الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie de la Matière



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Mécanique

Option : Sciences des matériaux

THEME

Contribution à l'étude des propriétés mécanique des matériaux FGL et FGS

- Etude comparative -

Proposé et dirigé par :

Dr. BELHADJ Abd Elmouneïm — Promoteur

Pr. ABUDURA Salam. — *Co-Promoteur*

Préparé et présenté par :

Daham cherifa
Dekim mebarka

2015-2016

REMARCIMENT:

Nous remercions en premier lieu **mon Dieu** le tout puissant de m'avoir donné courage, patience et force durant toutes ces années d'étude.

Nous remercions en de deuxième chose la source de touts **nous parents** les puissants qui nous avons souhaite une longue vie.

Nous tenons à exprimer toute nos gratitudes à **Mr. Dr. Abd Elmouneïm BELHADJ**, pour nous avoir honorés en acceptant de diriger ce travail pour son encadrement, et sa patience, nous le remercions très chaleureusement pour nous avoir pris en charge.

Nous remercions très sincèrement Md. **OURTI Naima** responsable générale de laboratoire de(DFR) de Rouïba pour les aide, ses conseils techniques, et ses précieuses orientations.

Nous remercions également tous les ingénieurs de la (DFR) qui vous avez donnent des aides et les informations.

A la fin, nos vifs remerciements à tous nos collègues de la promotion sciences des matériaux, et à tous ceux qui nous a aidés de près ou de loin pour réaliser ce travail.

MEBARKA et CHÉRIFA

Introduction générale……(A)

Chapitre I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.

Introduction ……1

1-Généralités ……..……1

1-1 - Définition des fontes ……1

1-2- Elaboration de la fonte…….2

a) Fontes de première fusion…… ..2

b) Fontes de composition chimique définie ……2

c) Fonts de second fusion…..……2

d) Fonts synthétiques..……..2

1-3- Structure des fontes selon de diagramme d'équilibre Fer – cémentite ……..……..2

1-3-1 : Diagrammes de phases fer-carbone……3

1-4- Propriétés et les rôles des constituants……....4

1-4-1-Matrice ……4

1-4-2-Graphite……7

2-Les différents types de fontes moulées ……12

2-1-Fontes blanches…….….13

2-2-Fontes grises……..…. 14

2-3-Les Types des Fontes Grises…….……14

2-4-Les Familles des Fontes GS ……...…19

2-5-Principe les applications des fontes……..21

3-Influence des éléments sur la structure des fontes……21

3-1- Influence des éléments normaux ……21

3-2- Influence des éléments spéciaux…….…….. 24

3-3-Inoculation……... 27

4-Propriétés mécaniques ……..28

4-1-Caractéristiques mécaniques Fundamentals……....28

Chapitre II : Méthode expérimental.

Introduction ……35

I- Les fours utilisent……35

1-Four a arc…… ……35

1-1-Les matières premières utilisées dans le four à arc ……38

1-1-1-Les fontes neuves ……...38

1-1-2-Les fontes hématites ……..38

1-1-3-Les retours des fontes ……...……39

1-1-4-Acier doux …….……39

1-2-Lit de fusion ……...…39

1-2-1-Les rôles des fours ….……41

1-2-2-Le décrassage ……....42

1-3-Laboratoire…….……42

1-3-1-Secteur chimique……43

1-3-2-Examen microscopique ……..……...45

2- Four à Induction…….……50

2-1-Poches de transvasement ……..52

2-2-La correction dans un four à induction……..52

2-3-Poche de traitement et distribution ……..53

2-4-Poches de coulée ……54

II-Les composition et les propriétés des fontes étudiées……...56

1-Propriétés de la fonte à graphite lamellaire FT25 ……...56

2-Propriétés de la fonte à graphite sphéroïdal (GSA) FGS56-5……..57

III- Elaboration de la fonte étudiée……58

1-Procédés de fabrication des éprouvettes ……58

1-1-élaboration des kils bloc ……...…58

1-2-Elaboration de moule de kils bloc……58

2-Secteur métallurgies……61

IV-Conclusion ……63

Chapitre III: Résultats et Discussions

Introduction ……..64

Partie I : résultats et discussion de la fonte FT25 ……...…65

I-1-Analyse chimique…… ……65

I-2- Examen métallographiques……..65

I-1-1- Détermination de la structure ……..65

I-1-2- Observation micrographique ……..….66

I-3- Examen mécanique……...…72

I-3-1-Essai de dureté…… ……72

I-3-2-Influence des éléments d'addition sur dureté……...72

I-3-3-Essai de traction ……..……78

Patrie II : résultats et discussion de la fonte (GSA) FGS56-5……..…80

II-1-Analyse chimique ……80

II-2- Examen métallographiques ……80

II-2-1-Observation micrographique ……80

II-2-2-Analyse métallographique……82

II-3- Examen mécanique……..82

II-3-1- Essai de traction ……...82

Conclusion générale……(A)

Liste des figures

Lise des figures		
N° de figure	Le titre	N° de page
Figure 1	Diagrammes fer – carbone pour les aciers et les fontes. Pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe – Fe3C	4
Figure 2	Graphite en lamelles séparées (type A)	7
Figure 3	Graphite en rosettes (type B)	8
Figure 4	Graphite type C (lamelles superposées)	9
Figure 5	Graphite inter dendritique de surfusion (type D)	10
Figure 6	Graphite en nodules	11
Figure 7	Graphite sphéroïdal	11
Figure 8	Effet des éléments d'addition sur la matrice de la fonte	12
Figure 9	Vue au microscope de fonte blanche	13
Figure 10	Vue au microscope de fonte à graphite lamellaire	15
Figure 11	Vue au microscope de fonte à graphite lamellaire	16
Figure 12	Vue au microscope de fonte à graphite vermiculaire	17
Figure 13	Vue au microscope de fonte à graphite malléables	19
Figure 14	Représente les matrices des fontes GS	20
Figure 15	Schéma du l'éprouvette de traction	28
Figure 16	Représentation d'éprouvette d'un essai de compression	29
Figure 17	Schéma d'un Mouton –pendule d'Essai Charpy–V et Essai Izod	30
Figure 18	Représente l'essai de flexion	31
Figure 19	Essai de Brinell	32
Figure 20	Schéma des différences étapes d'exécution d'un essai et définition de la dureté Rockwell B	33
Figure 21	Schéma des différences étapes d'exécution d'un essai et définition de la dureté Rockwell C	33
Figure 22	Procédure d'un essai de dureté Vickers	34
Figure 23	Représentation des composantes de four à arc électrique dans un bilan à partir de poste de conduite jusqu'à la poche de coulée.	36
Figure 24	Le four à arc électrique utilisé au cours de notre étude (sis à Direction de Fonderie de Rouïba)	37
Figure 25	Les fontes (les gueuses) utilisent dans le four à arc, a : l'hématite est utilisée dans l'élaboration des fontes à graphite lamellaire b : fonte neuve est utilisée dans l'élaboration des fontes à graphite sphéroïdal	38
Figure 26	Les retours des fontes	39
Figure 27	Médaille qui a servi à l'étude	42
Figure 28	Photographie de l'ordinateur lié avec la balance et « LECO ».	43
Figure 29	Prise de vue de l''analyse spectrométrique de nos échantillons	44

Liste des figures

Figure 30	La machine de surfaçage	44
Figure 31	La couche de résine utilisée pour coulée nos éprouvettes	45
Figure 32	Représenter la mule de coupe	46
Figure 33	Appareil de polissage a papiers abrasifs	47
Figure 34	Les échantillons produisant après le polissage	49
Figure 35	Le microscope optique lié avec l'ordinateur pour obtenir	50
Figure 36	Représentation de four électrique à induction	51
Figure 37	le four à induction utilisé au cours de notre étude	51
Figure 38	La poche de transvasement	52
Figure 39	les ferroalliages utilisés pour la correction (1 le graphite ,2 le Ferro- manganèse ,3le Ferro- silicium)	53
Figure 40	la poche de traitement (procède Sandwich)	54
Figure 41	la poche de coulée	55
Figure 42	le contrôle de température dans la poche de coulée	55
Figure 43	Dessin simplifie pour les barreaux de la fonte(GSA) FGS56-5	58
Figure 44	Le moule en sable silice pour coulée les kils bloc de fonte utilisé avec le noyau	59
Figure 45	Le début de coulée les kils bloc	60
Figure 46	La fin de coulée les kils bloc	60
Figure 47	les barreaux finis des fontes étudiées	60
Figure 48	Machine utilisée pour l'essai de dureté HB d'âpres le Direction de Fonderie de Rouïba.	61
Figure 49	La machine de traction utilisée pour nos essais	62
Figure 50	Schéma simple de l'éprouvette de traction qui a servi à l'étude avec leur dimension	63
Figure 51	Le découpage de l'échantillon pour l'étude métallographique et la dureté.	66
Figure 52	L'éprouvette de traction utilisée pour nos essais	66
Figure 53	La microstructure de l'échantillon sans attaque (fonte de base).	
Figure 54	Observation de la microstructure de l'échantillon attaqué (fonte de base).	67
Figure 55	La micrographique de l'échantillon attaqué à 3% de carbone	68
Figure 56	Observation de la microstructure de l'échantillon attaqué à 4% de carbone.	68
Figure 57	Photographique de l'échantillon attaqué à 1% de manganèse	69
Figure 58	La micrographique de l'échantillon attaqué à 1, 3% de Silicium.	70
Figure 59	Microstructure de l'échantillon attaqué à 2,2% de Silicium	70
Figure 60	Photographique de l'échantillon attaqué à 0, 3% de Cuivre	71
Figure 61	Observation de la microstructure de l'échantillon attaqué à 1% de cuivre.	71
Figure 62	Evolution de la dureté en fonction du taux de carbone	73
Figure 63	Evolution de la dureté en fonction du taux de cuivre	75
Figure 64	Evolution de la dureté en fonction du taux de silicium	76
Figure 65	Evolution de la dureté en fonction du taux de manganèse	77

Liste des figures

Figure 66	La microstructure de la fonte grise à graphite sphéroïdale (GSA) FGS56-5 par le traitement thermique applique de trempe à huile et revenu dans un four à 900°C de température.	81
Figure 67	la macrostructure de la fonte grise à graphite sphéroïdale(GSA) FGS56-5 par le traitement thermique détente dans un four à 550°C de température.	81
Figure 68	Diagramme de l'allongement en fonction de la contrainte	82
Figure 69	Excroissance de l'allongement en fonction de la force applique déférentes.	83
Figure 70	Excroissance de la dilatation de l'éprouvette en fonction de la force applique	84
Figure 71	Variation du long d'éprouvette de traction en fonction de contrainte	85
Figure 72	Courbe de déformation d'éprouvette de traction en fonction de force	85
Figure 73	Courbe qui représente la déformation d'éprouvette de traction en fonction de contrainte	86

Liste des tableaux

Lise des tableaux		
N° de tableaux	Le titre	N° de page
Tableau 1	Propriétés de la ferrite en fonction de la teneur en Si	5
Tableau 2	Les dimensions du graphite de type A.	8
Tableau 3	Influence du carbone total sur la durete d'une fonte blanche	14
Tableau 4	Compositions chimiques de différentes charges constituant le lit de fusion Pour la fonte a graphite lamellaire	40
Tableau 5	Quantités des constituants de la charge métalliques de lit de fusion pour les fontes FGL en pourcentage (%) et en poids (Kg)	40
Tableau 6	Compositions chimiques de différentes charges constituant le lit de fusion pour la fonte a graphite sphéroïdal	41
Tableau 7	Quantités des constituants de la charge métalliques de lit de fusion pour les fontes FGS en pourcentage (%) et en poids (Kg)	41
Tableau 8	Composition chimique du Nital de l'attaque chimique ver l'échantillon.	48
Tableau 9	Les compositions chimiques données par la norme NF A 32-101 de la fonte FT25.	56
Tableau 10	Représentations des caractéristiques mécaniques de la fonte FT25 d'après la direction de fonderie de Rouïba.	56
Tableau 11	La température de fusion de la fonte FT25.	56
Tableau 12	Les compositions chimiques de (GSA) FGS56-5 du la fourchette utilise a la fondre de Rouïba.	57
Tableau 13	Les caractéristiques mécaniques de la fonte gris a graphite sphéroïdale (GSA) FGS56-5.	57
Tableau 14	Température de fusion de la fonte grise a graphite sphéroïdale (GSA) FGS56-5.	57
Tableau 15	Les compositions chimiques de médaille d'analyse de tambour de frein de la fonte (FGL) FT25 donne par la norme NF A 32-101.	65
Tableau 16	Les compositions chimiques de médaille d'analyse de la fonte (FGL) FT25 donne par la norme NF A 32-101.	65
Tableau 17	Présentent les résultats de dureté HB de fonte de base utilisée comme référence.	72
Tableau 18	Les compositions chimiques de la médaille d'analyse de la fonte grise à graphite sphéroïdale (GSA) FGS56-5 avec le pourcentage de Mn est élève	80
Tableau 19	Les compositions chimiques de la médaille d'analyse de la fonte grise a graphite sphéroïdale (GSA) FGS56-5 avec l'ajustement de cuivre	80
Tableau 20	La matrice de la (GSA) FGS56-5 par le traitement thermique détente	82
Tableau 21	Résultats de l'allongement qui donne âpre la contrainte applique.	82
Tableau 22	L'augmentation de l'allongement avec défirent forces applique	83
Tableau 23	Dilatation de traction sur un éprouvette de la fonte grise a graphite sphéroïdal (GSA) FGS56-5 à déférente forces applique	83

Liste des tableaux

Tableau 24	Représente la contrainte qui applique et la dilatation de la fonte (GSA) FGS56-5	84
Tableau 25	Déformation de la fonte (GSA) FGS56-5 par rapport la force qui applique	85
Tableau 26	Le résulta de la déformation de la fonte (GSA) FGS56-5 par rapport la contrainte.	86
Tableau 27	Les propriétés de(GSA) FGS56-5 ci la même par les deux traitements qui appliquent (détente et trempe revenu).	87

Résumé:

Ces derniers temps, le monde a connu une diminution de l'offre de métaux à la suite d'une demande accrue. Par conséquent, le processus d'extraction de métaux est devenu plus important. Ce fut dans nos recherches, nous avons décidé de faire une étude de la méthode de préparation de la fonte synthétique à faible coût avec de bonnes propriétés mécaniques à partir de matériaux métalliques récupérés dans le four électrique, parce que les pièces mécaniques en fonte de graphite lamellaire et en fonte à graphite sphéroïdalse différent en terme de fonctionnalités. Et afin, de découvrir d'autres expériences nous avons fait le désigne de quelques pièces conçues cotées puis plusieurs expérimentation et une étude microscopique des composants et traitement thermique pour découvrir les caractéristiques mécaniques ont été réalisées.

