\text{Fe}_3\text{P}-\text{Fe}_3\text{C}-\text{Fe}$ dont la température de fusion est de 950°C

L'eutectique phosphoreux dans les fontes est caractérisé par :

- Le fait qu'une expansion accompagne sa solidification
- Une température de fusion, relativement basse 950 °C
- Une très grande dureté
- Une très grande fragilité
- Un coefficient de dilatation relativement élevé

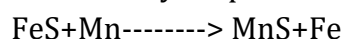
Le phosphore a sur la fonte les effets suivants :

- Il favorise l'obtention des détails sur les pièces moulées
- Il améliore la coulabilité du métal
- Il rend l'usinage des pièces difficile
- Il rend fragiles et cassantes les pièces moulées [10]

c) Soufre : il se combine facilement au fer des fontes pour donner le sulfure de fer FeS qui stabilise des carbures et en particulier la cémentite .il s'oppose à la formation du graphite, et il a pour effet de rendre blanche ou truitée, la structure des pièces moulées.

Il diminue la coulabilité de la fonte dès que sa teneur atteint 0,15%

Le soufre ayant pour le manganèse ; plus d'affinité que le fer,



Le sulfure de manganèse MnS formé, n'a pratiquement pas d'action gênante sur la fonte
On admet que pour neutraliser 1% de soufre, il faut 1,72%+0,3% de manganèse d'où sa teneur en $\text{Mn}=1,72\text{S}+0,3$ [10]

d) Manganèse : son rôle essentiel est de détruire le sulfure de fer.

Quand son pourcentage est supérieur à celui qui est suffisant pour assurer cette mission

Le manganèse tend à s'opposer à la graphitisation, mais ce n'est qu'à partir des teneurs de l'ordre de 0,8% à 1%.

Quand sa teneur dans la fonte est voisine ou supérieure à 1,5% le manganèse est considéré comme élément d'alliage. [10]

e) Cuivre : l'addition de Cu dans le lit de fusion de la fonte GS, lié à une baisse corrélative du titre en Si entraîne, au refroidissement dans l'état solide une perlitisation de la matrice.

Le Cu étant graphitisant au cours du refroidissement (état solide) de l'austénite à travers le domaine eutectoïde, soit vers 700°C

L'addition de Cu évite ainsi la ferritisation directe en variant la teneur en Cu, on obtient à volonté :

- Une fonte GS a matrice ferrito-perlitique
- Une fonte GS a matrice totalement perlitique
- En l'absence de cuivre, la matrice est ferritique [10]

I-5. Diagramme de MAURER

Le diagramme de MAURER (figure 6) permet de mettre en évidence, les effets simultanés du carbone et du silicium, ces droites divisent le plan en 5 zones à chacune desquelles correspond la structure de la fonte, dans un barreau cylindrique de $\phi=30\text{mm}$, coulé en sable étuvé.

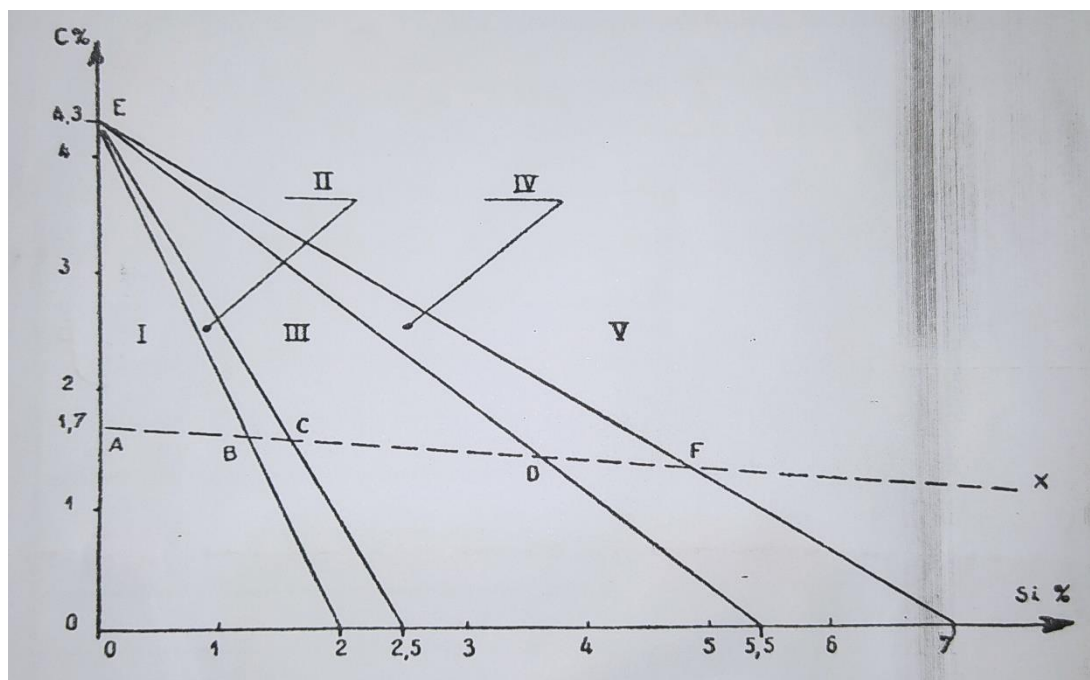


Figure 6. Diagramme de MAURER valable pour barreau de $\phi=30\text{mm}$

Ci-dessous le tableau 1 qui représente les types de fonte révélée par cassure du barreau et le constituant de la fonte correspondante par zone

Tableau 1 : Explicatif du diagramme de MAURER

ZONE	Type de fonte révélée par cassure du barreau	Constituant de la fonte correspondante
I	Blanche	Cementite+perlite
II	Truitée	Cementine+perlite+graphite
III	Perlitique	Perlite+graphite
IV	Ferrito-perlitique	Perlite+graphite+ferrite
V	Ferritique	Ferrite+graphite

Exemple : un barreau de $\phi=30\text{mm}$, coulé en sable étuvé avec une fonte dans laquelle : $C_t=3\%$ et $Si=0,5\%$ à une structure blanche

Un barreau identique coulé dans les mêmes conditions avec une fonte dans laquelle $C_t=2,5\%$ et $Si=2\%$ à une structure perlitiques; et une structure ferritique, si la fonte a une teneur en carbone de 3% alors que celle du silicium est supérieure à 3%

I-6. Effets simultanés du silicium et du phosphore

Ces éléments sont toujours présents dans les fontes à des taux plus ou moins élevés. Ces éléments modifiaient respectivement l'allure des diagrammes de solidification. Ces structures finales à froid, dépendent de la teneur réelle en carbone, vis-à-vis de la teneur eutectique.

Il est donc intéressant de savoir l'influence simultanée du silicium et phosphore sur une fonte, quelle est la teneur en carbone qui rend cette fonte eutectique.

- a) Carbone eutectique :** C'est la teneur en carbone pour laquelle, compte tenu des quantités respectives de silicium et de phosphore qu'elle contient, une fonte normale est eutectique.

$$C_E = 4,3 - 1/3(Si + P)$$

- b) Carbone équivalent :** Le carbone équivalent d'une fonte normale est la teneur en carbone total, que devrait avoir une fonte théorique pour que, les conditions de refroidissement des deux fontes considérées étant les mêmes, elles présentent à froid des structures identiques.

Fonte théorique = fonte composée de fer et de carbone

$$C_{eq} = C_T + 1/3(Si + P)$$

Une fonte normale :

- c)** Hypo-eutectique si son $C_e < 4,3$
- d)** Eutectique si son $C_e = 4,3$
- e)** Hyper-eutectique si son $C_e > 4,3$

c) Indice de saturation en carbone

L'indice de saturation en carbone (Sc), on l'exprime par le carbone total C_T d'une fonte normale considérée, par le carbone eutectique C_E de cette fonte : $Sc = C_T/C_E$.

Une fonte normale est dite :

- Hypo-eutectique si $Sc < 1$
- Eutectique si $Sc = 1$
- Hyper-eutectique si $Sc > 1$

I-7. Diagramme de SIPP

Le diagramme SIPP (figure 7) indique qu'elle est la structure d'une pièce d'épaisseur donnée, en fonction de la valeur de l'indice de saturation en carbone de la fonte grise normale coulée.

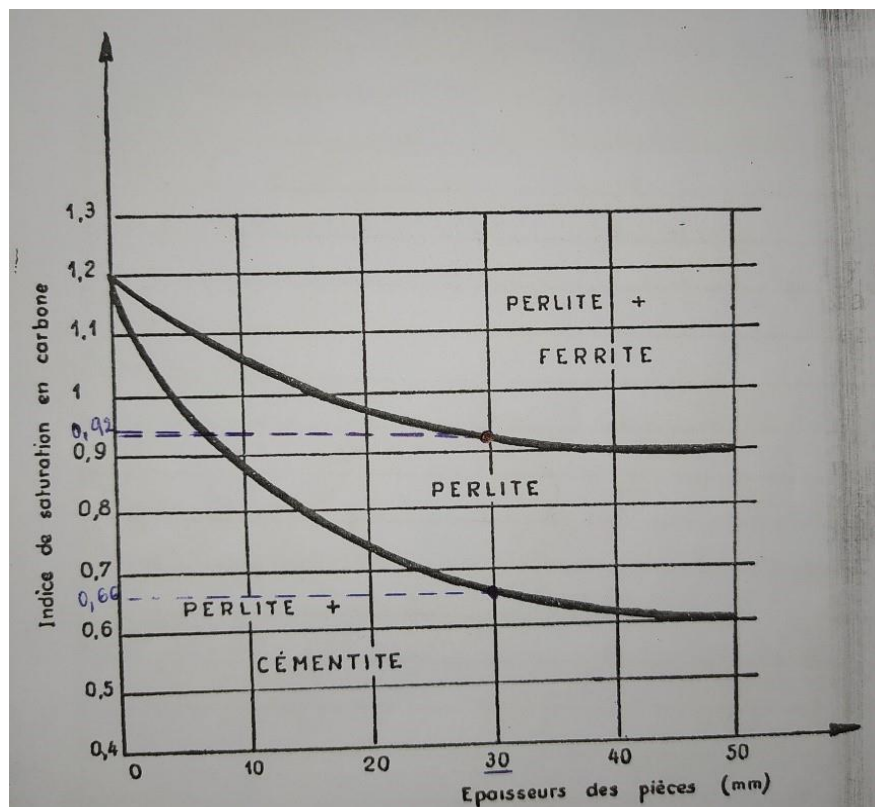


Figure 7. Diagramme de SIPP

I-8. Diagramme de SCHNEIDWIND

Le diagramme de SCHNEIDWIND (figure 8) indique qu'elle est la structure de la matrice d'une fonte normale, en fonction de l'équivalent en carbone C_{eq} , de la fonte coulée.

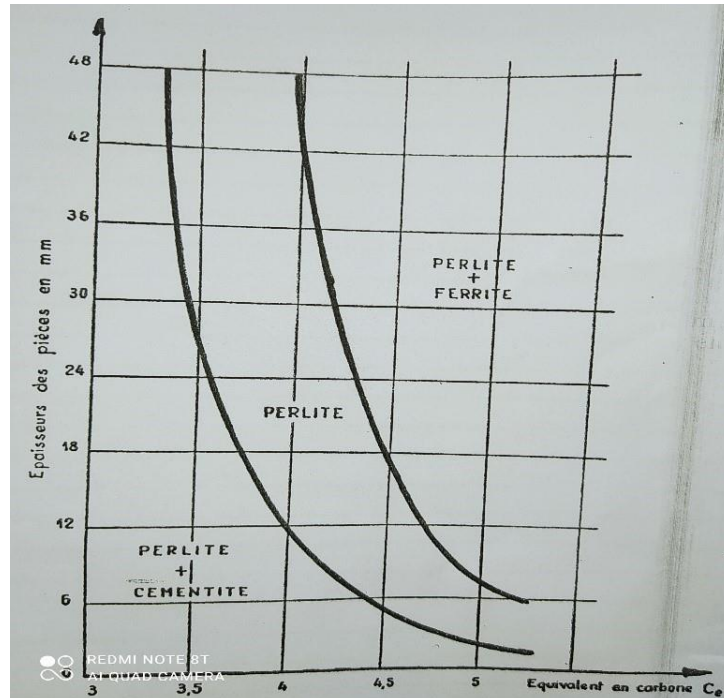


Figure 8. Diagramme de SCHNEIDWIND

I-9. Influence des éléments spéciaux

En ajoutant à une fonte normale des éléments spéciaux, il est possible, suivant le nombre, la nature et le pourcentage, de ces éléments d'obtenir dans les pièces moulées, des structures bien particulières.

Soit parce que les éléments d'alliages influencent les phénomènes de graphitisation de la fonte soit parce que, ces éléments ont un effet marquant sur la composition de la matrice.

I-9-1. Effets sur la graphitisation

a) Formation du graphite

Certain éléments, dit graphitisants (Nickel, Aluminium, Cuivre....) ont pour effet comme le silicium de favoriser au cours de la solidification et du refroidissement, la formation du graphite.

Au contraire, d'autres éléments, dits trempant ou anti graphitisants (chrome, molybdène, vanadium, manganèse au-dessus de 1,5%) ont un effet de stabiliser la cémentite ou du moins de retarder la décomposition de celle-ci au cours du refroidissement de la fonte.

○ b) Répartition du graphite

Certains éléments graphitisants (en particulier le Nickel) ont pour effet d'atténuer l'influence de la vitesse de refroidissement sur la répartition du graphite. Leur addition dans la fonte, permet d'obtenir une structure homogène dans le moulage. Même quand les sections des pièces coulées présentent des différences d'épaisseurs.

○ c) Allure du graphite

Le graphite sous l'action de certains éléments, au lieu de se former en lamelles, prend une allure beaucoup plus ramassée ; soit en pseudo-lamelles (cas d'une addition du titane) soit sous la forme quasi sphérique (graphite sphéroïdal) obtenu par addition à la fonte, de magnésium, de cérium etc...)

I-9-2. Effets sur la matrice

La matrice d'une fonte, c'est la masse métallique qui entoure les particules de graphite, les cristaux de cémentite libre et les diverses inclusions (eutectique, phosphoreux, sulfure de manganèse...) sont en grande parties liée aux propriétés de la fonte.

Certains éléments, par addition à une fonte normale, permettent d'obtenir des fontes spéciales, caractérisées par leurs matrices qui présentent des structures particulières. Ces éléments spéciaux, agissent suivant leur nature, et leur teneur dans l'alliage, de différentes façons :

- Formation, avec la cémentite, de carbure mixtes (cas du chrome) qui sont extrêmement durs ;
- Modification de la composition de l'austénite du fait de leur dissolution dans celle-ci ce qui provoque un changement des propriétés physiques de cette austénite ;
- Modification de la structure de la perlite laquelle est le plus généralement affinée, d'où les caractéristiques mécaniques améliorées ;
- Modification de la composition de la ferrite du fait de leur dissolution dans le fer γ qu'ils durcissent.

I-10. Solidification et refroidissement d'une fonte grise

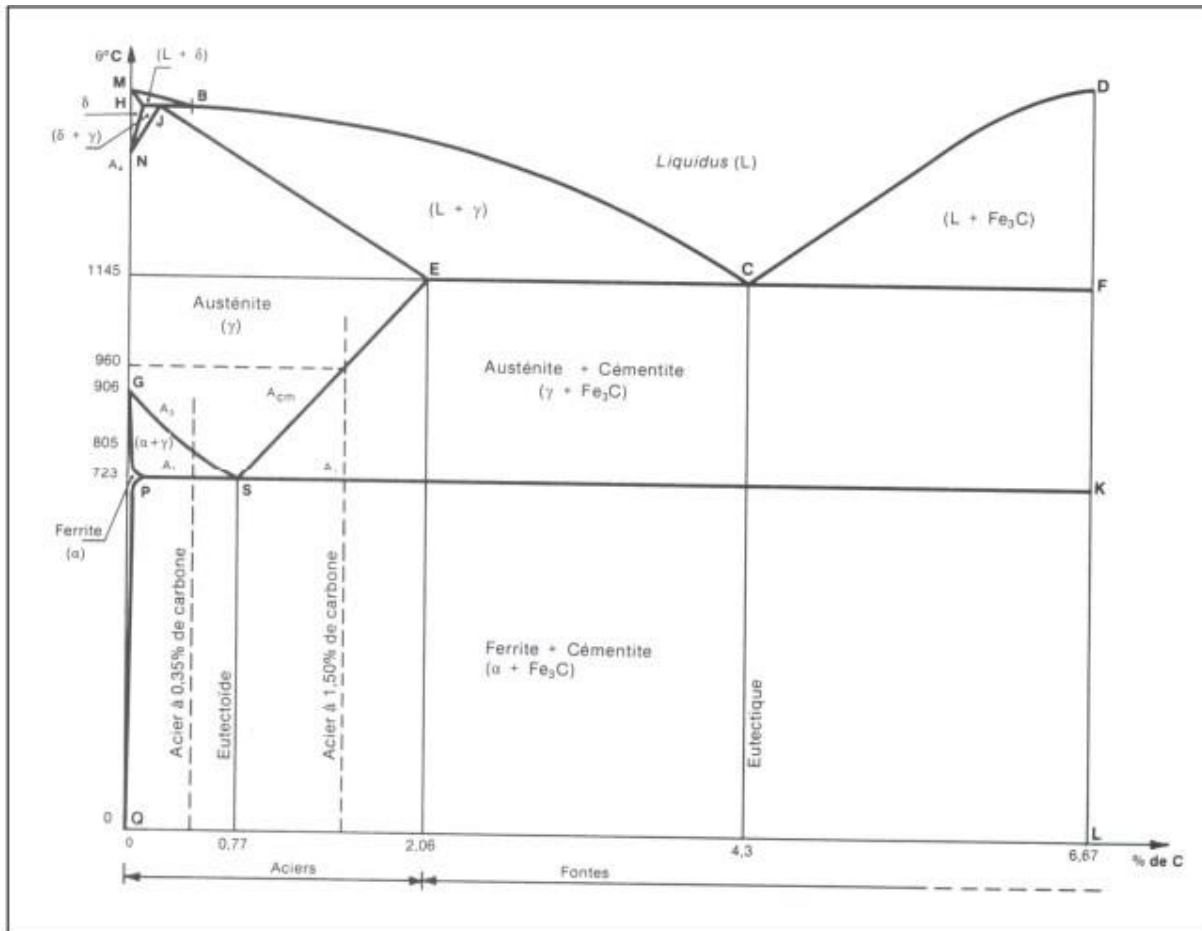


Figure 9. Diagramme Fer-carbone

Etudions la solidification et le refroidissement (T_e , τ) de la fonte grise STT (figure 9), à 3,7% de Carbone (valeur moyenne de carbone), c'est-à-dire de la fonte élaborée à la fonderie de Rouïba. E'S' (0,7% C) -> vitesse lente puisqu'en S' -> fonte ferritique.

Suivons la solidification et le refroidissement de la fonte grise ferritique et vérifions que les 3,7% du début se trouvent bien repartis dans le graphite de la matrice est qu'il n'y a pas eu de perte.

Pourcentage de γ et de Ge à 1135 °C - ϵ)

- Eutectique du diagramme Fe-G

$T^{\circ}C = 1135^{\circ}C$

%C = 4,2%

Composition (- γ ; -graphite eutectique(Ge))

Proposition de Ge dans l'eutectique (On applique la règle des segments inverses) :

$$\%Ge = \frac{\text{Masse Ge}}{2a\text{Masse Totale}} \times 100 = \frac{4,2 - 1,9}{100 - 1,9} \times 100 = \frac{2,30}{98,1} \times 100 = 2,345\%$$

%Ge dans l'eutectique = 2,345%

Masse d'eutectique (règle des segments inverses).

$$\frac{\text{Masse d'eutectique}}{\text{Masse totale}} \times 100 = \frac{3,7 - 1,9}{4,2 - 1,9} \times 100 = \frac{1,8}{2,3} = 78,26\%$$

Et dans l'eutectique il y a 2,345% Ge. Donc on a :

$$\frac{2,345 \times 78,26}{100} = 1,835\% \text{ de Ge}$$

Donc la masse de l'austénite (γ) qui se transformera au refroidissement est :

$$(100 - 1,835)\% = 98,165\%$$

Quand la masse d'austénite est (100-1,9) au point sur le diagramme à 1135°C - E, cette masse donne en se refroidissant jusqu'à 735°C au point S'

$$(1,9 - 0,7) = 1,2\% \text{ Gs} \quad \text{Gs graphique secondaire}$$

Notre masse de 98,165 donnera :

$$\frac{1,2 \times 98,165}{100} = 1,177\% \text{ de Gs}$$

A 735°C la masse de δ qui se transformera en ($\delta + \alpha$) de 735°C à 730°C. sera donc :

$$(98,165 - 1,177)\% = 96,988\%$$

Ce diagramme nous indique les proportions de γ et α formées à 730°C et finalement les proportions de perlite et α formées à l'ambiante (règle des segments inverse)

Masse de la perlite à l'ambiante

$$\frac{0,7 - 0,008}{0,89 - 0,008} \times 96,988 = \frac{0,692}{0,882} \times 96,988 = 76,038\%$$

Masse de perlite à l'ambiante est de 76,038%

Masse de ferrite à l'ambiante :

$$\frac{0,89 - 0,7}{0,89 - 0,008} \times 96,988 = \frac{0,19}{0,882} \times 96,988 = 20,85\%$$

Masse de ferrite à l'ambiante est de 20,85 %

Calcul du carbone (Cc) combiné dans la matrice. (Cc)

$$\text{Cc dans la masse de perlite} \quad \frac{0,89 \times 76,038}{100} = 0,676\%$$

$$\text{Cc dans la masse de ferrite} \quad \frac{0,008 \times 20,85}{100} = 0,0016\%$$

Récapitulons :

Graphique eutectique %Ge = 1,835 %

Graphique secondaire %Gs = 1,177 %

% Carbone combiné :

- Dans la perlite = 0,676 %
- Dans la ferrite = 0,0016%

TOTAL 3,6896 % $\approx$ 3,7 %

Le résultat obtenu est correct et très approché de 3,7%

I-11. Généralités sur les fontes à graphites sphéroïdales

La fonte de base destinée à la transformation en fonte G.S peut être élaborée dans quelconque des fours généralement utilisés en fonderie : cubilot acide ou basique avec ou sans mélangeur ; four électrique à arc, marche en duplex cubilot-four à arc, ou cubilot-four à induction, ou cubilot-four à réverbère.