Abstract:

In recent times, the world has witnessed a decrease in the supply of metals as a result of increased request. Therefore, the extraction process is of paramount importance metals have become This was in our research, we decided to have a study of the method of preparation of synthetic cast iron low cost with good mechanical properties from metal materials recovered in electric furnace because the mechanical parts of the lamellar graphite cast iron and spheroidal graphite cast differ in terms of features and in order to find out more experiments designed pieces listed and then we operate several microscopic study of the composants and thermal treatment to discover the mechanical characteristics.

ملخص:

لقد شهد العالم في الآونةالأخيرة تناقص في إمدادات المعادن نتيجة لتزايد الطلب لذلك فقد أصبحت عملية استخراج المعادن ذات أهمية بالغة .

لهذا فقد ارتأينا في بحثنا أن يكون عبارة عن دراسة لطريقة تحضير حديد الزهر التركيبي بتكلفة منخفضة مع خصائص ميكانيكية جيدة انطلاقا من المواد المعدنية المسترجعة في الفرن الكهربائي، وذلك لأن القطع الميكانيكية من حديد الزهر ذو غرافيت رقائقي وذو غرافيت كروي تختلف من حيث الخصائص.

ومن أجل معرفة أكثر صممنا قطع تجارب مدرجة ثم قمنا بتجارب عدة ودراسة مجهرية للمكونات ومعالجة حرارية لاكتشاف الخصائص الميكانيكية.

Introduction générale :

Les matériaux en général et les métaux en particulier prennent une place importante dans tout développement industriel ou progrès technologique, pour cette idée vous avez choisir le métal le plus utilise dans neutre vie ce la fonte, la fonte c'est un alliage de fer et de carbone plus les autres éléments avec des triasse comme le maganées, le silicium, le cuivre …etc.

Cette étude nous avons parmes de faire une recherche approfondie de chaque étape du processus d'élaboration des fontes gris (préparation du chargement de four à arc, transvasement dans le four à induction et correction, traitement et coulée) ainsi que la détermination des propriétés chimiques (composition chimique et la microstructure) etmécanique (les essais de dureté et de traction) des fontes étudiées.

Cette étude est présentée sous forme de 3 chapitres principaux :

- Le premier chapitre c'est une recherche plus simple bibliographique, nous allons étudier les différents types des fontes et leurs caractéristiques mécaniques, composition chimique, phases, constituants et leur domaine d'utilisation.
- La deuxième chapitre c'est les techniques au bien les méthodes expérimentales est à la description du circuit de l'élaboration de fonte on niveau fonderie de Rouïba.
- La troisième chapitre résultats et interprétations, résume les différents résultats obtenus, ainsi que leur interprétation.
- A la fin, nous allons terminer ce mémoire par une conclusion globalement au bien général.

Introduction

La fonte, en métallurgie, Elle se distingue des aciers au carbone par une sursaturation en carbone, qui peut précipiter sous la forme de graphite au moment de la solidification.

La fonte est un matériau apprécié en fonderie. Mais c'est aussi, en sidérurgie, un état intermédiaire dans la fabrication de l'acier : on parle alors de fonte brute, dont la qualité ne s'évalue que par la composition chimique et pour explique les fontes en détail dans ce chapitre :

1-Généralités :

1-1 - Définition des fontes:

Les fontes sont des alliages à base de Fe contenant du C en quantité supérieure à 2% en poids. Cette teneur les différencie des aciers qui titrent moins de carbone.

Le Si est le deuxième élément qu'on retrouve dans les fontes avec une teneur qui varie de1% à 3%. Il a un rôle graphitisant, et plus l'alliage en contient plus il forme en son sein du carbone libre ou graphite. Si sa teneur est faible le carbone sera lié chimiquement surtout avec le fer.

Le troisième élément est le Mn, qui contrairement au silicium favorise la formation du carbone chimiquement lié. C'est un blanchissant.

Le S et le P sont rencontrés en quantité assez limitées qu'ils ne doivent pas dépasser. Rien que ces éléments donnent à la fonte des propriétés assez bonnes et sont très utilisées dans beaucoup de domaines.

L'introduction volontaire de d'autres éléments (Cr, Mo, W, …) bien définie améliore les propriétés [1].on a alors des fontes alliées.

Donc on peut obtenir une fonte contenant du graphite, ou une fonte contenant du C chimiquement lié avec le fer, mais aussi une fonte ordinaire ou une fonte alliée ; cependant la complexité est plus importante.

Ces alliages selon les éléments qu'ils contiennent et la vitesse à laquelle ils se refroidissent évoluent dans le système stable ou métastable.

1-2- Elaboration de la fonte:

a) Fontes de première fusion : C'est la fonte de base qui est obtenue directement par le traitement du minerai. Le déroulement des opérations est le suivant :

* Extraction du minerai
* Concassage, broyage
* Enrichissement pour éliminer le plus possible de gangue.
* Réduction de ce minerai dans un haut fourneau pour obtenir de la fonte de première fusion, dont une partie sera affinée pour mouler des pièces en fonte.

b) Fontes de composition chimique définie : Ces fontes peuvent être élaborées dans plusieurs sortes d'appareils, les cubilots qui sont les plus utilisés, les fours électriques, fixes ou non, à arcs ou à induction.

c) Fontes de seconde fusion : Elles sont obtenues par refusions des gueuses de premières fusion, affinage et dosage en fonction de la nuance voulue. Il faut remarquer que la plupart du temps on rajoute à ces gueuses des retours de fonderie.

d) Fontes synthétiques : Elles sont obtenues par fusion d'une charge permettant de réaliser une synthèse chimique de tous les éléments simples qui constituent la fonte. Le fer est alors apporté par des riblons d'aciers non alliés, les éléments à introduire, par des ferro-alliages correspondants. Pour le carbone, on ajoute du ferromanganèse carburé, ou du graphite [2].

1-3 - Structure des fontes selon de diagramme d'équilibre Fer - Cémentite :

On peut dire en première approximation que la structure d'une fonte est comparable à la structure d'un acier qui possèderait ou non du graphite et ayant une teneur en carbone variable.

Dans le cas d'une fonte blanche (sans graphite), la solidification et le refroidissement s'opèrent suivant le diagramme métastable : Fer-cémentite.

Dans le cas d'une fonte à graphite, mis à part celui-ci qui peut se présenter sous différentes formes, le pourcentage en carbone de la matrice dépendra de la vitesse de refroidissement. Plusieurs cas se présentent, si la vitesse de refroidissement est très lente, tout le refroidissement depuis l'état liquide s'opérera suivant le diagramme fer-graphite, et on aura une structure finale ferrite graphite.

Si on augmente la vitesse de refroidissement, la solidification commencera suivant le diagramme fer-graphite et à un moment ou un autre se poursuivra selon le diagramme fer-cémentite. C'est le cas le plus complexe où l'on pourra trouver dans la matrice ferrite-perlite ou perlite seule.

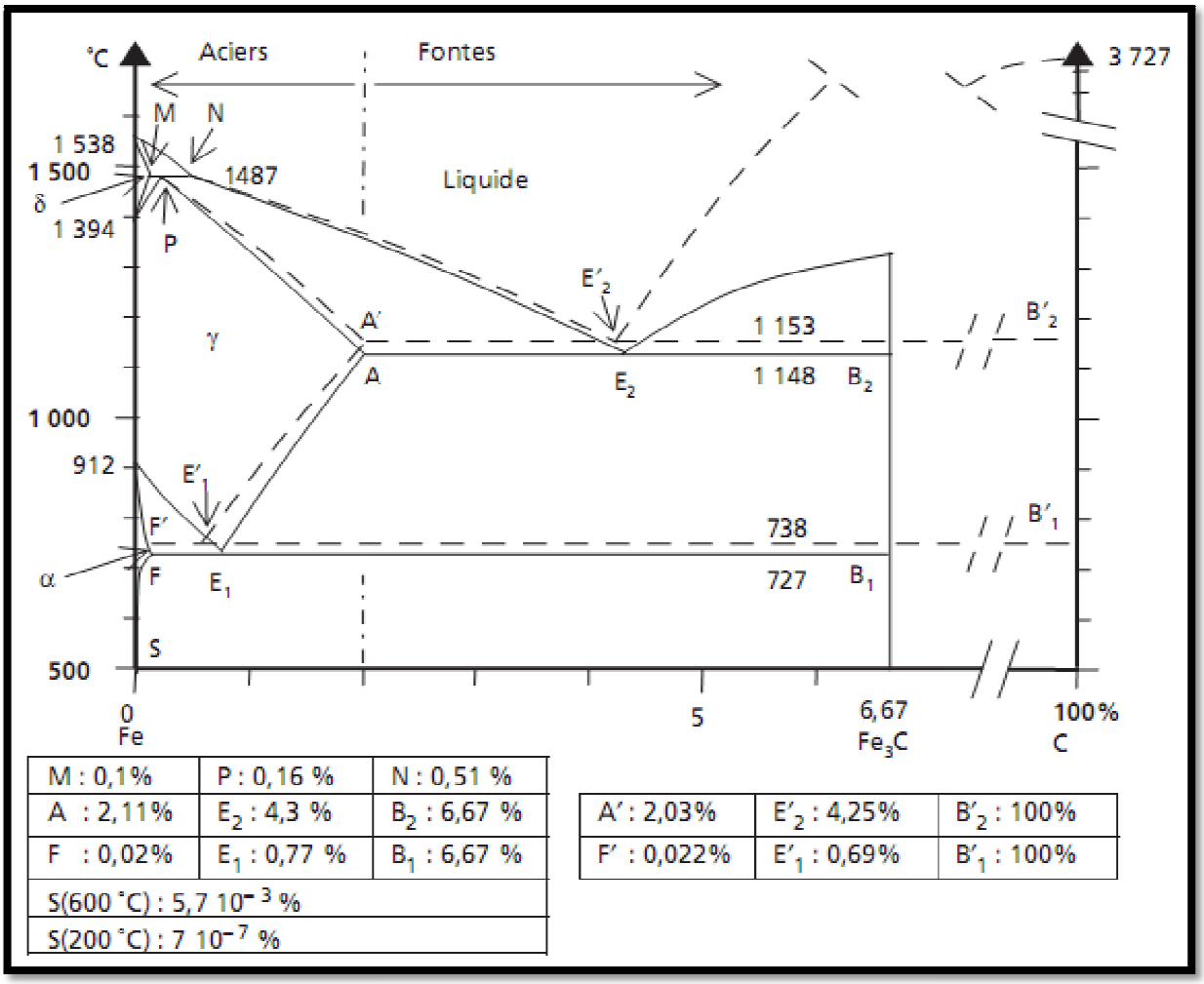
Il arrive également que dans ces deux matrices on note la présence d'une lédéburite soit pure soit enrichie de phosphore.

Si la vitesse de refroidissement devient rapide, la solidification et le refroidissement suivront les lois du diagramme fer cémentite.
Dans ce cas on aura de la ferrite et de la lédéburite. Plusieurs facteurs ont une influence sur la vitesse de refroidissement, facteurs liés au moule, à la grosseur de la pièce, à la température de la fonte au moment de la coulée, à la température de décochage [2].

1-3-1 : Diagrammes de phases fer-carbone

Le diagramme fer-carbone classique est en fait un diagramme hors équilibre.
– le diagramme **Fe – Fe_3C**, représentant des états **métastables**;
– le diagramme **Fe – C**, représentant les états **stables**.

En effet, le carbure de fer Fe_3C, appelé **cémentite**, se forme spontanément lors du refroidissement des mélanges fer – carbone dans les conditions habituelles; mais il n'est que métastable et a tendance à se décomposer en fer et graphite ($Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$) avec une cinétique activée par la température. Les refroidissements très lents pourront donc être décrits par le diagramme Fe – C (au moins dans le domaine des températures supérieures à 800 °C) et les refroidissements rapides par le diagramme Fe – Fe_3C [3].



M : 0,1%	P : 0,16 %	N : 0,51 %
A : 2,11%	E_2 : 4,3 %	B_2 : 6,67 %
F : 0,02%	E_1 : 0,77 %	B_1 : 6,67 %
S(600 °C) : 5,7 10^{-3} %		
S(200 °C) : 7 10^{-7} %		

A' : 2,03%	E'_2 : 4,25%	B'_2 : 100%
F' : 0,022%	E'_1 : 0,69%	B'_1 : 100%

Figure 1 : Diagrammes fer – carbone pour les aciers et les fontes. Pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe – Fe3C [3].

1-4- Propriétés et les rôles des constituants :

Les constituants qui entrent dans la matrice d'une fonte permettent déjà une classification, mais aussi donnent au matériau certaines propriétés qui les rendent plus ou moins utilisables pour une application donnée.

1-4-1-Matrice :

a) La ferrite:

La ferrite est une solution solide du C dans le fer alpha. Les propriétés de la ferrite dépendent de la taille du grain mais aussi de la nature et de la quantité des éléments présents. L'introduction du Si dans la ferrite améliore nettement les caractéristiques mécaniques. L'influence des autres éléments

sur la dureté et la résistance de la ferrite. L'influence du silicium peut être par masquée celle du graphite.

Afin de tenir compte de l'effet du C et du Si des relations comme celle du carbone équivalent permettent de d'avoir la structure développée en fonction de la composition chimique [5].

Tableau 1 : Propriétés de la ferrite en fonction de la teneur en Si [5].

Type de ferrite	Caractéristique mécanique		
	Résistance à la traction	Allongement (%)	Dureté Brinell
Ferrite pure	275	61	75
Ferrite à 0,82%Si	309	50	88
Ferrite à 2,28%Si	437	43	124
Ferrite à3, 40%Si	530	28	150

b) L'austénite:

C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer γ. La solubilité limite du carbone dans le fer γ est de 2,14%. L'austénite est stable à haute température, elle est peu dure est relativement malléable (HB = 300). La microstructure de l'austénite est composée de grains polyédriques. Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable. Elle est antiferromagnétique [4].

c) La cémentite:

La cémentite ou carbone de fer (Fe_3C) est une combinaison chimique de fer et de carbone dont la teneur en carbone peut atteindre 6,67%. Elle est magnétique jusqu'à 210°C et très dure (HB = 700) mais fragile.

Au point de vue du diagramme Fe-Fe3C et lors du refroidissement, la cémentite peut exister en trois différentes formes de liaison mais avec la même composition chimique [4].

e) La perlite :

C'est un mélange de cémentite et de ferrite disposée en lamelles plus la distance entre lamelle est faible et plus dure est la perlite. Sa dureté Brinell varie entre 200 et 300. Les caractéristiques mécaniques de la perlite dépendent avant tout de sa finesse. Des relations empiriques peuvent montrer la liaison de la finesse à la dureté :

HB = 80/Δ0, où HB est la dureté Brinell, Δ0 (en m) est la distance entre deux lamelles consécutives de cémentite. Comme cette distance varie entre 0,26 et 0,38 la dureté sera de 300 dans les structures très fines à 200 dans les structures grossières.

Cet espacement Δ0 détermine les principales caractéristiques d'une perlite exempte d'éléments en solution dans la ferrite ou la cémentite. Dans le cas des fontes, même non alliées, il existe toujours des éléments en solution dans la matrice perlitique. Le Cu, le Ni, le Cr, le Mo, le V, et le Mn affinent la perlite, tandis que le Si favorise son relâchement et sa ferritisation [5].

f) La lédéburite :

Elle se présente sous forme d'agrégat appelé (eutectique) de plaquettes et globules alternés de cémentite et de perlite [3].

1-4-2-Graphite :

C'est un constituant de grande importance dans les fontes grises qui prend plusieurs formes : lamelles, sphéroïdes, nodules, particules, … . L'observation au microscope des fontes grises montre que le graphite peut être classé d'après sa forme. Par convention les chiffres romains désignent la forme [5].

Types des Graphites :

♦ Graphite Lamellaire :

● **Type A :** Graphite en lamelles réparties uniformément (figure 2). C'est la distribution normale que l'on rencontre dans les pièces d'épaisseur moyenne coulées en sable, lorsque la fonte est voisine de l'eutectique ou légèrement hypo eutectique (le plus souvent : épaisseur supérieure à 20 mm dans la coulée en sable ; carbone équivalent 4,0 à 4,4 %) [6].

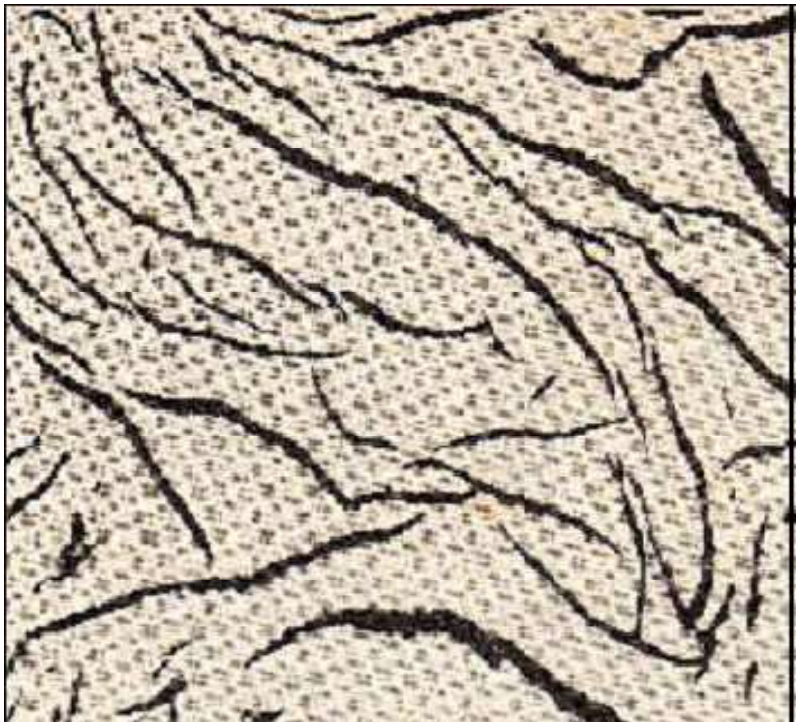


Figure 2 : Graphite en lamelles séparées (type A) [6].

D'après la longueur **L** des lamelles du graphite de type A classé en 08 dimensions comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Les dimensions du graphite de type A [6].

No taille	Dimension des particules de graphite (grossissement 100) (mm)	Dimensions réelles ,(mm)
1	>100	>1
2	50 à 100	0,5 à 1
3	25 à 50	0,25 à 0, 5
4	12 à 25	0,12 à 0, 25
5	6 à 12	0,06 à 0, 12
6	3 à 6	0,03 à 0,06
7	1,5 à 3	0,015 à 0,03
8	<1,5	<0,015

● **Type B :** Graphite en rosettes (figure 3). Cette structure se rencontre dans le cas de pièces refroidies rapidement (épaisseur voisine, par exemple, de 10 mm dans le cas de la coulée en sable) lorsque les teneurs en silicium et surtout en carbone sont élevées (silicium souvent voisin de 2,5 %, carbone au moins égal à 3,3 %). C'est la structure type de toutes les pièces en fonte mince (pièces de quincaillerie, pièces de chauffage) [6].



Figure 3 : Graphite en rosettes (type B) [6].

● **Type C :** Graphite en lamelles et amas de graphite (figure 4). On n'observe cette structure que dans le cas de fontes hyper eutectiques refroidies assez lentement (Céq.4, 5 % ; épaisseurs dépassant 20 à 30 µm, coulée en sable). Les gros amas de graphite sont constitués par du graphite hyper eutectique déposé avant l'eutectique graphite-austénite ; les lamelles plus fines font partie de l'agrégat eutectique. Les gros amas de graphite ne se déposent effectivement que si le caractère hyper eutectique de la fonte n'est pas masqué à la solidification par une surfusion importante (figure 4) [6].



Figure 4 : Graphite type C (lamelles superposées) [6].

● **Type D :** Graphite inter dendritique sans orientation préférentielle ou graphite de surfusion (figure 5). Cette forme de graphite s'observe toujours dans le cas de pièces refroidies très rapidement et, en particulier, au voisinage de la surface dans le cas de pièces coulées en coquille. La répartition inter dendritique très marquée ne s'accompagne pas toujours d'un carbone équivalent très au sous de 4,3 % car, dans les fontes refroidies très rapidement, les phénomènes de surfusion sont très importants. Le graphite du type D est toujours très ramifié [6].



Figure 5: Graphite inter dendritique de surfusion (type D) [6].

♦ **Graphite en Nodules:**

Il est réparti dans la fonte sous forme d'amas ou nodules (inscrits dans des cercles de 0,005 à0,2mm de diamètre) aux contours plus ou moins déchiquetés, distants entre eux de quelques dixièmes de millimètres, apparaissant à l'examen au microscope comme schématisé (figure 6). Ce type de graphite résulte de la décomposition de la cémentite dans des fontes. Le graphite en nodules est celui que l'on trouve dans les fontes "malléables à cœur noir"[6].

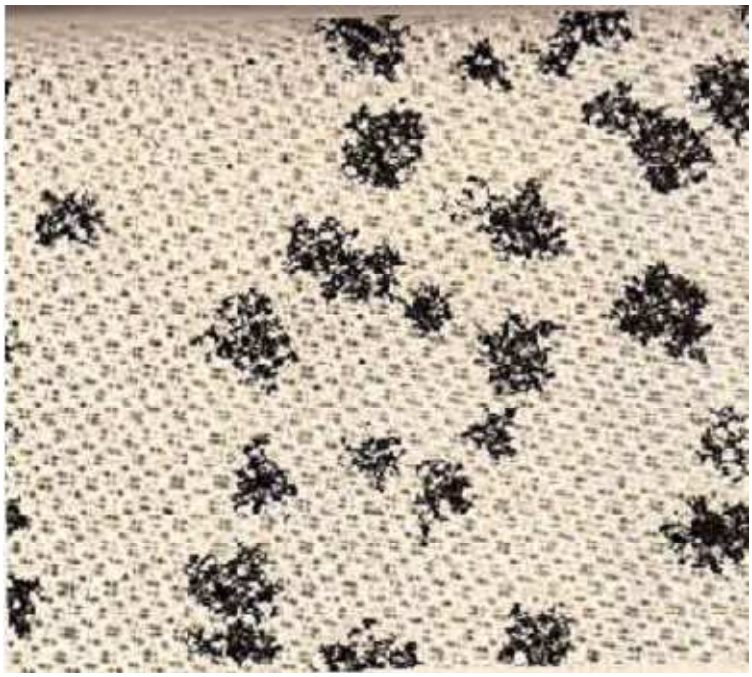


Figure 6: Graphite en nodules.

♦ **Graphite sphéroïdal:**

Il se présente dans la fonte sous forme de petites sphères aux contours bien lisses (diamètres variables: de 0,01 mm à 0,10 mm environ) distantes entre elles de quelques dixièmes de millimètres, et se rencontre dans les fontes dites à graphite sphéroïdal ou encore fontes GS. Le graphite sphéroïdal apparaît à l'examen au microscope comme indiqué l'image de la (figure 7) [6].

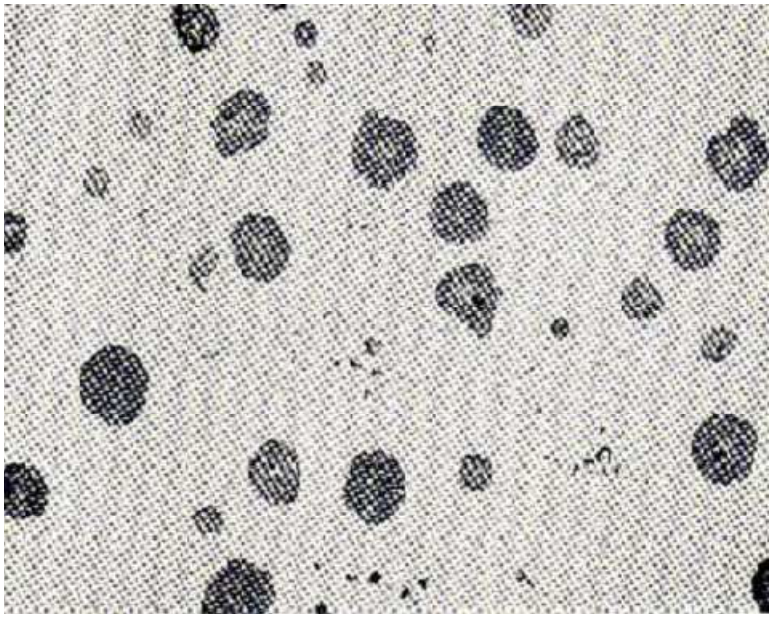


Figure 7 : Graphite sphéroïdal [6].

2-Les différents types de fontes moulées :

Les différents types de fontes moulées peuvent être d'après leur microstructure .Ce mode de classement, basé sur les formes physique et géométrique sous lesquelles se présente la majeure partie du carbone, comporte cinq familles : les fontes blanches, les fontes malléables, les fontes à graphite lamellaire, dites fontes grises, les fontes à graphite sphéroïdal et fontes à graphite compact, dites aussi fontes à graphite vermiculaire.

Des quantités modérées d'éléments d'alliages peuvent être introduites dans une fonte données ou celle-ci peut subir un traitement thermique sans que ,pour autant , elle change de famille les différents fontes alliées , qui contiennent généralement plus de 3 % d'éléments d'alliage peuvent être classés , elles ,en fontes blanches ,fontes grises ou fontes à graphite sphéroïdal, mais ,pour des raisons pratiques [15] .

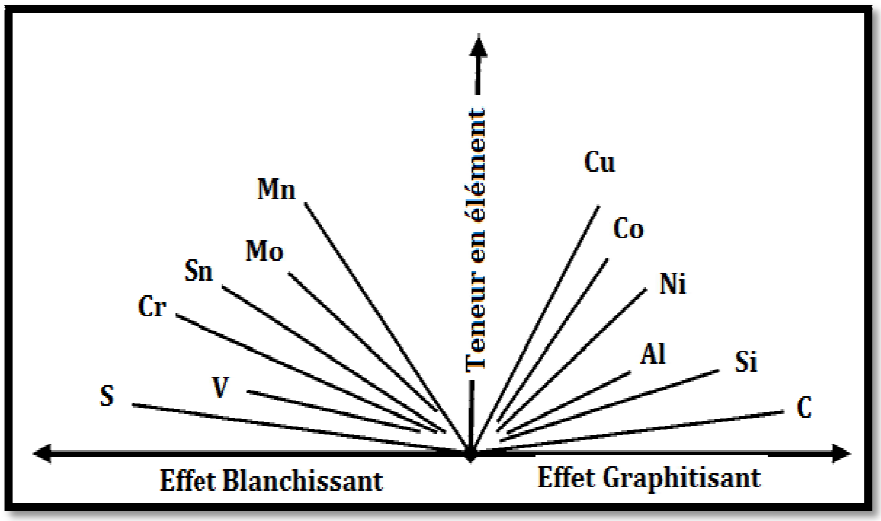


Figure 8 : Effet des éléments d'addition sur la matrice de la fonte [15].

2-1-Fontes blanches :

Les fontes blanches sont caractérisées par l'absence complète du graphite car le carbone, en excès – par rapport à sa solubilité maximale dans l'austénite – est combiné les carbures à base de fer ont des propriétés physiques très différentes de celles du graphite et, en particulier, leur dureté élevée augmente beaucoup celle de la fonte dont ils constituent une fraction volumique importante. La solidification dans le diagramme Fe-Fe3C grâce à un refroidissement rapide ou à l'addition d'éléments carburigènes.

Ainsi les fontes blanches, **dures** mais malheureusement plus ou moins fragiles, conviennent excellemment pour **résister à l'usure abrasive** ; en conséquence, il est très difficile, sinon impossible, de les usiner à l'aide d'outils coupants [7]. La figure 9 représente la macrographique d'une fonte blanche et le tableau 2 indiqué l'influence du carbone total sur la dureté d'une fonte blanche

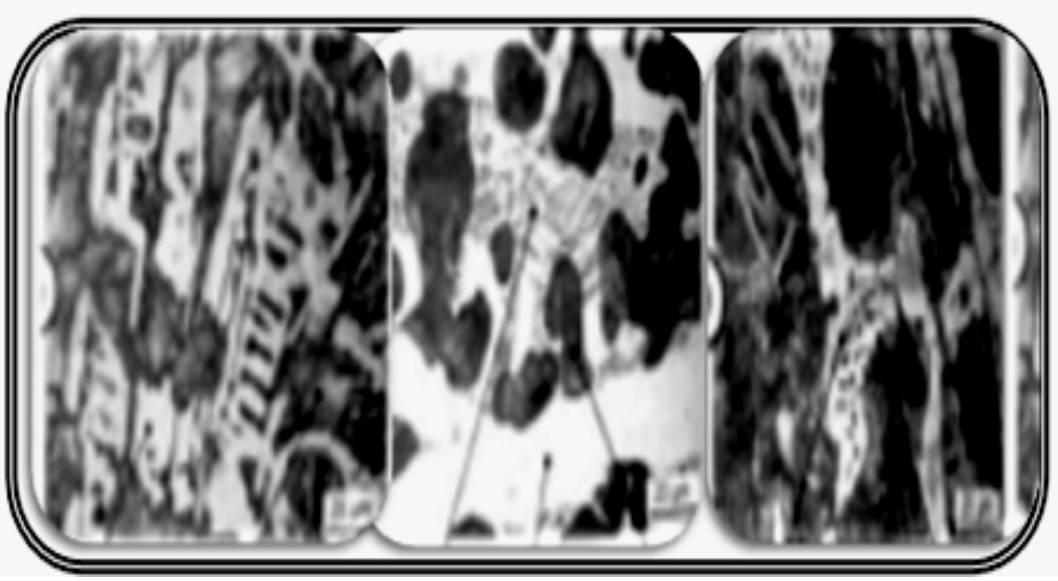


Figure 9 : Vue au microscope de fonte blanche.