La fonte GS doit son nom au fait que le graphite s'y trouve sous forme de sphéroïdes, assez analogues à certains nodules de forme sphéroïdale que l'on rencontre dans les fontes malléables à cœur blanc, à matrice perlitique, chaque fois que le métal renferme un excès notable de soufre par rapport au manganèse

La fonte GS n'est pas un matériau unique, mais une famille de matériaux qui présente une vaste gamme de propriétés obtenues par le contrôle de sa microstructure. La caractéristique commune à toutes les fontes GS est la forme à peu près sphérique des nodules de graphite, qui ont des propriétés anti fissuration et donnent à la fonte GS sa ductilité. Ces caractéristiques essentielles à la qualité et à l'inhomogénéité de la fonte GS sont mesurées et réglées avec un grand degré de précision par les maîtres fondeurs. Selon la matrice on distingue :

a) Fonte GS ferritique

Dans une matrice de ferrite, les sphéroïdes de graphite donnent à la fonte de bonnes propriétés de ductilité, de résistance à l'impact et de résistance à la traction, ainsi qu'une limite d'élasticité équivalente à celle d'un acier à faible teneur en carbone. On peut couler directement les pièces en fonte GS ferritique brute, mais on peut aussi les soumettre à un traitement thermique supplémentaire de recuit afin de maximiser leur ductilité et leur ténacité à basse température

b) Fonte GS ferritique/perlitique

Ce type de fonte GS est le plus commun ; habituellement, on coule directement les pièces à l'état brut. Les sphéroïdes de graphite sont dans une matrice contenant de la ferrite et de la perlite, et on obtient des propriétés intermédiaires entre celles des fontes ferritiques

et perlitiques, avec de bonnes caractéristiques d'usinabilité et de faibles coûts de production.

c) Fonte GS perlitique

Les sphéroïdes de graphite dans une matrice de perlite donnent une fonte à haute résistance dotée d'une bonne résistance à l'usure et à caractéristiques moyennes de ductilité et de résistance à l'impact. Son usinabilité est également meilleure que celle des aciers à propriétés physiques comparables.

d) Fonte GS martensitique

Pour obtenir ce type de fonte GS, il faut éviter la formation de perlite en ajoutant des proportions adéquates d'alliages, et utiliser un traitement thermique de trempe. La matrice de martensite trempée en fait un matériau à haute résistance mécanique et d'une grande résistance à l'usure, mais à plus faible ductilité et ténacité.

e) Fonte GS bainitique

On peut obtenir ce type de fonte par alliage et/ou par traitement thermique mais sans maintien de la température intermédiaire ; la fonte ainsi obtenue est un matériau dur et d'une grande résistance à l'usure et une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation, de bonnes propriétés magnétiques, ainsi qu'une bonne résistance et une grande stabilité dimensionnelle aux températures élevées.

I-11-1. Sphéroïdisation

Le graphite sphéroïdal est obtenu par un traitement de sphéroïdisation qui a lieu avant la coulée. Lors de cette étape, des éléments sphéroïdisants tels que le Mg, le Ce ou des terres rares, sont ajoutés en faible quantité dans le bain liquide (entre 0,03% et 0,05% pour le Mg). En général, des alliages de ferrosilicium contenant du magnésium sont utilisés pour cela. Le rôle de ces éléments a d'abord été attribué à la modification de la tension de surface du liquide, mais il a été montré que le caractère sphéroïdisant de ces éléments était dû à leur capacité à réagir avec l'oxygène et le soufre présents dans le bain liquide.

En effet, des études ont montré qu'il était possible d'obtenir du graphite sphéroïdal dans des alliages Fe-C-Si ultra purs élaborés sous vide [6], autrement dit que l'ajout d'éléments sphéroïdisants n'est pas nécessaire à l'obtention de graphite sphéroïdal dans ces conditions.

I-11-2. Inoculation

- Le traitement de sphéroïdisation donne à la fonte une forte tendance carburique. Afin d'obtenir une fonte grise, un traitement d'inoculation ultérieur est nécessaire. Le traitement d'inoculation permet d'obtenir une fonte avec du carbone à structure graphitique. Cette inoculation se fait par l'addition d'un élément graphitisant qui permet d'obtenir une fonte grise en combattant la tendance naturelle du mélange à se solidifier dans le diagramme métastable .

Un inoculant (figure 10) est un matériau qui, ajouté à la fonte liquide, crée des sites préférentiels de germination du graphite. Il s'agit traditionnellement de ferro-silicium, de calcium-silicium ou de graphite. Actuellement, les inoculants les plus utilisés sont le ferro-silicium contenant des quantités contrôlées d'éléments tels que Ca, Al, Ba, Sr, Zr, Ce, Ti ou Bi [7].



Figure 10. Produit d'inoculation pour une fonte GS

I-12. Schéma de définition des principes de fonctionnement d'une fonderie

La fonderie, c'est aussi une industrie produisant des pièces de toutes natures, en toutes quantités, de la façon la plus économique à partir de matières premières brutes (ferrailles, déchets de tôles, bocages), contrairement à certaines techniques concurrentes (forgeage, mécanosoudage) utilisant des produits semi-finis comme les tôles neuves, les barres et billettes en acier de toutes nuances, élaborés par la sidérurgie.

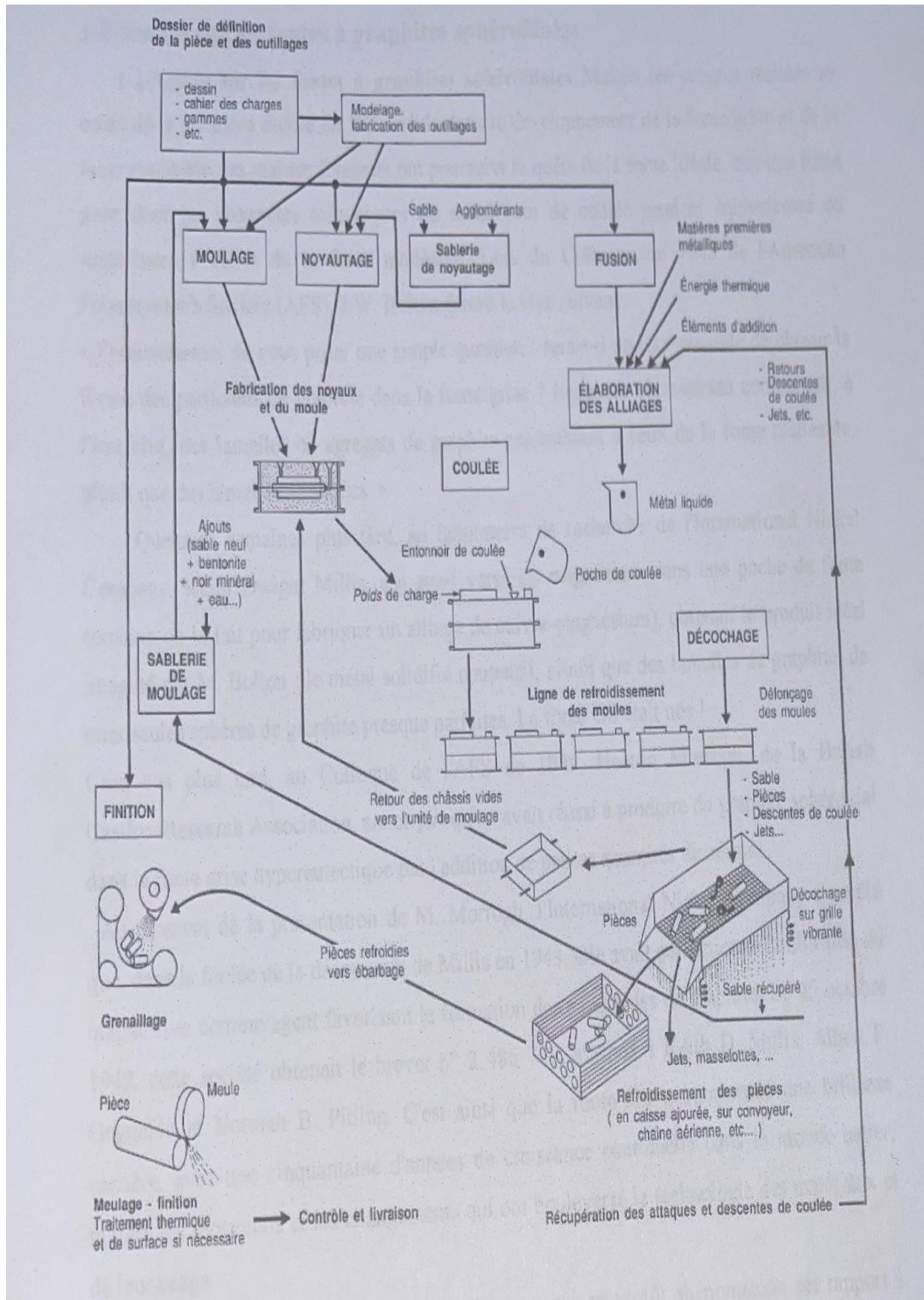


Figure 11. Schéma de définition de principe de fonctionnement de la fonderie

I-13. Traitements thermiques

Définition et généralités

On désigne sous le nom de traitement thermique, une opération au cours de laquelle une pièce métallique est portée d'une température ordinaire à une certaine température plus élevée θ , puis maintenue à cette température pendant un certain temps et enfin ramenée à la température ordinaire.