Tableau 3 : Influence du carbone total sur la dureté d'une fonte blanche.

Ct (%)	Si (%)	Mn (%)	Dureté (HV)
2,11	0,40	0,40	395
2,37	0,99	0,65	403
2,70	0,65	0,61	456
3,32	0,79	0,60	546
3,57	0,56	0,43	540
3,69	0,33	0,61	516
3,93	0,65	0,35	566

2-2-Fontes grises :

La totalité du carbone est libre est se trouve sous forme de graphite, elles sont obtenues lors du refroidissement lent et température de coulée assez élevée, alors la cémentite peut se décomposer en donnant du carbone libre sous forme de graphite.

$$FeC \leftrightarrow 3Fe + C$$

L'aspect de la cassure à une couleur grise ce qui prouve la présence du carbone libre. L'élément indispensable pour obtenir une fonte grise est le silicium jusqu'à une teneur de 3% ; ensuite viennent le cuivre et le nickel dont le premier possède un pouvoir antiferritisant énergétique au cours du refroidissement mais facilitant la formation de carbure libre (point dur) et la ferrite libre (point doux) et le second (nickel) possède un pouvoir graphitisant plus meilleur que celui du cuivre, mais un pouvoir antiferritisant négligeable. Généralement les fontes grises sont obtenues dans des fours appelés cubilots [7].

2-3-Les Types des Fontes Grises :

2-3-1-Fontes grises à graphite lamellaire*(FGL)* :

Ces alliages sont peut-être plus connus sous le nom de fontes ordinaires car ce sont les plus anciennement utilisées en construction mécanique, en architecture métallique, chauffage domestique et industriel, équipement de voirie. Aujourd'hui encore, elles ont une place prépondérante en fonderie.

Leur structure comprend essentiellement du graphite en lamelles en paillettes, ramifiées et arrangées en ensembles cellulaires, incluses dans une matrice le plus souvent perlitique ou perlito-ferritique. Elles peuvent contenir assez de phosphore pour former un réseau de cristaux analogues à des carbures mais moins durs.

Leurs caractéristiques sont les suivantes :

– leur résistance à la traction ne dépasse guère 400 MPa mais elles ont un meilleur comportement en compression, donc en flexion ;

– leur dureté est modérée (200-280 HB) ;

– elles sont très facilement usinables et résistent particulièrement bien à l'usure sans grippage ;

– elles amortissent bien les vibrations ; elles résistent bien aux corrosions courantes et à la chaleur ;

– elles reçoivent couramment des revêtements protecteurs : émaillage, bleuissage...

En revanche, elles cassent sans déformation plastique apparente, ce qui les fait considérer comme fragiles, résistant mal – sauf sous forme suffisamment massive –à des chocs directs importants [7].

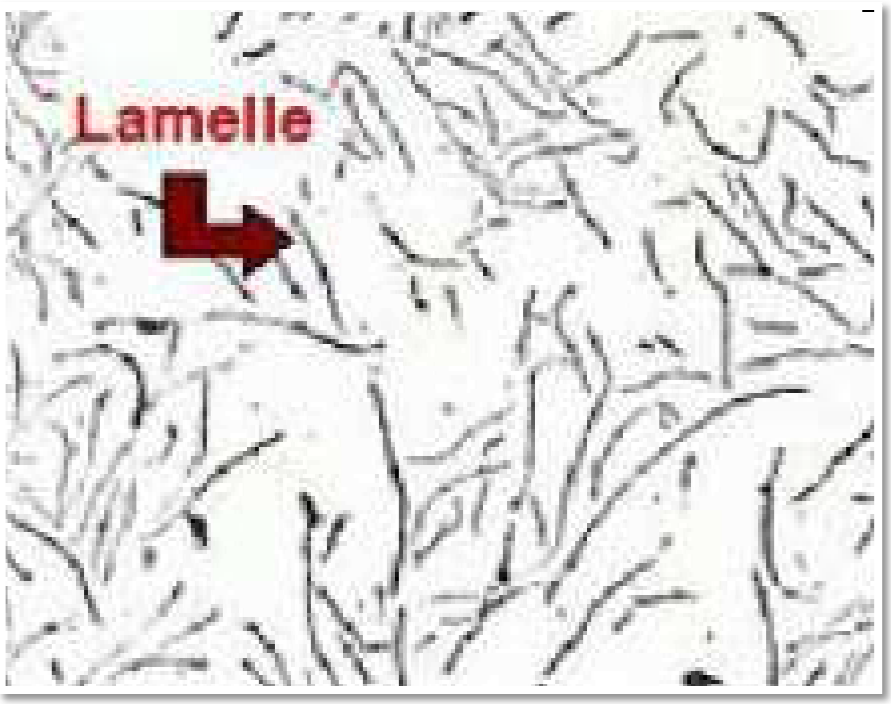


Figure 10 : Vue au microscope de fonte à graphite lamellaire.

2-3-2-Fontes à graphite sphéroïdal*(FGS) :*

Les fontes à graphite sphéroïdal dites aussi parfois fontes ductiles, sont obtenues par un traitement spécifique du métal liquide qui provoque au moment de la solidification un graphite non pas en lamelles mais sous forme de particules quasi sphériques (10 à 100 μm) de diamètre

La sphéricité du graphite, lui-même de résistance mécanique négligeable, régularise la répartition des contraintes dans la matrice et permet de mieux approcher les propriétés de l'acier correspondant.

Ainsi, tout en conservant des propriétés de fonderie favorables, les fontes GS ont des résistances à la traction pouvant dépasser 900 MPa – du moins pour leurs variétés spéciales – avec des modules d'élasticité relativement élevés et des capacités de déformation plastique non négligeables, voire importantes [7].

Certaines nuances ont une ténacité aux chocs suffisante pour permettre de les substituer en toute sécurité à de l'acier dans certaines applications remarquables comme les pièces de suspension et de freinage pour automobiles.

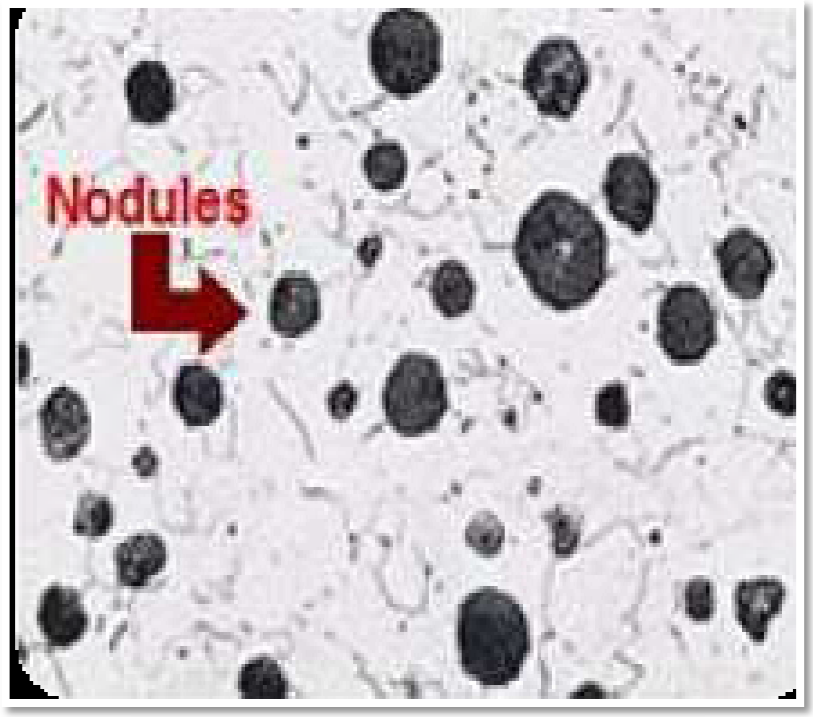


Figure 11 : Vue au microscope de fonte à graphite sphéroïdal.

2-3-3-Fontes à graphite vermiculaire *(FGV)* :

C'est une variété de fontes qui se développe lentement dans un champ d'application limité où l'on a besoin de propriétés combinant avantageusement celles des fontes grises et des fontes GS. La microstructure dite « vermiculaire » ou « compacte » du graphite – GCV – particules non sphériques, de forme allongée, mais beaucoup moins ramifiées que les lamelles des fontes grises, est obtenue par un traitement sur métal liquide dérivé de celui des fontes GS.

On connaît des applications intéressantes – éléments de gros moteurs thermiques, par exemple – en raison d'une conductivité thermique plus grande que celle des fontes GS homologues et d'une résistance aux contraintes thermomécaniques supérieure à celle des fontes grises.

Leur élaboration est au moins aussi délicate que celle des fontes GS ; elles peuvent être perlitiques, ferritiques, bainitiques... comme les autres fontes [7].

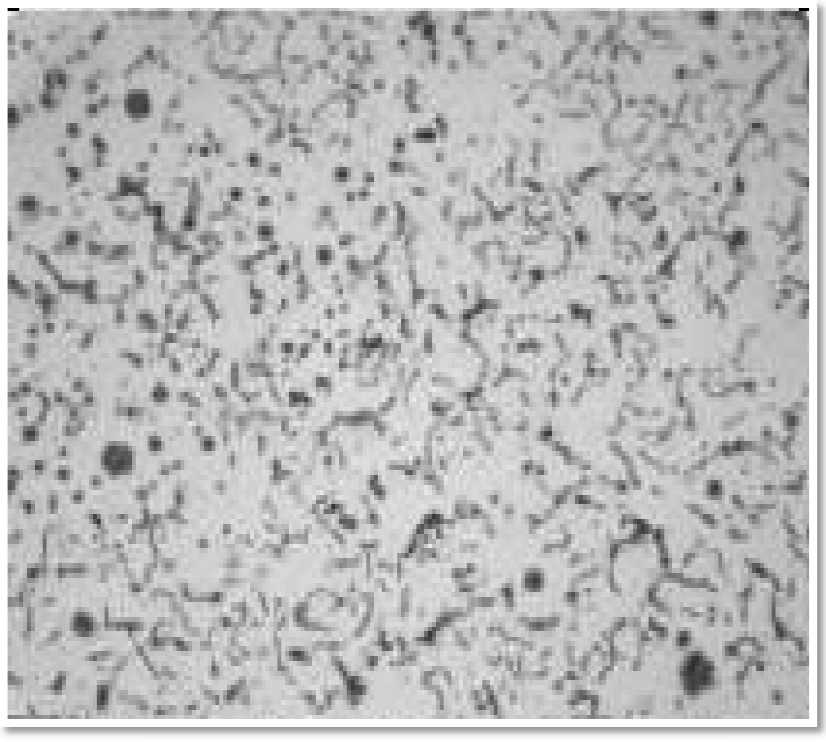


Figure 12 : Vue au microscope de fonte à graphite vermiculaire.

2-3-4-Fontes à graphite malléables *(FGM)*:

Par un recuit approprié, on peut industriellement décomposer les carbures primaires d'une fonte blanche suivant la réaction

$Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$ (graphite).

Il est remarquable que le graphite précipite alors dans la matrice, à l'état solide, sous forme de particules non sphériques qu'on peut néanmoins qualifier de « nodules »

Comme dans le cas des fontes GS, les propriétés s'approchent alors de celles de l'acier constituant la matrice, c'est-à-dire que la rupture est précédée par une déformation plastique importante. On parle ici de « malléabilité », ce qui est impropre mais consacré par l'usage.

1- Fontes malléables à « cœur noir »

Connues depuis une centaine d'années, ces fontes malléables « à cœur noir » – à cause du graphite –, dites parfois **« américaines »**, ont joué un grand rôle dans le développement du machinisme agricole, de l'automobile... Mais actuellement, leur production est pratiquement abandonnée en France, d'autres pays leur réservant encore une part de marché plus importante.

2-Fontes malléables « à cœur blanc »

Un autre procédé classique pour produire des pièces déformables plastiquement à partir d'une fonte blanche consiste à la recuire en atmosphère décarburante – **procédé Réaumur**– pour éliminer la plus grande partie du carbone.

Bien adapté aux petites pièces de quincaillerie, aux raccords tubulaires, aux éléments d'ornementation, ce procédé a été abandonné en France à cause de graves handicaps : la très longue durée du traitement thermique et la limitation de l'épaisseur des pièces – moins de 10 mm.au **fer** sous forme de **carbures métastables** [7].

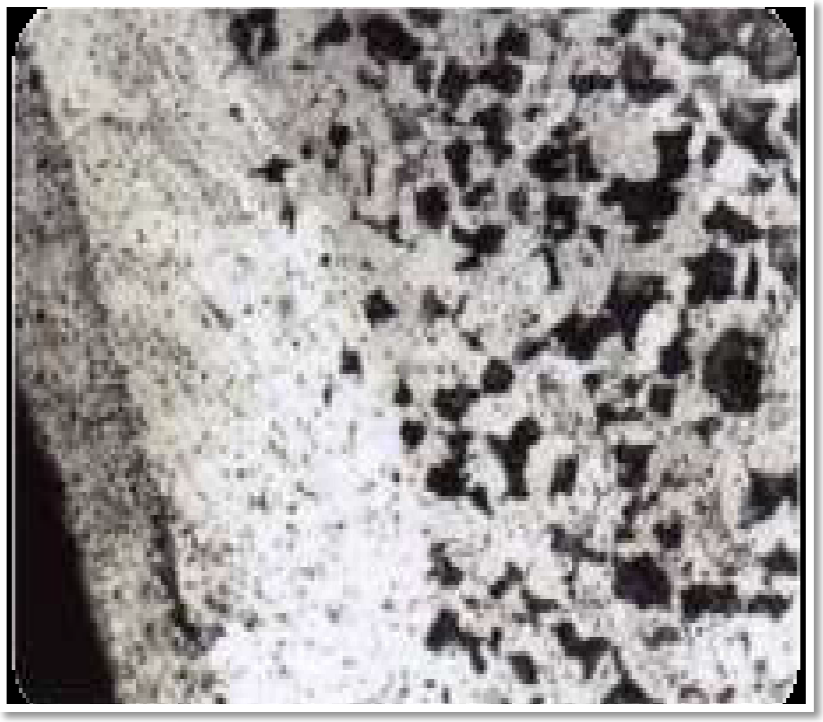


Figure 13 : Vue au microscope de fonte à graphite malléables.

2-4-Les Familles des Fontes GS :

La majorité des pièces en fonte GS sont produites dans l'un des peuvent tous être obtenus bruts de coulée, sans traitement thermique

2-4-1-Fonte GS Ferritique :

Sphéroïdes de graphite dans une matrice de ferrite qui est essentiellement du fer pur. Résilience élevée. Relativement bonne conductibilité élevée. Dans certains cas, bonne résistance à la corrosion. Bonne usinabilité.

2-4-2-Fonte GS Ferrito-Perlitique :

Sphéroïdes de graphite dans une matrice mixte de ferrite et de perlite. C'est la nuance de fonte GS la plus courante. Ses propriétés se situent entre celles des structures «totalement ferritiques» et «totalement perlitiques ». Bonne usinabilité. La moins chère.

2-4-3- Fonte GS Perlitique :

Sphéroïdes de graphite dans une matrice de perlite. La perlite est un agrégat fin de lamelles de ferrite et de cémentite (Fe3C). Relativement dure. Ductilité un peu réduite. Faible perméabilité magnétique bonne usinabilité.

2-4-4-Fonte GS Martensitique :

Dans les conditions «brutes de coulée», l'alliage est dur et cassant, et rarement utilisé. Cependant, la Martensitique possède de très fortes résistances en traction et à l'usure. Un revenu à (500°C) procure une dureté de 300 HB, un à 600oC, 250 HB de dureté.

2-4-5-Fonte GS à Trempe Bainitique :

C'est la dernière arrivée dans la famille des fontes GS et elle représente un nouveau groupe de fontes GS par elle-même, offrant aux ingénieurs de conception (désigne) une combinaison remarquable de ténacité, dureté et résistance à l'usure.

L'ADI est presque deux fois plus forte que les nuances ASTM des fontes GS alors qu'elle garde un bon allongement et une dureté élevée. De plus, l'ADI offre une résistance exceptionnelle à l'usure et à la fatigue, permettant ainsi aux ingénieurs de réduire le poids et le coût des composantes, cela pour une performance équivalente ou améliorée [8].

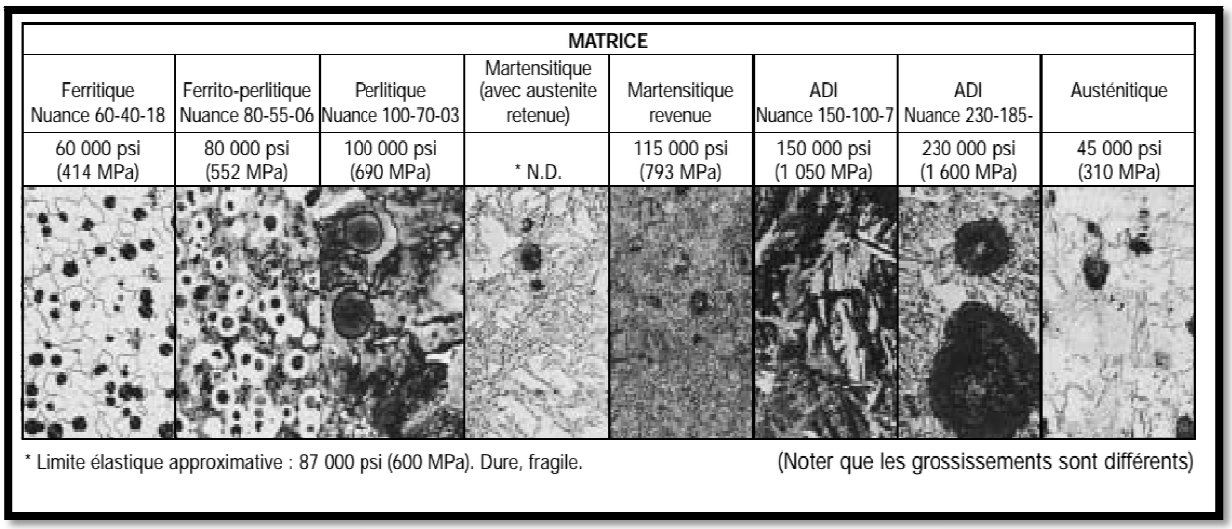


Figure 14 : Représente les matrices des fontes GS.

2-5-Principe les applications des fontes :

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

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

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

- Combiner plusieurs propriétés (résistance et ductilité élevée).
- Offrir un avantage économique en réalisant plus simplement des pièces aux formes les dimensions recherchées.
- Les fontes G.S perlitiques sont utilisées en raison de leurs excellentes qualités de frottements, dans la fabrication d'engrenages de vilebrequins de moteurs, de segments dépistant des cylindres de laminoirs ou de papeterie de carters de boite de vitesses de vérins hydrauliques…..etc.
- Les fontes (G.S) à structure ferrito — perlitique sont utilisées dans la fabrication de débit de machines outils et de pièces de l'industrie automobile tels que : tambours de Freins, ...etc.
- Les fontes (G.S) à matrice ferritique sont employées, pour leur ductilité pour la réalisation de tuyaux raccords de portes de fours de pièces de sécurité dans l'industrie automobile, (bras de suspension, pivots de roues... etc.)[9].

3-Influence des éléments sur la structure des fontes :

3-1- Influence des éléments normaux :

Carbone

Sa teneur est comprise entre 2,8 et 3,5% en masse. Le carbone augmente la coulabilité car le graphite formé dans le métal liquide a une capacité thermique élevée, permettant au mélange de rester fluide lors de la coulée en empêchant un refroidissement trop rapide [10].

Il abaisse la température de fusion. De 1537°C pour un fer pur, elle peut décroître jusqu'à1150°C à l'eutectique (correspondant à 4,3% de C). En contrepartie, le carbone provoque aussi la baisse de la température de transformation allotropique (727°C au lieu de 912°C pour un fer pur), ce qui rend délicat l'emploi de pièces en fonte à température élevée [11].

Différents Types de Carbone :

***Carbone combinée (Fe_3C) :** C'est un carbure de fer appelé cémentite ou carbone combiné : Cc.

***Carbone libre :** C'est le graphite, on l'appelle aussi carbone graphitique ou Carbone libre : Cg.
-En solution solide
-En graphite.
***Carbone total (Ct):**La somme entre le carbone libre et combiné, dans le carbone total qui est la teneur dans la fonte Ct
-quantité totale de carbone contenue dans la fonte, sous quelque forme qu'il soit. Ces-quantités s'expriment presque toujours sous forme de pourcentage en poids.

$$Ct=Cg+Cc$$

***Carbone Equivalent:** L'équivalent en carbone est un titre fictif qui permet d'apprécier rapidement si, en principe une fonte donnée est hypo eutectique, eutectique, hyper eutectique. L'équivalent en carbone Céq.est défini comme suit dans la norme NF A 32-101 (annexe B) de juin 1987:

$$Céq= Ct+1/3(Si+P)$$

Avec

Ct: Carbone total ;

Si : Silicium ;

P : Phosphore.

Silicium

Le silicium qui est présent à des taux plus au moins élevés dans toutes les fontes, se dissout dans le fer γ avec plus de facilité que le carbone [12].

Le silicium devient élément d'addition au dessus d'une teneur de 3%. Le silicium est un élément alphagène, il joue un rôle fondamental en métallurgie des fontes, car, aux teneurs considérées il oriente la solidification des alliages Fe-C-Si vers le système stable (graphite-ferrite), c'est un graphitisant puissant. Le silicium est un élément très important dans la composition des fontes.

Ces avantages sont multiples :
- En favorisant la graphitisation, il permet d'adoucir la matrice et d'obtenir des nuances entièrement ferritiques.

On évite ainsi l'apparition de perlite qui pourrait se décomposer si la température dépassait 450°C. Par contre, l'ajout de silicium dans une fonte déjà ferritique augmente sa dureté audétriment de sa ductilité.
- Il accroît la température de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ permettant d'élever la température d'utilisation des pièces.
- Il améliore la tenue à l'oxydation de par la formation de silicates FeSiO4 qui favorisent l'adhérence de la couche d'oxydes [10].

L'influence du silicium sur la graphitisation est telle que pour contrôler la quantité de graphite dans une fonte, on introduit la notion de carbone équivalent définie par :

$$\% C_{éq} = \%C + 1/3\%Si$$

Phosphore

Le phosphore, qui, à des taux plus au moins élevés, est présent dans toutes les fontes, se combine facilement au fer de celles-ci pour donner un phosphure de fer, de formule chimique Fe3P, lequel forme :
- avec le fer, un eutectique phosphoreux Fe3P- Fe, appelé stéatite, qui fond à 1050°C environ.
- avec le fer et la cémentite, un eutectique phosphoreux ternaire Fe3P- Fe3C-Fe dont la température de fusion est voisine de 950°C.

L'eutectique phosphoreux, qui est dans les fontes, réparti, le plus généralement en plages Séparées est caractérisé par :
- Une expansion accompagne sa solidification.
- Une température de fusion, relativement basse.
- Une très grande dureté.
- Une très grande fragilité.
- Un coefficient de dilatation relativement élevé [10].

L'influence du phosphore dans les fontes ordinaires est complexe, car la répartition de l'eutectique phosphoreux varie considérablement suivant la vitesse de refroidissement.

Lorsque celle-ci est grande (épaisseur des pièces voisine de 10 mm dans la coulée en sable), l'eutectique phosphoreux est réparti en un réseau continu délimitant complètement les cellules eutectiques dès que la teneur en phosphore atteint 0,4%. L'existence d'un tel réseau contribue à diminuer sensiblement la résistance à la traction [12].

Soufre

La teneur en soufre dans la fonte de moulage est pratiquement inférieure à

0,1 %. Le soufre se combine facilement au fer des fontes pour donner le sulfure de fer FeS, qui est nuisible aux moulages.

Le soufre ayant pour le manganèse plus d'affinité que pour le fer, il y a, quand le sulfure de fer est mis en présence de manganèse, « déplacement » du soufre, suivant la réaction chimique :

$$FeS + Mn = MnS + Fe$$

Le sulfure de manganèse MnS formé, n'a pratiquement pas d'action gênante sur la fonte [10].

Manganèse

Aux faibles teneurs, dans la fonte, le manganèse a essentiellement pour rôle de détruire le sulfure de fer. A partir de teneurs de l'ordre de 0,8 à 1%, le manganèse tend à s'opposer à la graphitisation [10].

3-2- Influence des éléments spéciaux :

Aluminium

L'aluminium est alphagène. Il présente la particularité d'être graphitisant jusqu'à une teneur de4%,carbirugène entre 10 et 18% , puis à nouveau graphitisant jusqu'à 27% , valeur à partir de la quelle il reste carbirugène. Il augmente sensiblement la résistance à l'oxydation [13].

Molybdène

Elément antigraphitisant, le molybdène est, par ailleurs, soluble dans la ferrite, qu'il durcit. Ces deux propriétés ont pour résultat, que, même à faible teneur dans la fonte (0,25 à 0,6%) le molybdène est un affinant de la perlite, qu'il tend à transformer en troostite. Comme il a, également, une action affinante sur le graphite, le molybdène, en définitive, confère aux fontes auxquelles il est ajouté, une bonne résistance à la rupture [10].

Cuivre

Le cuivre a un effet légèrement graphitisant, mais cette action semble n'influencer que la cémentite libre (dont il favorise la décomposition) et non la cémentite de la perlite. Par ailleurs le cuivre donnant avec le fer α une solution solide, durcit la ferrite et affine la perlite.

Ces deux actions simultanées ont pour résultat d'augmenter les caractéristiques mécaniques de la perlite et, toutes choses égales par ailleurs, celle de la fonte. Mais, comme le cuivre affine également le graphite, son addition à une fonte se traduit, par des résultats supérieurs à ceux que son action sur la perlite seule, laisseraient supposer.

Le cuivre peut, en partie, remplacer le nickel, ses effets étant comparables.

Toutefois, dans la fonte, la teneur en cuivre ne doit pas dépasser 7% (car, au-delà de cette valeur, le cuivre ne se dissout plus dans le fer) [10].

Titane

Le titane, ajouté à la fonte, même à dose extrêmement faible, a un effet très sensible sur le graphite, qu'il rend très fin. Le titane- dont la teneur dans la fonte doit être toujours très faible (0,10 à 0,30%)- est un élément légèrement graphitisant, dont l'action, à ce point de vue peut être neutralisée par une faible addition de vanadium [10].

L'augmentation du titane dans la fonte amène simultanément :

- Une baisse de la résistance à la traction et de la dureté.
- Une baisse du module de Young [14].

Nickel

Le nickel est un graphitisant, toutefois, son action à cet égard est nettement moins efficace que celle du silicium. Il a la propriété remarquable d'homogénéiser la structure des pièces moulées en fonte, car il régularise la précipitation du graphite et la grosseur de celui-ci.

Le nickel affine la perlite, ce qui a pour effet d'augmenter les caractéristiques mécaniques de la fonte. Il modifie la nature de l'austénite qui se transforme en :

- Perlite très fine (teneur en nickel de la fonte : 0,5 à 2%).
- Troostite (teneur en nickel de la fonte : 2 à 4%).
- Martensite (teneur en nickel de la fonte : 4 à 6%) [10].

Chrome

Le chrome est un antigraphitisant énergique, dont l'effet, sur la fonte dépend de son pourcentage dans celle-ci.

Ajouté à une fonte grise normale en très faible quantité (0,1 à 0,20%) le chrome affine tant le graphite que la perlite, ce qui a pour effet d'augmenter nettement les valeurs de la dureté et de la résistance à la rupture des pièces coulées. Au-delà de 0,2%, dans une fonte grise normale, le chrome forme des carbures très stables à chaud mais très durs, et dès qu'elle contient plus de 0,7% de chrome, la fonte devient très difficile à usiner à l'outil coupant [10]. Le chrome donne à la fonte une grande résistance à l'oxydation. Il augmente la température de transformation allotropique (élément alphagène) [13].