Les effets des traitements thermiques dépendent pour un même métal :

- De la température θ
- De la durée de maintien de la pièce métallique à cette $t^\circ = \theta$
- De la vitesse avec laquelle sont réalisées les opérations de chauffage et de refroidissement.

Le but de ces traitements thermiques est d'obtenir une amélioration d'une ou de plusieurs caractéristiques mécaniques du métal traité.

Les traitements thermiques fondamentaux sont : la trempe, le revenu et les recuits.

1-Trempe

a) But : Conserver, à l'ambiante, la structure d'un alliage qui n'est en équilibre qu'à température élevée, ou faire naître, par une vitesse de refroidissement adéquate, une nouvelle structure hors des équilibres du diagramme.

Ceci en vue de donner à l'alliage les qualités de cette structure de trempe nécessaire à son emploi futur

b) Phase du traitement de trempe

- **Chauffage :** Il se fait à une température généralement élevée, déterminée par les lignes de transformation du diagramme, jusqu'à un domaine où l'alliage aura une structure homogène (généralement solution solide)
- **Maintien :** à cette température pour homogénéisation de la structure dans toute la pièce à tremper. Sa durée dépend donc de la masse, du volume et de la forme de la pièce.
- **Refroidissement :** Le plus rapide possible jusqu'à l'ambiante ou même une température inférieure à l'ambiante, pour garder à cette température, la structure obtenue au chauffage.

Conclusion : on peut donc dire que toute structure de trempe est une structure hors d'équilibre.

2-Les revenus

Ils consistent en :

- Un chauffage à une température inférieure à la température de chauffage de la trempe suivi d'un refroidissement généralement lent.

Résultat : Ils modifient les caractéristiques de trempe et suppriment les tensions internes engendrées dans l'alliage par la trempe.

3-Les recuits

Ils consistent en :

- Un chauffage à une température généralement élevée suivi d'un refroidissement généralement très lent.

Résultats : Ils annulent les effets des traitements thermiques et des traitements mécaniques qu'a pu subir l'alliage antérieurement.

Ils amènent l'alliage dans un état d'équilibre le plus complet possible.

On peut obtenir la fonte vers un état purement ferritique par un recuit de ferritisation, ou vers un état purement perlitique par un traitement de normalisation.

Recuit de ferritisation de la G.S

La figure 12 montre le diagramme des traitements thermiques de ferritisation de type T1

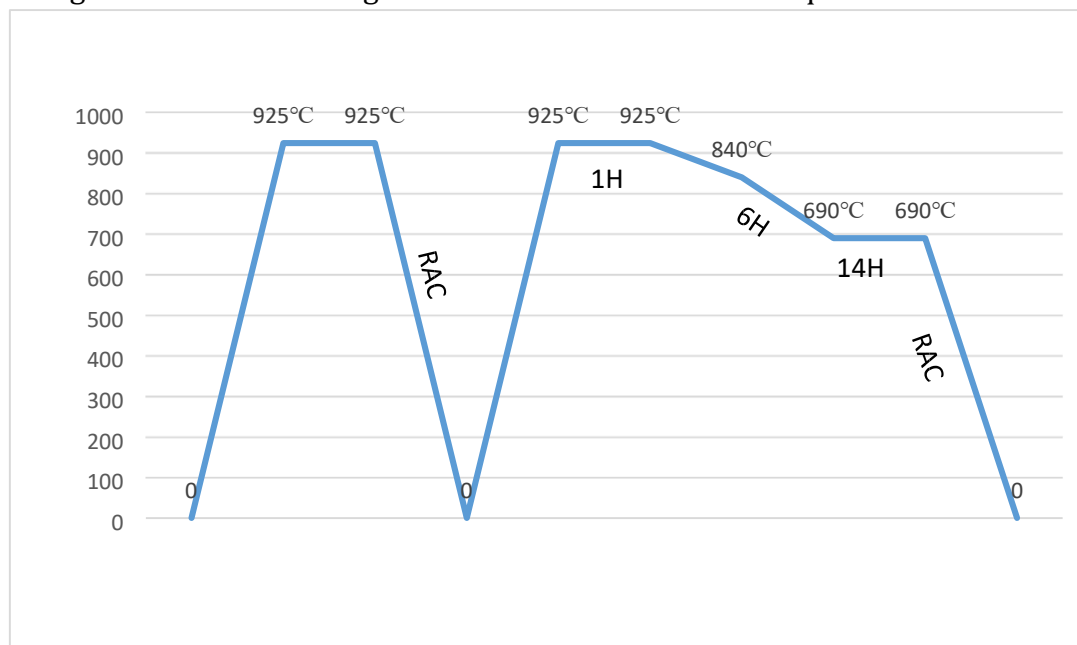


Figure 12. Diagramme des traitements thermiques de ferritisation de type T1

RAC : Refroidissement a l'air calme

La figure 13 montre le diagramme de normalisation suivi de relaxation ou d'adoucissement.

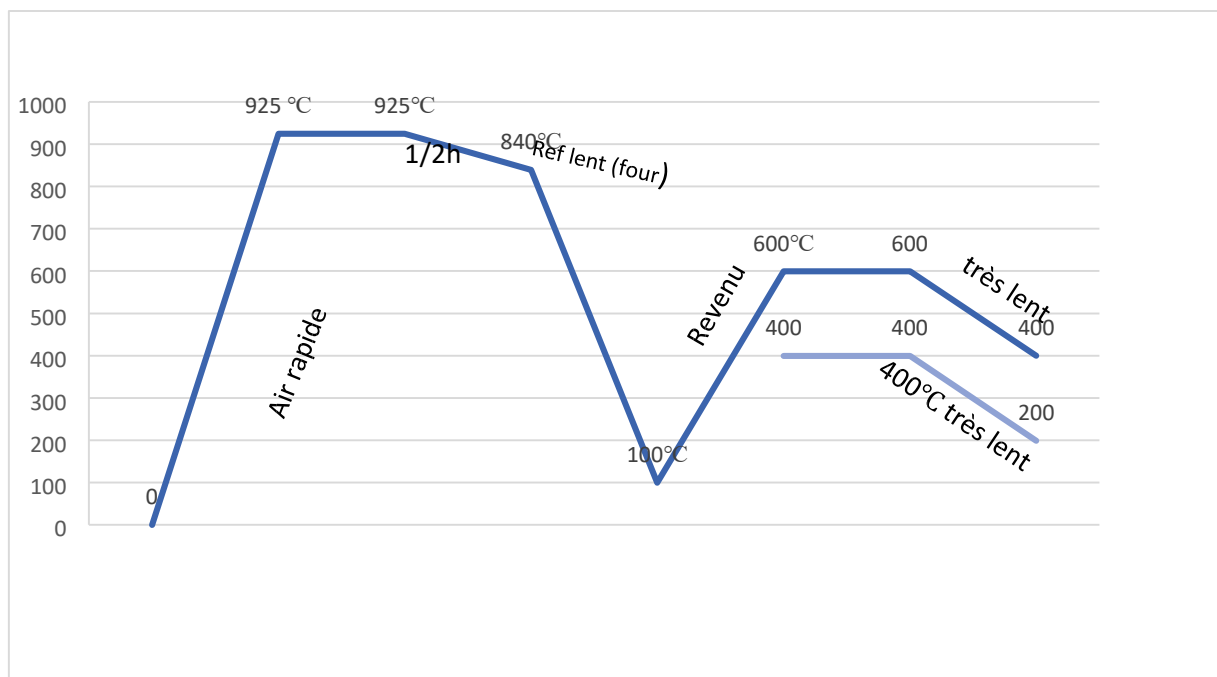


Figure13. Diagramme de traitement thermique de normalisation

Chapitre II

Partie expérimentale

II-1. Introduction

Dans ce chapitre, on a fait une comparaison des propriétés mécaniques et structurales de trois types de fontes élaborées à la fonderie de ROUIBA (SNVI) à savoir la fonte à graphite lamellaire (FGL) nommée dans le milieu industriel FT 25 et la fonte à graphite sphéroïdale (FGS 450-10) nommée STT dans le milieu industriel. Cette dernière ne subit pas de traitement thermique, contrairement à la fonte à graphite sphéroïdale (FGS 400-15) nommée GSC qui subit un traitement thermique.

II-2. Matériels utilisés dans la fonderie

A l'échelle industrielle, plusieurs procédés sont utilisés pour l'obtention des fontes grises. A la fonderie de ROUIBA, on utilise les fours à induction.

II-2-1. Four à induction

Les fours électriques se sont développés en fonderie dès 1908 mais surtout depuis 1950 pour la fusion ou le maintien. Ils présentent des avantages spécifiques liés à l'utilisation de l'énergie électrique, propre, facile à mesurer et à réguler. En outre :

- Les pertes au feu sont réduites et constantes, les risques d'oxydation et d'absorption des gaz très diminués.

- _ L'obtention des hautes températures est plus facile, ce qui est favorable aux réactions chimiques d'affinage,

Un four à induction se compose principalement des éléments suivants :

Le creuset : comporte un garnissage réfractaire destiné à recevoir la charge métallique autour duquel est montée une bobine inductrice refroidie à l'eau. Un système de rotation autour d'un axe situé près du bec de coulée permet de vidanger le four. Les revêtements acides des creusets sont les plus fréquemment utilisés pour l'élaboration de la fonte et de l'acier. Ce type de revêtement à une bonne résistance aux chocs thermiques.

L'inducteur : L'inducteur est schématiquement constitué par un tube de cuivre électrolytique très pur (faible résistivité) enroulé en bobine, dans lequel circule l'eau de refroidissement.

La carcasse : Pour contenir les vibrations générées par les forces électromagnétiques, la bobine et les écrans sont solidement fixés à l'intérieur d'une carcasse. Cette carcasse est Constituée soit d'une virole en tôle d'acier très résistant, soit d'une charpente métallique ajourée qui permet de surveiller l'état de la bobine. Le système de basculement est actionné par un vérin.

II-3. Les matières premières utilisées

Les matières premières utilisées dans le four sont : les tôles d'aciers, la fonte neuve et les pièces rebutées.

La charge totale composée est de 10 tonnes.

Si la nuance des pièces rebutées est de Ft25 (FGL : fonte grise lamellaire), la charge est constituée de:

- 2 tonnes de fonte neuve hématite (importée) ;
- 6 tonnes de la fonte de retour (FGL) ;
- 2 tonnes d'acier doux.