3-3-Inoculation :

L'inoculation de la fonte grise consiste à ajouter tardivement au métal liquide une faible quantité (généralement quelques dixièmes de pour-cent) d'un produit, appelé **inoculant**, au moment du remplissage de la poche de coulée ou au moment du remplissage du moule, dans le but **de modifier la morphologie de la solidification** de telle sorte qu'une ou plusieurs propriétés de la fonte soient améliorées comme suivantes :

- la diminution de la susceptibilité à la solidification lédéburitique (fonte blanche = points durs = mauvaise usinabilité)
- l'amélioration des caractéristiques mécaniques et technologiques
- l'atténuation de la sensibilité à l'épaisseur en ce qui concerne la structure et les caractéristiques.
- fournir des germes à la formation du graphite :

Du point de vue métallurgique l'effet inoculant s'explique par l'augmentation du nombre de germes pour la précipitation du graphite dans la fonte liquide [5].

4-Propriétés mécaniques :

4-1-Caractéristiques mécaniques fondamentales :

Nous appellerons caractéristiques mécaniques fondamentales celles qui, étant aisément mesurables, ont fait l'objet d'études nombreuses et approfondies, et à partir desquelles on peut se faire une bonne idée du comportement mécanique général de la fonte [16].

4-1-1-Essai de traction :

Depuis l'application aux fontes de la métallographie, les caractéristiques mécaniques de ces matériaux, et notamment leur résistance à la traction, n'ont cessé de s'améliorer. Toutefois, l'allongement de rupture reste très faible en raison de la morphologie du graphite et on ne le mesure pas en pratique (il est généralement inférieur à 1 %) [16].

Il consiste à placer une éprouvette (figure 16) du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur le matériau jusqu'à sa rupture. On enregistre la force et l'allongement, que l'on peut convertirent contrainte déformation [5].

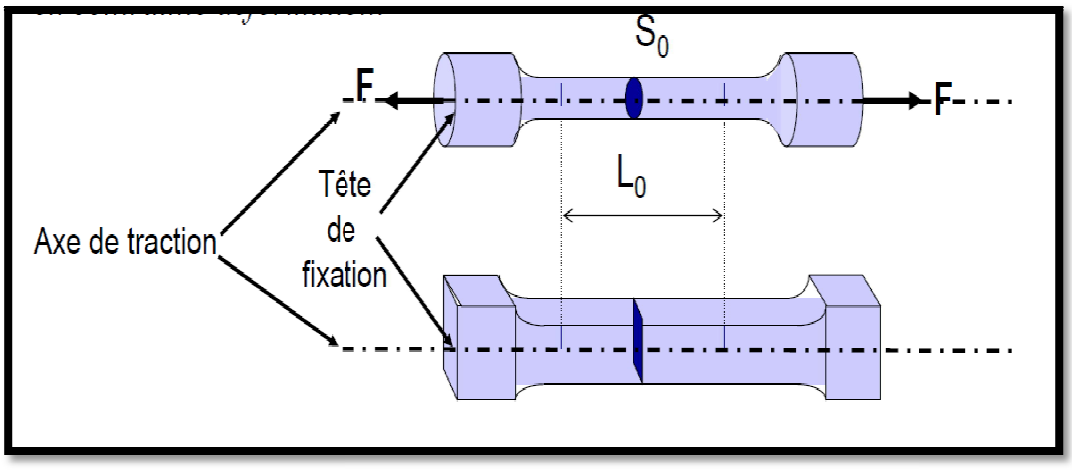


Figure 15: Schéma du l'éprouvette de traction [5].

4-1-2-Essai de compression :

Certains matériaux se prêtent très mal aux essais de traction : il est très difficile d'amarrer correctement une éprouvette de traction d'un matériau fragile pour lequel la rupture survient aux congés, sièges de concentration de contraintes.

Dans certains cas, on ne dispose pas d'assez de matière pour usiner une éprouvette cylindrique ou prismatique et comprimée entre deux plateaux rigides dont le déplacement est imposé comme schématisé la figure 17. Il est alors plus aisé de réaliser un essai de compression qui peut être effectué sur un simple cylindre. Enfin, les caractéristiques mécaniques en compression sont indispensables à connaître pour certaines applications et si, bien souvent, ce sont les mêmes qu'en traction, il existe des matériaux pour lesquels ce n'est pas exact (fontes, béton, etc.)[3].

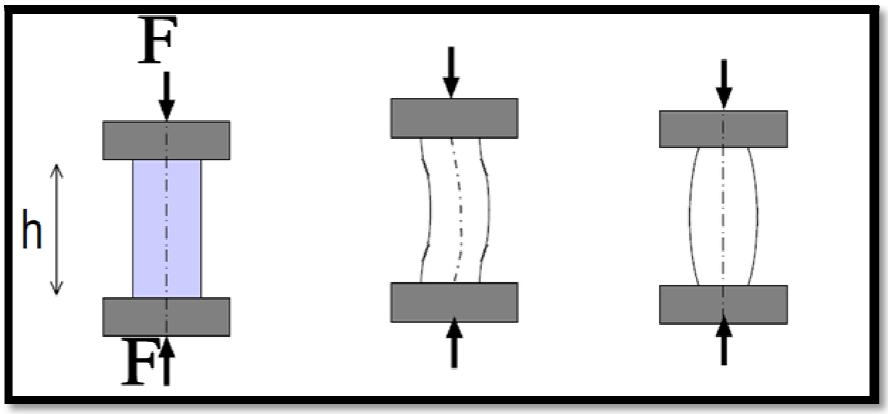


Figure 16 : Représentation d'éprouvette d'un essai de compression [5].

4-1-3-Essai de résilience :

La résilience représente la résistance d'un matériau à la propagation brutale d'une fissure sous l'effet d'un choc. Elle se mesure par l'énergie par unité de section consommée pour la rupture d'une éprouvette, en J/cm2.

L'essai de résilience le plus couramment pratiqué sur les matériaux métalliques est l'essai Charpy, effectué sur un mouton pendule qui brise en flexion 3-points une éprouvette prismatique à entaille en U ou en V.

L'altitude de remontée du pendule, comparée à son altitude de départ, permet de chiffrer facilement l'énergie absorbée lors de la rupture. Le même type d'appareil permet d'effectuer l'essai Izod, utilisé autant pour les polymères que pour les métaux, où l'éprouvette entaillée est encastrée en porte-à-faux [3].

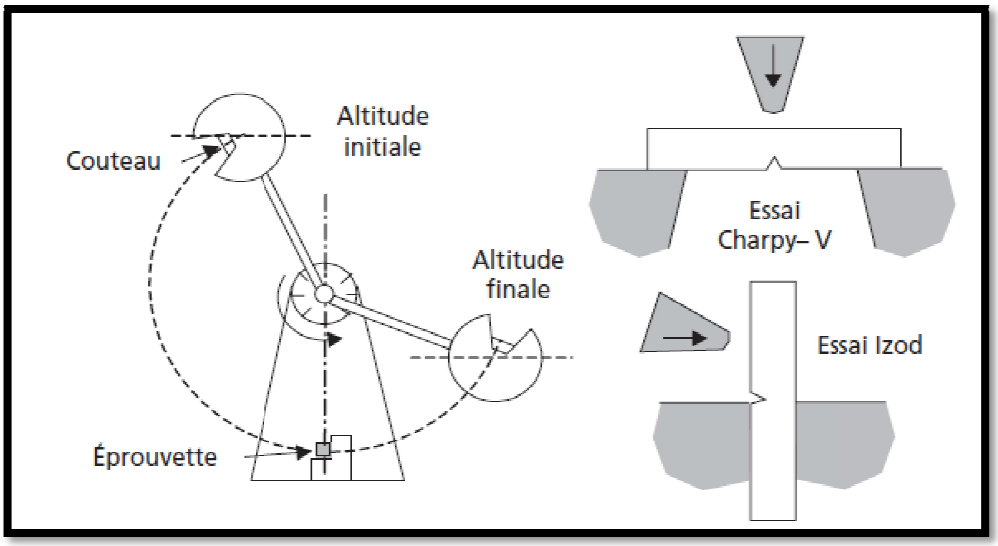


Figure 17 : Schéma d'un Mouton –pendule d'Essai Charpy–V et Essai Izod[3].

4-1-3-Essai de flexion :

Cet essai est séduisant pour déterminer les caractéristiques des matériaux fragiles qui se prêtent mal à l'essai de traction.

Dans le cas le plus simple, le barreau d'essai est posé en appui libre sur deux supports écartés d'une distance *D* et la charge est appliquée au milieu de cet intervalle par l'intermédiaire d'un poinçon de forme telle qu'aucune pénétration ne puisse se produire dans le métal du barreau.

Au cours de la flexion, les fibres sont diversement sollicitées, en compression comme celles situées au-dessus de la fibre ou de la surface neutre, en traction au-dessous [3].

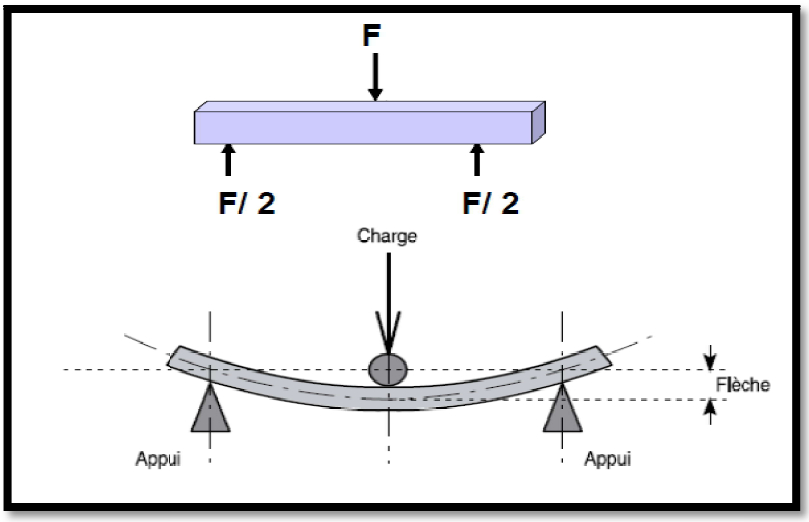


Figure 18 : Représente l'essai de flexion [5]**.**

5-1-4-Essai de dureté :

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la pénétration : un pénétrateur de géométrie connue est appliqué sur la surface du matériau à tester avec une force connue pendant un temps donné. Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur.

Bien que la dureté ne soit pas une propriété simple à définir, les essais de dureté sont très utilisés en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. Leur résultat donne un aperçu synthétique des propriétés mécaniques du matériau testé [3].

a) Essais de Brinell :

Le pénétrateur est une bille de diamètre **D**. On détermine le diamètre moyen "**d**" de l'empreinte laissée par le pénétrateur sur la surface du matériau, après enlèvement de la charge [15].

$$\text{HBS ou HBW} = \frac{0.102 * 2F}{\Pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{..... [3].}$$

La dureté Brinell est un nombre proportionnel au quotient de la charge d'essai **F**, par l'aire de l'empreinte considérée comme une calotte sphérique de diamètre **d** [15]**.**

Pour éviter la déformation et la détérioration de la bille, l'usage de l'essai Brinell est limité aux matériaux tels que HBS < 350 ou HBW< 650 [3].

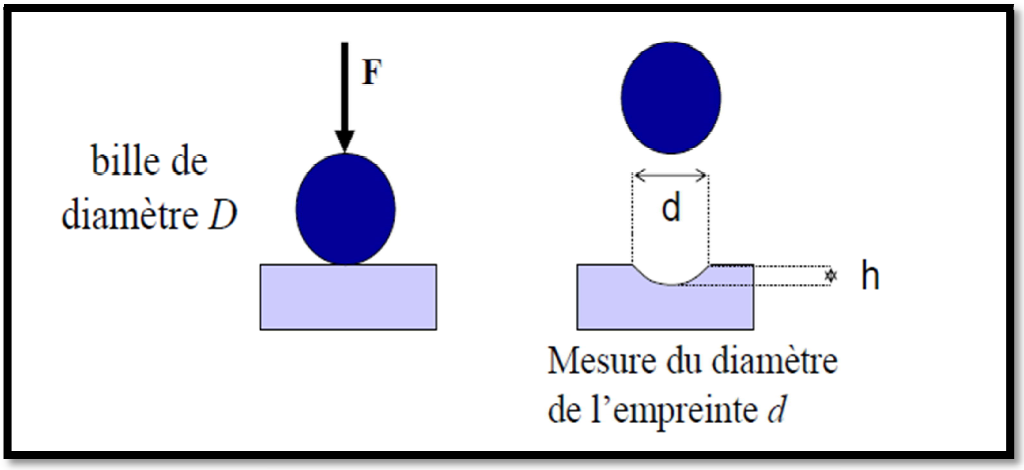


Figure 19 : Essai de Brinell [5].

b) Essai de Rockwell:

Le pénétrateur est soit une bille en acier trempé pour les **faibles duretés essai B**, soit un cône en diamant Pour les **fortes duretés essai C**, et la charge d'essai peut prendre plusieurs valeurs. La dureté est définie à partir de la différence de profondeur de pénétration après application de la charge.

Le pénétrateur est appliqué sur la surface de la pièce avec une précharge$F0$. Il descend alors à un niveau qui sert d'origine aux mesures de profondeur ultérieures [3].

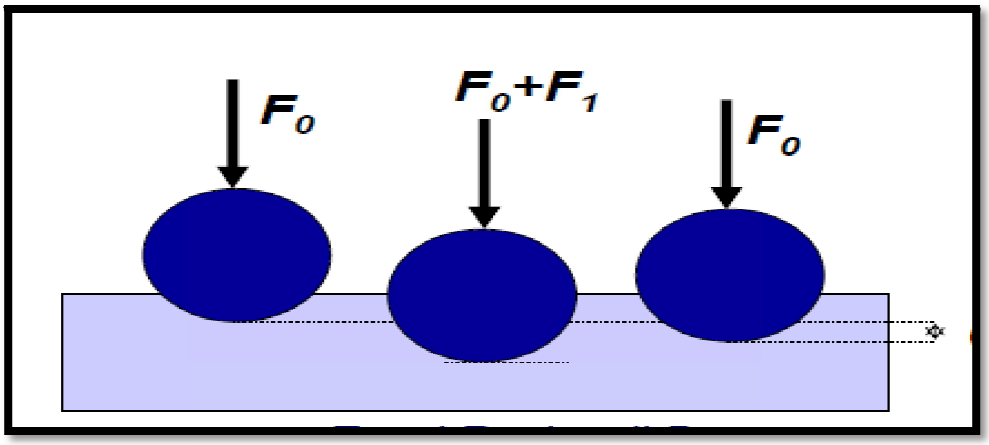


Figure 20 : Schéma des différences étapes d'exécution d'un essai et définition de la dureté Rockwell B [5].