Si la nuance des pièces rebutées est de FGS (fonte grise sphéroïdale), la charge contient:

- 2 tonnes de fonte neuve ;
- 6 tonnes de la fonte de retour (FGS) ;
- 2 tonnes de l'acier doux.

II-4. Elaboration des fontes

Les fontes GL et GS élaborées sont transvasées dans le four de maintien afin de maintenir leur température à hauteur de 1390-1410°C pour la FGS et à 1360-1380°C pour la FGL là où elles vont subir des corrections éventuelles de composition chimique (C, Si, Mn) après analyse sur les échantillons appelés médailles.

Dans la poche de coulée destinée pour l'élaboration des deux fontes :

- **FGS et STT** : On introduit une quantité de 17 à 20 kg d'un ferro-alliage Fe - Si - Mg (Fer — Silicium - magnésium) avec un taux de 1,8% de Mg pour une charge d'une tonne.
- **FGL** : Une quantité de 3,5 à 5 kg de Fe-Si est introduite.

Un acier pour la couverture, se trouvant à l'intérieur de la poche de coulée, son rôle principal est de retarder la réaction entre le métal liquide et l'alliage rajouté. Ses dimensions sont de 10 mm de longueur, 10 mm de largeur et 5 à 6 mm d'épaisseur.

II-5. Analyse chimique

La composition chimique influe sur la cristallisation et la graphitisation de la fonte. En changeant la composition chimique, on peut obtenir telle ou telle structure et par conséquent telle ou telle propriété mécanique de la fonte. Après chaque coulée, on prélève un échantillon pour analyse spectrométrique afin de déterminer les principaux éléments (C, Si, Mn, P, S) à l'aide d'un spectromètre ARUN (figure 14). L'analyse chimique des échantillons a été réalisée suivant la norme ISO (NF-9001).

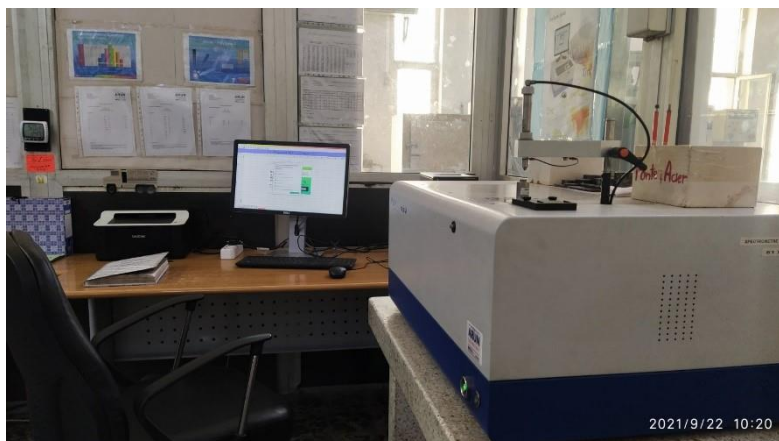


Figure 14. Spectromètre ARUN

Les compositions chimiques des fontes étudiées sont données dans le tableau 2 :

Tableau 2. Compositions chimiques des fontes

Nuance	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Indice de saturation
FGL FT25	3,16- 3,36	1,60 1,90	0,60- 0,90	0,15	0,10	0,83-0,90
STT FGS450-10	3,50 -3,90	2,75 3,30	0,30	0,06	0,02	1,02-1,20
GSC FGS400-15	3,50- 4,00	2,50 3,00	0,30	0,06	0,02	1,00-1,19

II-6. Caractérisation mécanique

Pour les essais mécaniques, on a solidifié des barreaux de 30 et 35 mm de diamètre et de longueur de 300 mm dans des noyaux en sable durci au CO₂ servant de moules, nommés **KeelBlock**. (Voir la figure 15).



Figure 15. Keelblock

Ces barreaux ont été coulés à une température de 1450°C pour la STT et la GSC et à 1380°C pour la FGL.

L'aspect des barreaux obtenus est illustré dans les figures 16, 17 et 18.



Figure 16. Barreaux après coulée



Figure 17. Barreaux finis

On remarque que les barreaux présentent des traces sur leurs surfaces externes, ceci est dû au refroidissement rapide.



Figure 18. Barreaux après traitement thermique

L'aspect extérieur de ces barreaux tend vers le bleu à cause de la température du traitement thermique qui avoisine 925°C.

II-6-1. La résistance à la traction

Après tronçonnage et le tournage de ces barreaux, on obtient des éprouvettes aux dimensions suivantes :

- **Pour la FGL** : Des éprouvettes cylindriques de longueur de 150mm et un diamètre de 28 mm avec une gorge au milieu de 20 mm.
- **Pour la STT et GSC** : Des éprouvettes cylindriques de longueur de 135 mm et un diamètre de 20 mm avec une gorge au milieu de 14 mm (Figure 19).

On exerce sur ces échantillons un effort de traction uni-axial, sur une machine de traction de type SCHIMADZ comme le montre la (figure 21) après avoir passé la limite élastique, on continue à exercer une tension sur l'éprouvette, la contrainte passe par un maximum pour décroître ensuite jusqu'à la rupture.



Figure 19 : Eprouvette de traction

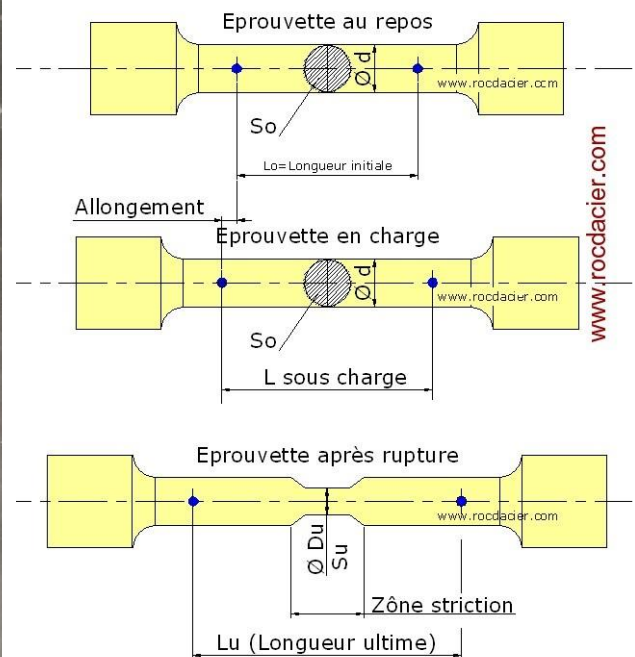


Figure20 : Présentation schématique

La machine de traction utilisée est du type SCHIMADZ comme le montre la figure 21.



Figure 21. Machine de traction

Les résultats des essais de traction effectués sur les différents échantillons des trois types de fontes sont donnés respectivement dans les figures 22, 23 et 24 et les tableaux 3, 4 et 5.

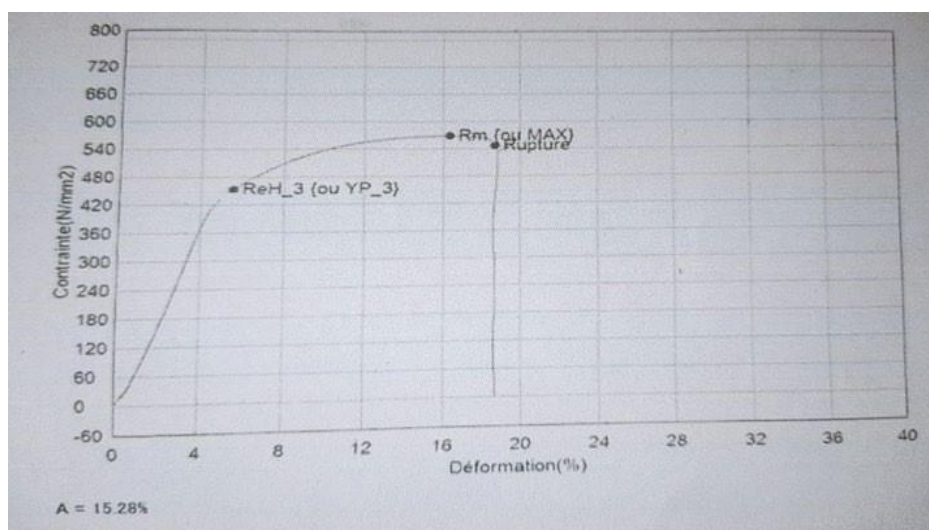


Figure 22. Résultats d'essai de traction pour la fonte STT

D'après la figure 22 on remarque un allongement $A = 15,28\%$ avec une résistance maximale de $R_m = 567 \text{ N/mm}^2$ et une contrainte à la rupture de $R_r = 453 \text{ N/mm}^2$. Ces résultats sont relatifs à cette nuance.

Tableau 3. Résultat de l'essai de traction de la fonte STT

Nuance	Résistance maximum (R_m)	Contrainte à la rupture (R_r)	Déformation de rupture	Allongement (A)
STT	567 N/mm^2	453 N/mm^2	18,63 %	15,28%

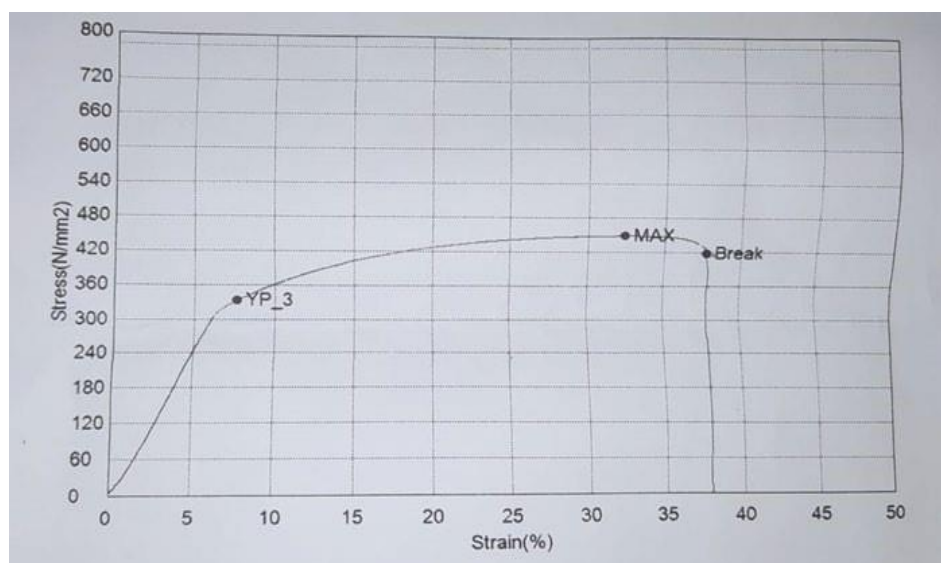


Figure 23. Résultats de l'essai de traction de la fonte GSC

D'après la figure 23, on remarque un allongement important $A=21,85\%$ (un domaine plastique très large) avec une résistance maximale de 448 N/mm^2 , ce qui signifie que cet alliage est riche en ferrite.

Tableau 4. Résultats de l'essai de traction de la fonte GSC

Nuance	$R_m \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$R_r \text{ (N/mm}^2\text{)}$	Déformation à la rupture (%)	A (%)
GSC	448	333	37,72	21,85

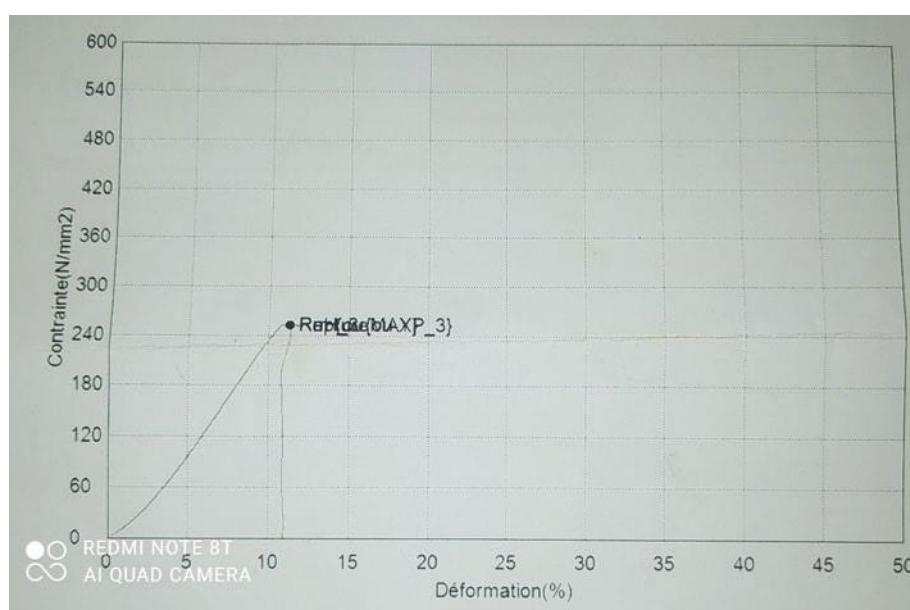


Figure 24. Résultats de l'essai de traction de la fonte FGL

D'après la figure 24, on remarque que l'allongement $A\%$ est négligeable ce qui signifie que la ténacité du matériau est réduite (absence de domaine plastique). Sa résistance est estimée $257,11\text{N/mm}^2$

Tableau 5. Résultats de l'essai de traction pour une fonte FGL

Nuance	R_m (N/mm ²)	Déformation à la rupture (%)
FGL	257,11	11,26

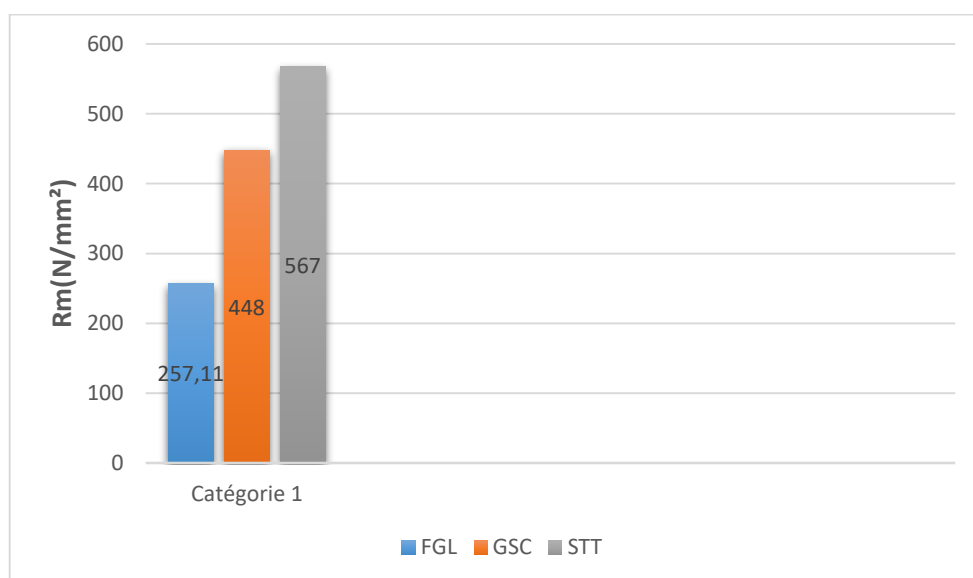


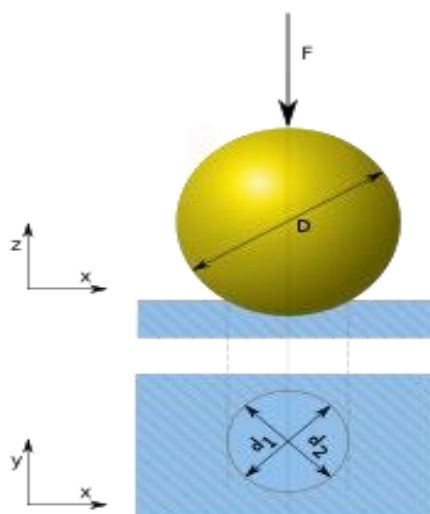
Figure 24.a. histogramme de l'essai de traction

II-6-2. La dureté Brinell

Les mesures de la dureté sont d'une grande utilité à cause de leur simplicité et leur caractère peu destructif. La dureté caractérise la résistance à la déformation. Cependant, le processus opératoire doit être très précis pour assurer la reproductibilité et la fidélité des résultats [8].

L'essai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à essayer. La charge étant constante et on mesure la dimension de l'empreinte. La dureté s'exprime par le rapport de la force sur la surface projetée de l'empreinte $HB=F/S$ (Voir figure 25).

Dans notre cas, on a utilisé la presse brinell avec une charge constante et une bille en acier trempé comme pénétrateur.

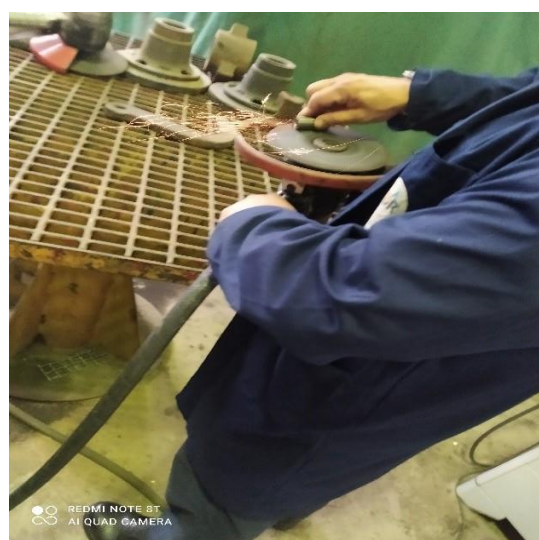
**Figure 25.** Dureté Brinell

Mode opératoire

Placer le pénétrateur en contact avec la surface du matériau. Appliquer la force et la maintenir pendant 10 à 15 secondes.

Mesurer sur l'empreinte deux diamètres à 90° l'un de l'autre. La mesure est effectuée à l'aide d'un dispositif grossissant et d'une règle graduée tenant compte du facteur de grossissement.

La machine de dureté employée est de marque STRUERS (voir figure 26). Les essais ont été effectués selon la norme NF (ISO-9001). La figure 27 illustre la méthode de préparation de l'échantillon pour l'essai de dureté.

**Figure 26.** Machine de dureté**Figure 27.** Préparation de l'éprouvette

Les valeurs de la dureté Brinell sont consignées dans le tableau 6

Tableau 6. Résultats de l'essai de dureté des barreaux préparés pour les 3 nuances

Echantillon	FGL	FGS	STT
Résultats	255 HB	165 HB	168 HB

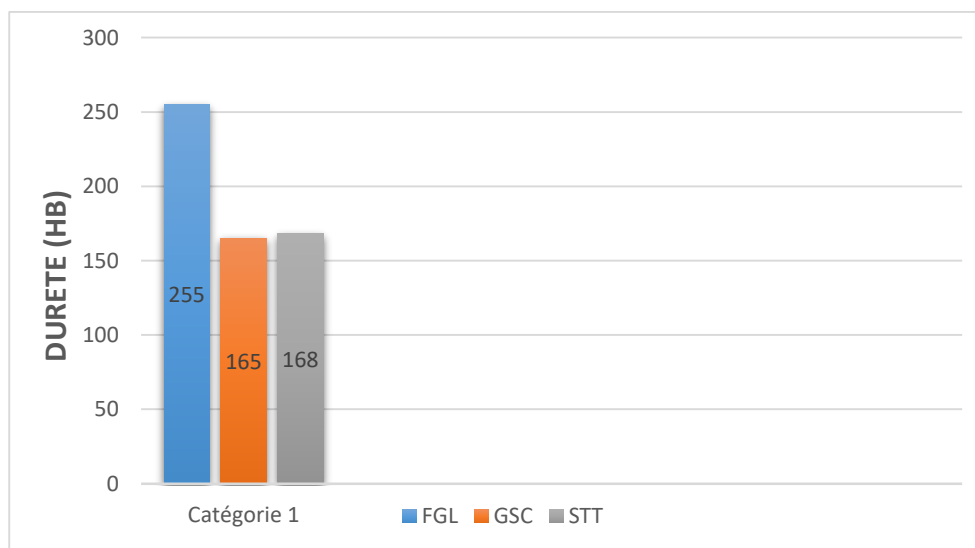


Figure 27.a. histogramme de l'essai de dureté

D'après les résultats du tableau 6, on remarque que la nuance FGL possède la dureté la plus élevée avec une valeur de 255 HB et cela est dû à la présence de la perlite qu'elle contient.

II-6-3. L'essai de résilience

La résilience ou la résistance au choc est caractérisée par le quotient de l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette en un seul coup par l'aire de la section rompue. L'essai consiste à rompre, d'un seul coup de mouton pendule (figure 28), une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis (figure 29). On détermine l'énergie W absorbée dont on déduit la résilience, elle est notée KCU ou KCV en (J/cm^2) selon l'entaille de l'éprouvette utilisée.