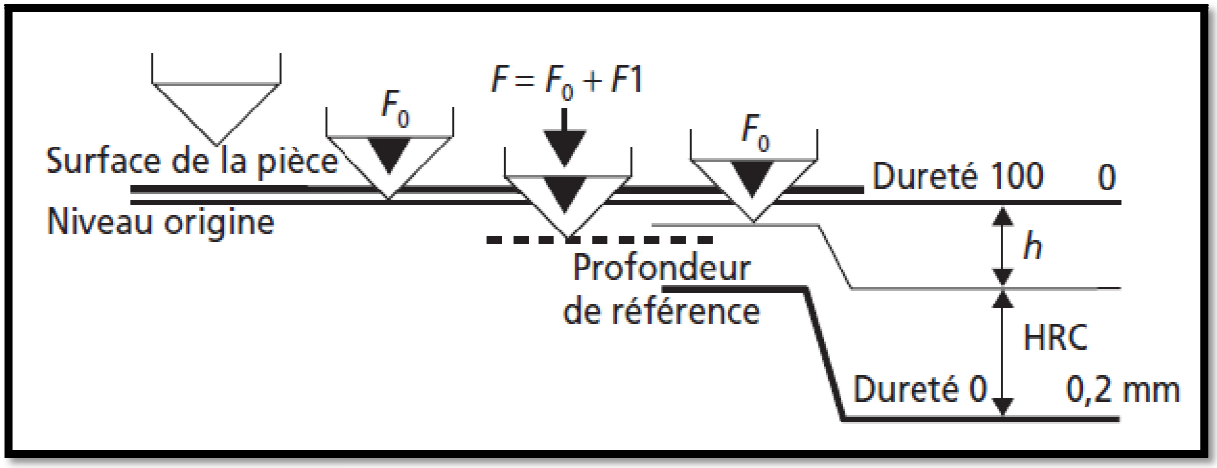


Figure 21 : Schéma des différences étapes d'exécution d'un essai et définition de la dureté Rockwell C [3].

c) Essai de Vickers:

Le pénétrateur Vickers est en diamant de forme pyramidale à base carrée. On mesure la moyenne des deux diagonales "d" de l'empreinte laissée par le pénétrateur sur le matériau [15].

$$HV = 0.102\frac{2F*\sin(136°/2)}{d^2} = 0.189\frac{F}{d^2}$$..... [3].

Les duretés Brinell et Vickers donnent des résultats du même ordre.

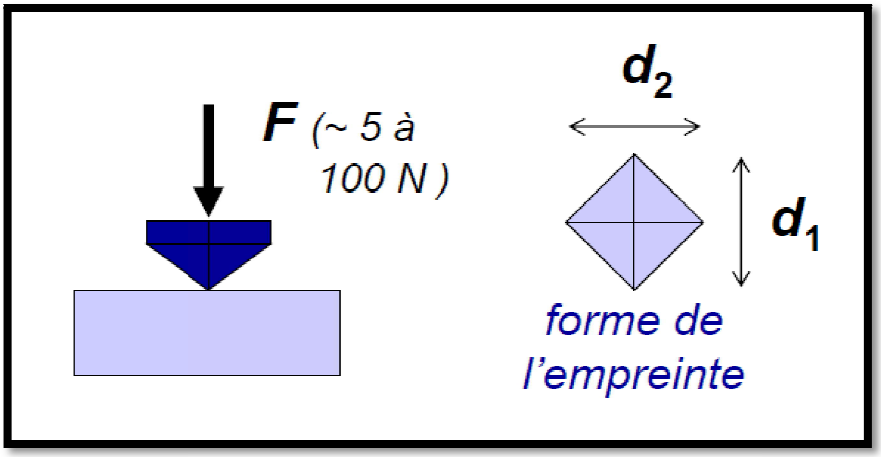


Figure 22 : Procédure d'un Essai de dureté Vickers [5].

Introduction :

Ce chapitre fait le point sur les différentes techniques expérimentales utilisées, d'une façon générale, le développement des différentes étapes d'élaboration suivies par la DFR (Direction de Fonderie de Rouïba).

Les fontes sont obtenues par des appareils de fusion directement par le traitement du minerai (hauts fourneaux) elles sont appelées « fontes de première fusion », c'est pourquoi on recourt à une deuxième fusion dans plusieurs sortes d'appareils de deuxième fusion : les cubilots qui sont les plus utilisés, les fours électriques à arcs ou à induction.

L'utilisation des méthodes précises garantit des qualités très régulières de ces caractéristiques mécaniques et physiques.

I- Les fours utilisés :

1-Four à arc:

Un four électrique à arcs est un réacteur métallurgique. Il est destiné à recevoir la charge métallique de capacité 10T, qui est fondue au moyen d'un ou plusieurs arcs électriques jaillissant entre les électrodes en graphite et la charge.

Le four à arc est alimenté avec un courant alternatif. La température engendrée par l'arc dépasse 1800°C et peut atteindre les 3600°C.

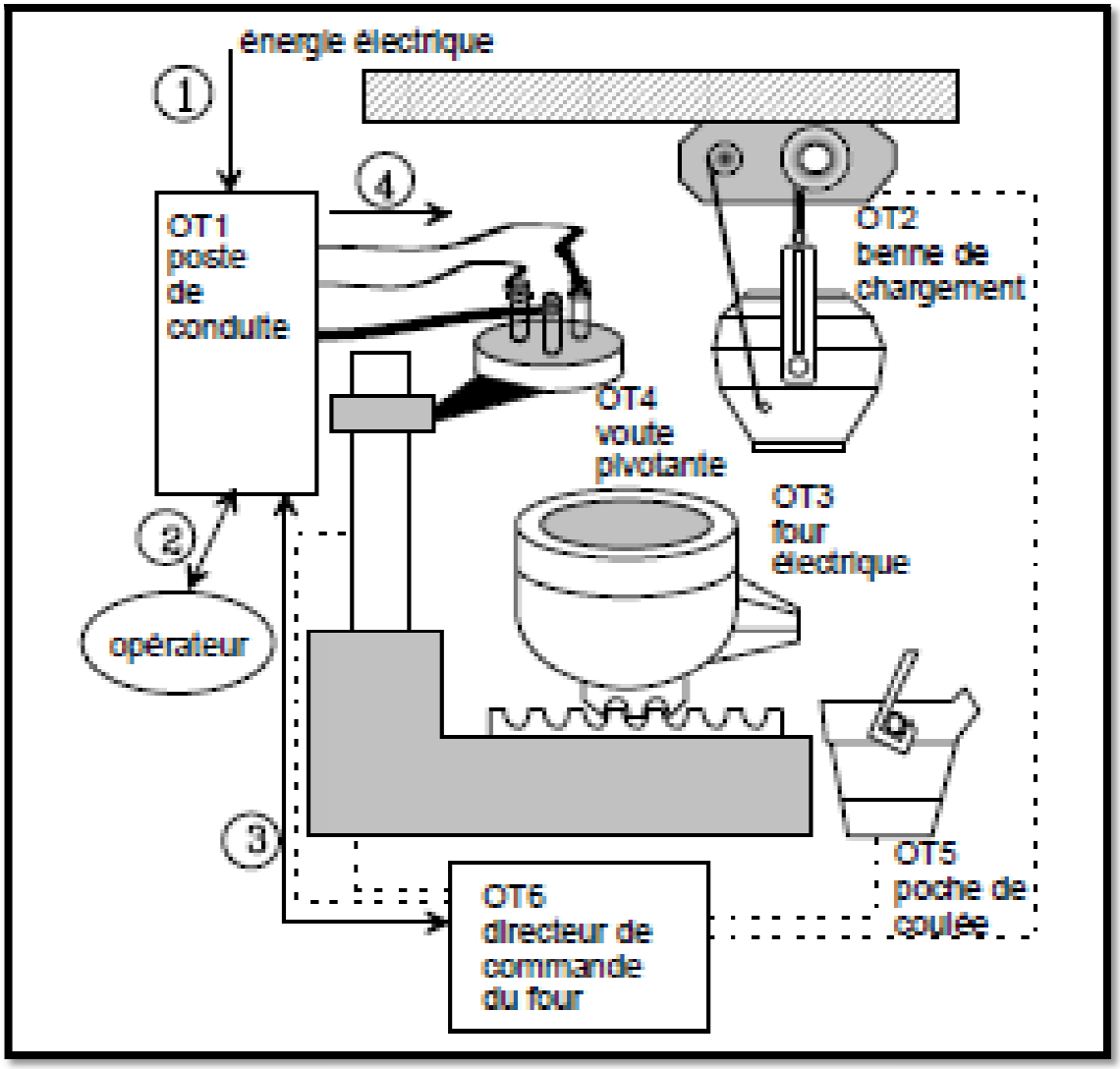


Figure 23 : Représentation des composantes de four à arc électrique dans un bilan à partir de poste de conduite jusqu'à la poche de coulée.

A-Les composantes du four à arc :

OT1 : Le poste de conduite assure:

⇒L'alimentation en énergie des électrodes.

⇒Le contrôle par un opérateur de la fusion dans le four.

⇒La régulation de la position des électrodes fixées sur un mât mobile.

⇒L'acquisition des grandeurs électriques caractérisant les arcs électriques.

OT2 : La benne de chargement qui, au moyen d'un pont roulant, permet de déverser la ferraille et les différents additifs dans le four électrique.

OT3 : Le four électrique, constitué de parois en matériaux réfractaires. La température du four atteint 1600 °C lors de la fusion.

OT4 : La voûte pivotante qui vient coiffer le four quand celui-ci est chargé. La voûte pivotante porte également les électrodes qui permettent de générer l'arc électrique. Les électrodes peuvent se déplacer verticalement afin de faire varier les caractéristiques de l'arc électrique.

OT5 : La poche de coulée qui permet de récupérer la fonte préparé dans le four.

OT6 : Le directeur de commande qui permet :

⇒ De commander la vidange du four en fin de fusion. Le four pivote autour d'un axe horizontal ce qui lui permet de se déverser dans la poche de coulée.

⇒ D'assurer le remplissage du four en commandant les mouvements de la benne de chargement.

⇒ De commander la position du mât supportant les électrodes.



Figure 24 : Le four à arc électrique utilisé au cours de notre étude (sis à Direction de Fonderie de Rouïba).

1-1-Les matières premières utilisées dans le four à arc :

La matière première utilisée dans un four à arc est : les tôles d'aciers, la fonte neuve, les pièces rebutées, le système de coulée (chenal, attaque, masselotte, refroidisseur…), les lingots, leurs chargement dans le four se fait a l'aide d'un électro-aimant équipé d'un pesant.

1-1-1-Les fontes neuves :

Sont des fontes brutes (n'ayant pas subi de transformation) qui proviennent de l'industrie sidérurgique sous forme de l'lingot de livrés en lots homogènes.

Ces fontes proviennent de procédés divers (coulée directe de haute-fourneau, affinage et ajustement au four électrique, combinaison avec l'élaboration d'autres produits, etc.).

1-1-2-Les fontes hématites :

C'est un oxyde de fer, un minéral est très répandu à surface de la et son identification est aisée .l'hématite est utilisée dans l'élaboration des fontes graphite lamellaire.



Figure 25 : Les fontes (les gueuses) utilisent dans le four à arc,
a : l'hématite est utilisée dans l'élaboration des fontes à graphite lamellaire
b : fonte neuve est utilisée dans l'élaboration des fontes à graphite sphéroïdal.

1-1-3-Les retours des fontes :

Une règle classique élémentaire impose à chaque unité de fabrication de refondre ses propres retours, ces retours sont constitués par les jets de coulée, c'est-à-dire les systèmes de remplissage et de masselotte détachés des pièces au cours du décochage, et par les rebuts ou affuts, c'est-à-dire les pièces rejetées pour non-conformité aux différents stades du contrôle.



Figure 26 : Les retours des fontes.

1-1-3-Acier doux :

Qui sont utilisé comme charge au niveau de la fonderie sont des ferrailles d'acier, des déchets d'acier, les lots correspondants se caractérisent par leur composition chimique les ferraille s'apportent plus ou moins d'impuretés nuisible.

1-2-Lit de fusion :

L'élaboration d'une fonte moulée exige la fusion préalable de ce qu'on appelle, en termes de métier "lit de fusion ", c'est-à-dire l'ensemble des matières premières fondues.

♦ Si la nuance des pièces rebutées est de Ft25 (FGL; fonte à graphite lamellaire), la charge contient :

- fonte hématite,
- la fonte de retour (FGL),
- l'acier doux.

Et les tableaux «4et5» présentent leur compositions chimiques et quantités des charges métalliques pour la fonte FGL.

Tableau 4 : Compositions chimiques de différentes charges constituant le lit de fusion Pour la fonte à graphite lamellaire :

Elements addition (%) / Materiaux	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ceq
La fonte de retour FGL	3.25	1.65	0.8	0.015	0.15	0.05	4.45
L'hématite	3.5 à 4.3	2 à 2.5	0.68	0.04	0.2		5.21
L'acier doux	0.1	0.1	0.4	0.014	0.019	0.015	0.39

Tableau 5 : Quantités des constituants de la charge métalliques de lit de fusion pour les fontes FGL en pourcentage (%) et en poids (Kg) :

Charge métallique	Teneurs (%)	Poids(Kg)
La fonte de retour FGS	60	6000
La fonte neuve F_1	20	2000
l'acier doux	20	2000

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

- 2 tonnes de fonte neuve F1,
- 6 tonnes de la fonte de retour (FGS),
- 2 tonnes de l'acier doux.

On commence à charger d'abord la fonte quelque soit FGL ou FGS et on se termine par les chutes d'acier comme dernière couche.

Tableau 6 : Compositions chimiques de différentes charges constituant le lit de fusion pour la fonte à graphite sphéroïdal :

Elements addition (%) / Materiaux	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ceq
La fonte de retour FGS	3.65	2.63	0.30	0.015	0.06	0.05	4.54
La fonte neuve F_1	3.5 à 4.53	1.60	0.01	0.01	0.03		4.55
L'acier doux	0.1	0.1	0.4	0.014	0.019	0.015	0.39

Tableau7 : Quantités des constituants de la charge métalliques de lit de fusion pour les fontes FGS en pourcentage (%) et en poids (Kg) :

Charge métallique	**Teneurs (%)**	**Poids(Kg)**
La fonte de retour FGS	60	6000
La fonteneuve F_1	20	2000
l'acierdoux	20	2000

1-2-1-Les rôles des fours :

Assurent le passage du métal de l'état solide à l'état liquide atteignant un température de 1500°C suivi d'une opération de décrassage et émission d'une médaille (échantillon) pour contrôle des pourcentage carbone ,silicium ,manganèse avant correction.