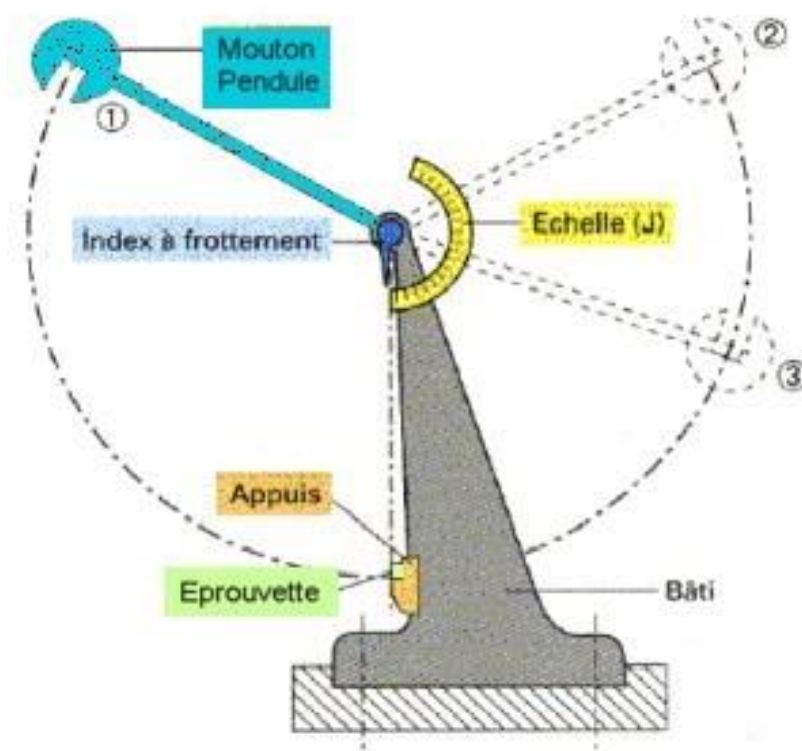


Figure 28. Dispositif expérimentale

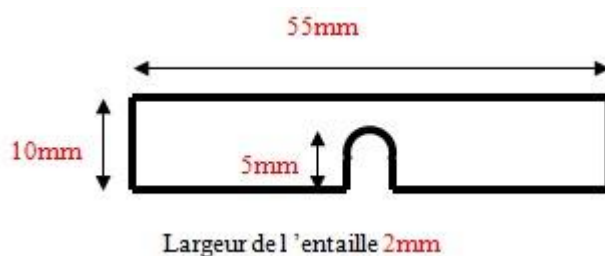


Figure 29. Schéma de l'éprouvette de résilience

Dans notre cas, on a utilisé des éprouvettes avec entaille en U et les valeurs sont consignées dans le tableau 7.

Tableau 7. Résultat des essais de résilience

Nuance	FGL	GSC	STT
Résilience (J/cm^2) é	/	18,2	11,45

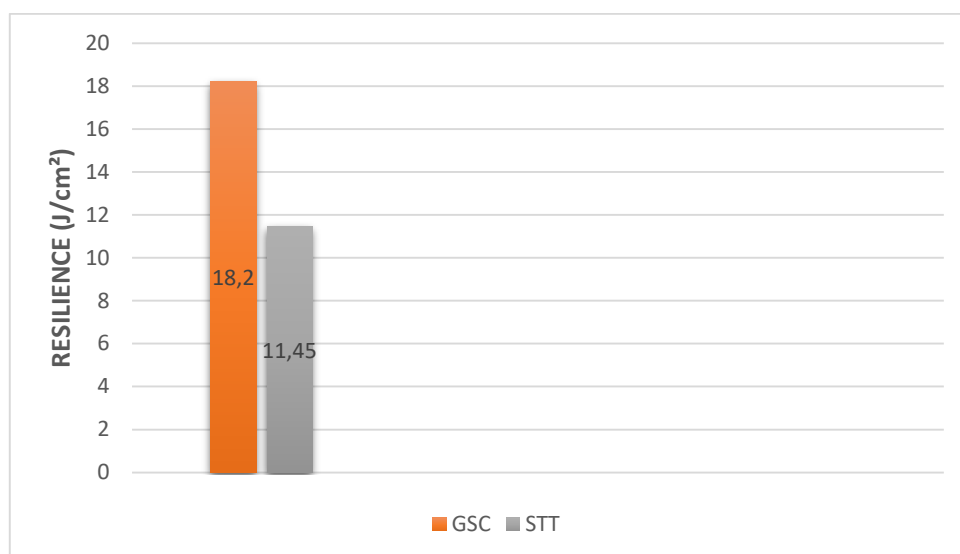


Figure 29.a. histogramme de l'essai de résilience

D'après le tableau 7 on remarque que la résilience est négligeable pour la nuance FGL et cela est dû à la surface réduite de la courbe de traction.

On remarque aussi que la nuance GSC a la résilience la plus élevée avec une valeur de 18,2 (J/cm²). Et cela est dû à la ferritisation de cette fonte.

Les spécifications (valeurs admises) des différents essais mécaniques effectués sont résumées dans le tableau 8.

Tableau 8. Spécifications des essais mécaniques

NUANCE	DURETE 3000/10/30	Rm (N/mm²)	Résilience (J/cm²)	A (%)
(FGL) FT 25	187 HB 260 HB	≥ 250	/	/
(GSC) FGS400-15	137 HB 180 HB	≥ 400	≥ 15	≥ 15
(STT) FGS 450-10	150 HB 200 HB	≥ 450	≥ 11	≥ 10

On peut déduire que les résultats obtenus des trois nuances répondent aux spécifications en vigueur.

II-7. Examen micrographique

II-7-1. Principe de la métallographie

La micrographie ou métallographie microscopique permet de mettre en évidence les constituants des produits métallurgiques (métaux pur, solutions solides, eutectiques). Cette technique consiste à examiner au microscope par réflexion, une surface polie et attaquée chimiquement avec un réactif approprié

II-7-2. Préparation des échantillons

Les barreaux solidifiés des différents types de fontes sont préalablement découpés transversalement avec une scie. Les surfaces des échantillons obtenues, sont soumises à l'abrasion de papiers couverts d'abrasifs de grosseur décroissante (180-600-1200). Les échantillons sont frottés successivement sur chacun des papiers jusqu'au plus fin, le polissage étant effectué sur une polisseuse mécanique de marque BUEHLER (figure 30). La préparation des échantillons a été effectuée suivant la norme NF (ISO-9001).

L'observation au microscope optique nécessitant un état de surface parfaitement poli, un polissage fin à la pâte diamantée est nécessaire pour donner à l'échantillon toute rayure visible au microscope et d'obtenir une surface plane réfléchissante, facilitant l'examen.



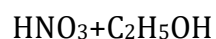
Figure 30. Polisseuse BUEHLER



Figure 31. Echantillon du barreau avant polissage**Figure 32.** Echantillon après polissage

- **L'attaque chimique**

L'attaque chimique de cette surface polie a été faite à l'aide d'un réactif approprié le NITAL :



Elle permet de révéler la structure et de découvrir les éléments constitutifs.

Les attaques chimiques sont effectuées à la température ambiante, et les temps d'attaque sont déterminés expérimentalement pour tous les échantillons, une immersion rapide dans le réactif, suivie d'un rinçage à l'eau, puis d'un séchage à l'air comprimé ce qui donne de bons résultats à l'examen micrographique [9].

- **Microscope optique**

Les observations métallographiques sont effectuées sur un microscope optique de marque OLYMPUS CX 40 (figure 33), équipé d'un appareil photo numérique de marque (CANON de 3x zoom). Cette technique nous permet d'observer la microstructure de cette alliage.

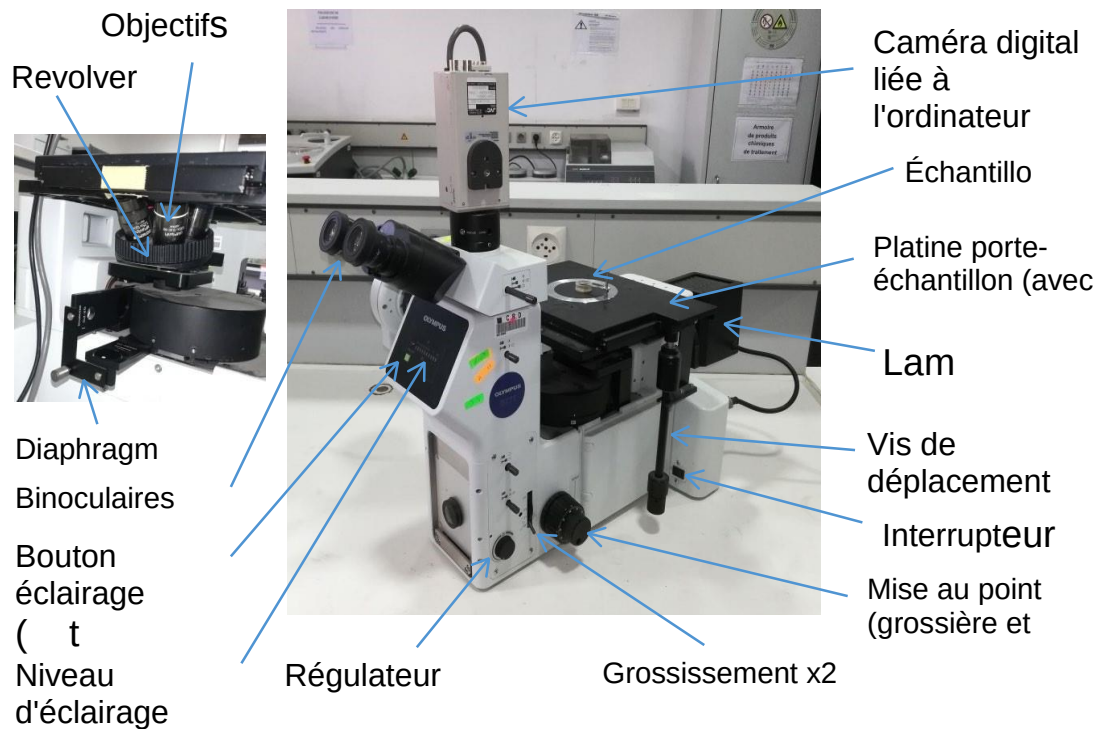


Figure 33. Microscope optique

II-7-3. Etude de la microstructure

Après avoir élaboré les barreaux des différentes fontes et découper les échantillons à l'aide d'une scie, nous avons poli les surfaces des sections obtenues par les procédés décrits précédemment.

Cet examen nous a révélé les microstructures suivantes :

Pour la FGL Ft25 :

La figure 34 montre une photo prise au centre de l'échantillon avec un agrandissement de (X500) de la microstructure de la fonte Ft25 avant attaque chimique, observée sur un échantillon de diamètre 35mm coulé à la température 1380°C après inoculation par Fe-Si dans la poche.

Après attaque chimique, cette microstructure montre (figure 35) une répartition uniforme et régulière du graphite type A avec présence de 5% de ferrite et très peu de cémentite, structure perlitique cela est dû à l'action de l'inoculation par FeSi75

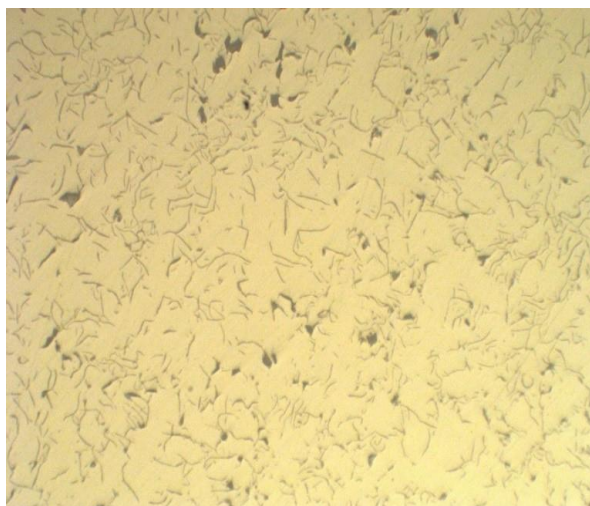


Figure 34. Echantillon sans attaque(FGL)

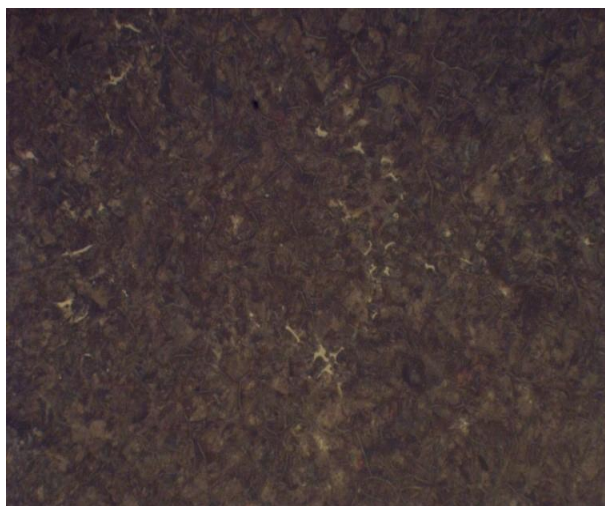


Figure 35. Echantillon avec attaque(FGL)

Pour la fonte STT :

La figure 36 montre une photo prise au centre de l'échantillon avec un agrandissement (X500) de la microstructure de la fonte STT avant attaque chimique, observée sur un échantillon de diamètre 35mm coulé à la température 1420 °C après addition de Fe-Si-Mg dans la poche.

Après attaque chimique, cette microstructure montre (figure 37) une répartition uniforme des sphères de graphite de l'extérieur vers l'intérieur avec la présence d'environ 25% de perlite et des traces de cémentite.

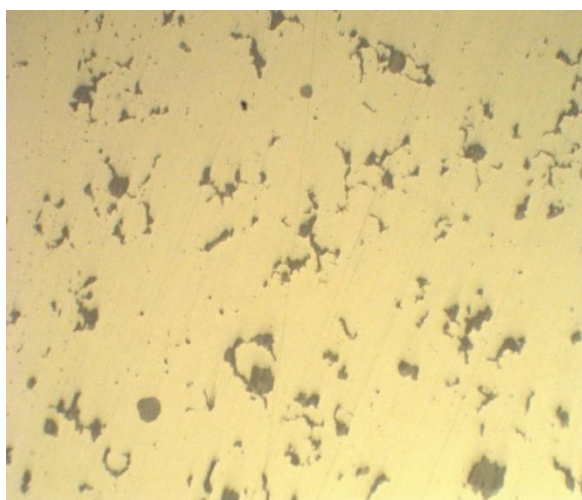


Figure 36. Avant attaque chimique(STT)

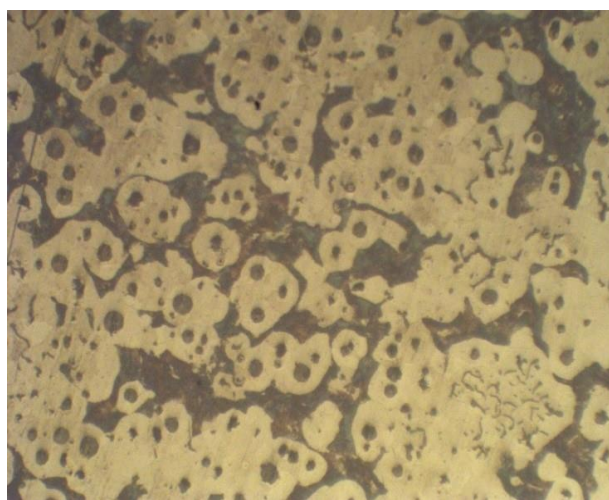


Figure 37. Après attaque chimique(STT)

Pour la GSC :

La figure 38 montre une photo prise au centre X500 de la microstructure de la fonte GSC avant attaque chimique, observée sur un échantillon de diamètre 35 mm coulé à la température 1420 °C après addition de Fe-Si-Mg dans la poche.

Après l'attaque chimique, cette microstructure montre (figure 39) une répartition régulière et uniforme du graphite sphéroïdale avec la présence de 10% de perlite et très peu de cémentite Fe_3C , une structure ferritique cela est due au traitement de ferritisation de cette fonte.

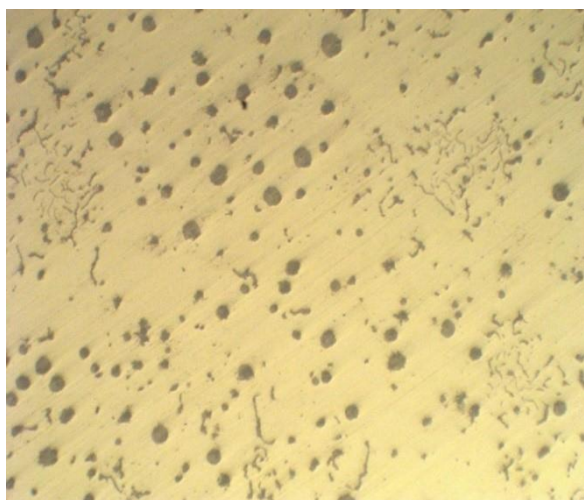


Figure38. Avant attaque chimique (GSC)

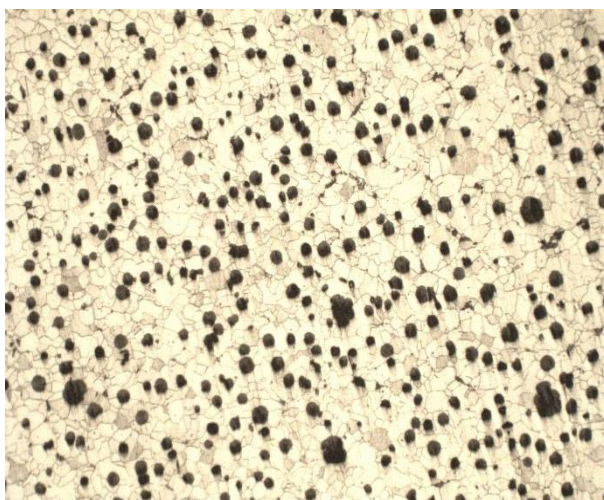


Figure39. Après attaque chimique(GSC)

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Les résultats de cette étude ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les analyses micrographiques des fonte FGL et FGS (STT et GSC) ont montré une répartition plus ou moins régulière du graphite dans la matrice de l'extérieur vers l'intérieur.
- La correction de la composition chimique de la fonte FGL par l'addition de FeSi75 dans la poche vous a donné une répartition uniforme et régulière du graphite type A de l'intérieur vers l'extérieur de l'échantillon.
- La microstructure des fontes GSC et STT observée sur des échantillons prélevés sur des barreaux normalisés contenant FeSiMg10 montre une répartition uniforme des sphères de graphite de l'extérieur vers l'intérieur avec la présence respectivement de 10 à 25% de perlite.
- La diminution du taux de la perlite dans la fonte GSC est dû au traitement de ferritisation de la fonte GS brute obtenue.
- Les mesures de dureté effectuées sur nos échantillons ont montré qu'elles varient selon le pourcentage de perlite présent dans leur microstructure.
- La fonte STT possède les meilleures performances mécaniques (résistance en traction) par rapport à la GSC qui a subi un traitement thermique.
- La FGL n'a pas de domaine plastique ce qui signifie que sa ténacité est réduite.

Références bibliographiques

- [1] Nieswaag H. and Zuithoff A.J., The effect of S, P, Si, and Al on the morphology and graphite structure of directionally solidified cast iron.
- [2] ASM Specialty Handbook - Cast Irons, ed. J.R. Davis. 1996.
- [3] Geier, G.F., Bauer, W., McKay, B.J., and Schumacher, P., Microstructure transition from lamellar to compacted graphite using different modification agents. Materials Science and Engineering: A, 2005. 413-414: p. 339 - 345.
- [4] Morrogh H. and Williams W.J., Graphite Formation in Cast Irons and in Nickel-Carbon and Cobalt-Carbon Alloys. Journal of the Iron and Steel Institute, 1947. 155: p. 321-371.
- [5] Mitsche R., Haensel G., Geymayer W., and Warbichler P., Research on graphite in cast iron, in metallurgical slags and in minerals. AFS Cast Metals Research J., 1971: p. 108-117.
- [6] Dhindaw B. and Verhoeven J.D., Nodular graphite formation in vacuum melted high purity Fe-C-Si alloys. Metall. Trans. A 1980. 11A: p. 1049-1057.
- [7] Isabelle Hervas DOBON, Contribution à l'étude des mécanismes d'endommagement des fontes ferritiques à graphite sphéroïdale : Influence de la température de trajet de chargement et rôle des interfaces nodules/Matrice, thèse de Doctorat, université de Caen basse Normandie.
- [8] BOITEL D, HAZARD C, guide de la maintenance p122-126 paris 1981
- [9] J. BARRALIS, G. MAERDER précis de métallurgie P A-9 paris, 1983
- [10] Métallurgie de fonderie, Tome 2, Acier moulés. Fontes grises, Fontes malléable, Fonte GS Michel GEIER.