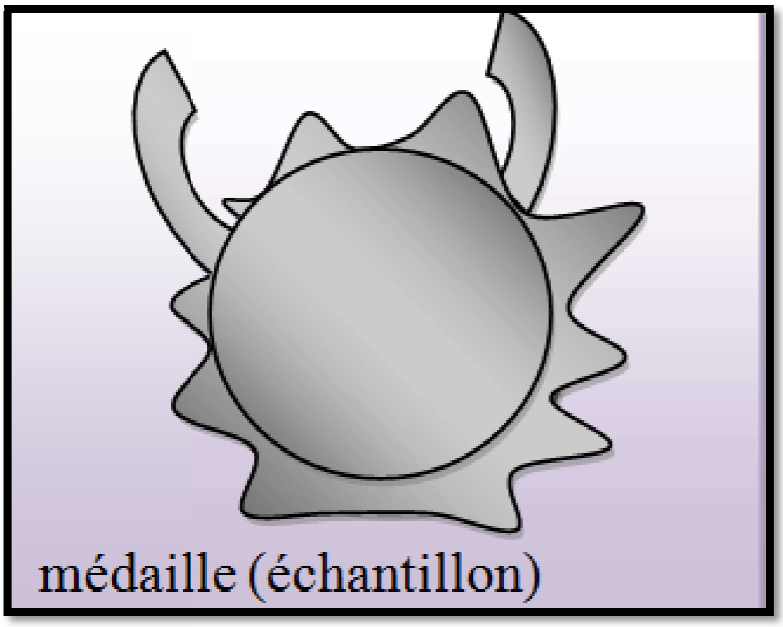


Figure 27 : Médaille qui a servi à l'étude.

Qui on la charge est fusionné et après le décrassage l'opérateur va prendre un médaille pour l'analyse, ces analyse permet de vitrifié les teneuses va prendre une médaille pour l'analyse fera à laboratoire on versera la charge liquide dans la poche de transvasement pour transporter au four à induction pour le maintien.

1-2-2-Le décrassage :

Lorsque la charge est fusionné on la décrasse avec l'agglomérons des crasses appelé le « cecatherm » il fonctionne dons la marge de température 1320°C-1520°C.

1-3-Laboratoire:

Mission:

C'est de contrôler la caractéristique physicochimique des métaux et lit de fusion soit pièces ou métal réceptionnés ou pièces moulés ainsi que d'analyse de sable.

1-3-1-Secteur chimique:

1-3-1-1-Les méthodes d'analyses:

A- Analyse automatique :

Dans le but de déterminer la composition chimique de la fonte élaborée, nous avons utilise deux appareils d'analyse.

●Analyse de carbone et de soufre :

C'est un analyse qui consiste à déterminer la teneur de carbone et du soufre dans notre échantillon à l'aide d'un appareil de marque **LECO** en premier lieu, on écrase une quantité de 0.5g de notre échantillon sous formes de poudre, cette dernière est soumis à un courant d'oxygène puis analyse par un détecteur à haute sensibilité qu'va déterminer le pourcentage de carbone et du soufre dans les gaz brûlés.

Les moyennes utilisent :

a-la balance.
b-LECO.
c-ordinateur.



Figure 28 : Photographie de l'ordinateur lié avec la balance et « LECO ».

●Analyse spectrométrique :

L'analyse spectrométrique de notre échantillon est réalisée sur un spectromètre de masse.

On irradie une surface d'un échantillon (médaille), le spectromètre mesuré simultanément l'intensité des éléments tel que le silicium, magnésium, manganèse, cuivre et phosphore.



Figure 29 : Prise de vue de l''analyse spectrométrique de nos échantillons.

Les moyennes utilisent :

-la machine de surfaçage.

-ordinateur

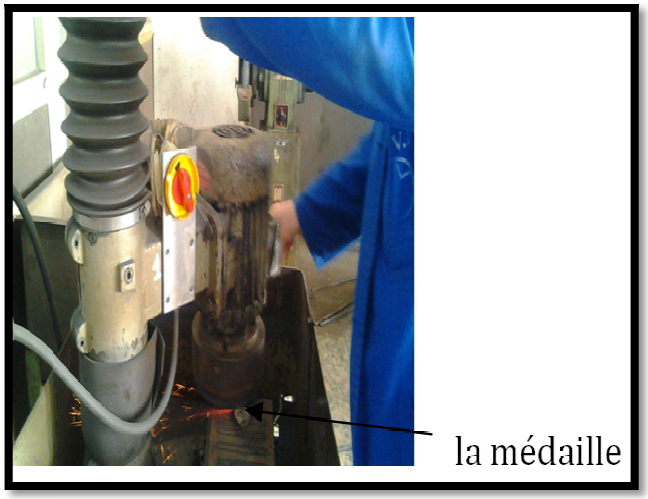


Figure 30 : La machine de surfaçage.

1-3-2-Examen microscopique :

1-3-2-1-Prélèvement de l'échantillon :

Il consiste à prendre un échantillon représentatif du matériau à étudier avec une forme géométrique préalable à l'aide d'une tronçonneuse.

1-3-2-2-Enrobage (à chaud ou à froid) :

Cette étape consiste à couvrir l'échantillon d'une couche de résine polymérisable pour deux raisons précises :
-Faciliter la manipulation de l'échantillon.
-S'assurer que le travail s'effectue toujours sur la même face.



Figure 31 : La couche de résine utilisée pour coulée nos éprouvettes.

Le principe opération pour voir meilleure microstructure à suivant :

A- la mule de coupe

B- polissage (papier abrasifs).

C-lubrifient.

D-microscope optique.



Figure 32 : Représenter la mule de coupe.

1-3-2-3- Le polissage :

Le polissage a pour but principale d'obtenir une surface plane de rugosité minimale, mais également l'éliminer les couches superficielles de l'échantillon dont la microstructure pourrait être invisible et ça à l'aide d'une polisseuse.



Figure 33 : Appareil de polissage a papiers abrasifs.

-Dressage :

Cette opération consiste à créer la surface plane à examiner .On a utilisé une meule puis un papier émeri rugueux (p80) .Durant cette opération, il est également nécessaire d'éviter l'échauffement de l'échantillon susceptible de provoquer des changements de phases dans la structure. Pour cela, il est impératif de refroidir l'échantillon pendant toute l'opération.

-pré polissage :

Le pré polissage effectué sur un polissage à deux disques. Il s'est déroulé comme suit :
Frotter la surface de l'échantillon sur des papiers spéciaux de polissage de granulométries différentes. Cette opération débute par le papier le plus rugueux et se termine par le plus fin.
Durant cette phase on a utilisé la gamme de papier allant de 120 à1200.
L'opération a duré jusqu'à 3 minute chaque papier en prenant l'évidence de tourner l'échantillon de 90° à chaque fois pour croiser les rayures et faciliter leur disparition.ces opérations successives nous ont permet d'obtenir sur le dernier papier un polissage « miroir » dont les rayures ne sont plus discernable à l'œil.

Polissage de finition :

Son objectif est d'obtenir une surface comparable à un miroir permettant ainsi de réfléchir la lumière. Pour se faire nous avons frotté nos échantillons sur un disque recouvert de feutre, polisseuse de finition, sur lequel on a déposé un abrasif ultra fin, on a utilisé l'alumine(Al2O3) en suspension dans l'eau. La granulométrie des particules d'alumine en suspension dépend de temps de décantation.

b-Attaque chimique :

Après le polissage de finition, les surfaces à analyser sont lavées puis séchées à l'aide d'un séchoir. Après lavage et séchage nous avons attaqués avec un réactif qui est le « Nital à 4% » .Sa composition chimique est donnée par le tableau ci-dessous. L'attaque a été chronométrie, elle est de l'ordre de 10s.

Tableau 8 : Composition chimique du Nital de l'attaque chimique ver l'échantillon.

Acide Nitrique(HNO3)	Alcool (CH 3CH2OH)
4%	96%

NB.L'attaque est faite juste pour observer les matrices de nos échantillons .car le graphite on peut le voir même sans attaque.

Les échantillons sont lavés à l'eau et séché à l'aide comprimé la figure suivant donne les échantillons après le polissage.



Figure 34: Les échantillons produisant après le polissage.

.

1-3-2- 4- La microscope optique:

Le microscope optique métallographique permet d'examinent par réflexion les surfaces métalliques, le microscope utilisé c'est de la marque "Matrox inspector" constitué de différents éléments:

-une source de rayonnement lumineux et un dispositif d'éclairage de l'échantillon.

-l'objectif, essentiellement constitue par un ensemble de petites lentille, de très courte distance focale, il donne de l'échantillon placé très de foyer, une image réelle agrandie l'objectif permet de voir déférent grossissement (*50,*100,*200,*500,*1000).

-l'oculaire est formé de deux lentille convergentes, il fonctionne comme une loupe et donne de l'image réelle fournie par l'objectif une image virtuelle agrandie.

-un ordinateur permettant l'observation ou l'enregistrement de l'image.



Figure 35 : Le microscope optique lié avec l'ordinateur pour obtenir l'observation microstructure.

2- Four à Induction:

Les fours à induction a creuset se composent essentiellement d'une bobine inductrice entourant un creuset dans lequel se trouve la masse métallique a fond.

A- Les composantes du four à induction :

1. Les fours sont dotés d'un dispositif permettant le basculement du creuset à l'aide de vérins hydrauliques.
2. L'inducteur est façonné en hélice à spires non jointives et isolées électriquement les unes des autres. Dans cette hélice circule l'eau de refroidissement.
3. Pour réduire les fuites magnétiques, on dispose à l'extérieur de la bobine des tôles feuilletées au silicium.
4. Les fréquences les plus souvent utilisées sont varient entre 100 et 1000 Hz
5. L'interaction du champ magnétique et des courants électriques crée des forces qui s'exercent de l'extérieur vers l'intérieur du creuset. Il en résulte une tendance à la striction se traduisant par une surélévation du bain autour de l'axe vertical du creuset.

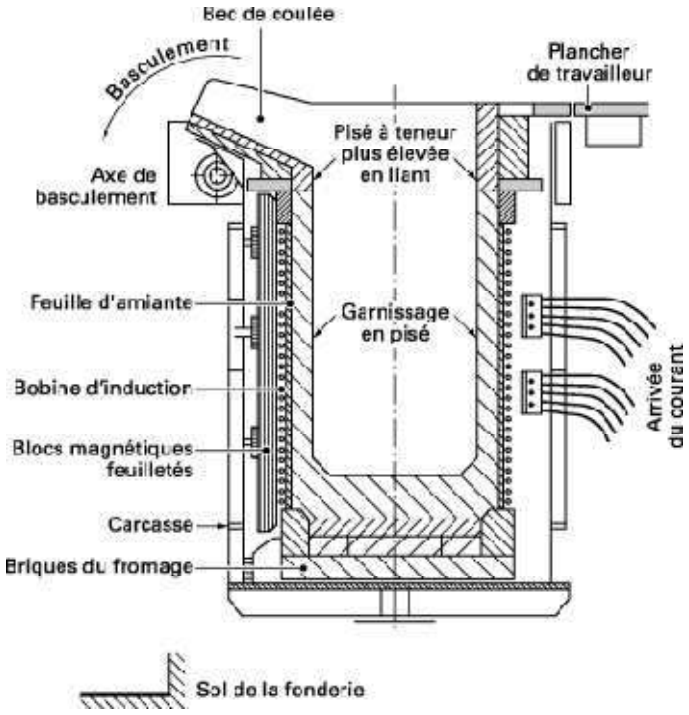


Figure 36 : Représentation de four électrique à induction.



Figure 37: Le four à induction utilisé au cours de notre étude.

2-1-Poches de transvasement :

Se sont deux poche de 10T qui assurent la transvasions du métal liquide du four a arc vers les fours de maintint, la 1ère est opérationnelle la 2ème est considérée comme poche de secoure.

Permettre d'effectuer l'opération de décrassage et transvasement du métal liquide avec les ponts roulant vers les fours de maintiens (A-B-C).



Figure 38: La poche de transvasement.

2-2-La correction dans un four à induction :

2-2-1-Les ferroalliages utilisés :

a- le Ferro- silicium (Fe – Si) :

Alliage riche en Si, cet alliage libère le Si dans le bain :

* par son grand pouvoir réducteur **accapare** l'oxygène des oxydes métalliques qui proviennent :

- de la rouille des charges ;
- de l'oxydation du bain à son brassage au contact de l'air.

* réajuste le titre en silicium.

b- le Ferro- manganèse (Fe – Mn) : riche en Mn :

Le manganèse libéré dans le bain joue un double rôle :
-réajuste le titre en Mn du bain à la valeur souhaitée et conférer de résistance, sans élever de trop le titre en carbone.
-Désulfurer le bain, surtout dans le cas des fontes grises.
Le sulfure de manganèse passe en très grande partie dans la scorie à la surface du bain, d'où il peut être éliminé par décrassage.

c- le graphite :

Il sert à ajuster le titre en carbone de l'alliage**.**

Dans le cas d'élaboration des fontes GS, le graphite introduit doit être particulièrement pur et exempte de soufre.



Figure 39 : Les ferroalliages utilisés pour la correction
(1 le graphite **,**2 le Ferro- manganèse ,3le Ferro- silicium).

2-3-Poche de traitement et distribution *:*

Assurer le traitement de la fonte GS par la forme creuse (sandwich) comportant 20 kg Fe Si Mg et couverture des tôles d'acier à 20 kg permettant d'assurer la transformation de la fonte de base GL à graphite lamellaire en fonte GS a graphite sphéroïdale.
Elle assure le transport du métal traité vers les zones de coulées.

2-3-1-Méthode sandwich :

C'est la méthode utilisé dans la fonderie de Rouïba.

La poche de traitement à une cavité dans le fond (exalier) dans cet exalier on met d'abord l'alliage au Mg, par-dessus on couvre avec le Fe-si.
La réaction doit débuter le plus tard possible pour que le Mg traverse la plus grande quantité possible de fonte, c'est pourquoi la poche doit être remplie le plus protège l'alliage au Mg pendant les premières seconde, c'est pourquoi la vitesse de remplissage est aussi importante.
La température est très importante tant pour traiter que pour couler :
-pour traiter le métal : 1500°maxi.
-pour couler le métal : 1390°-1420°.

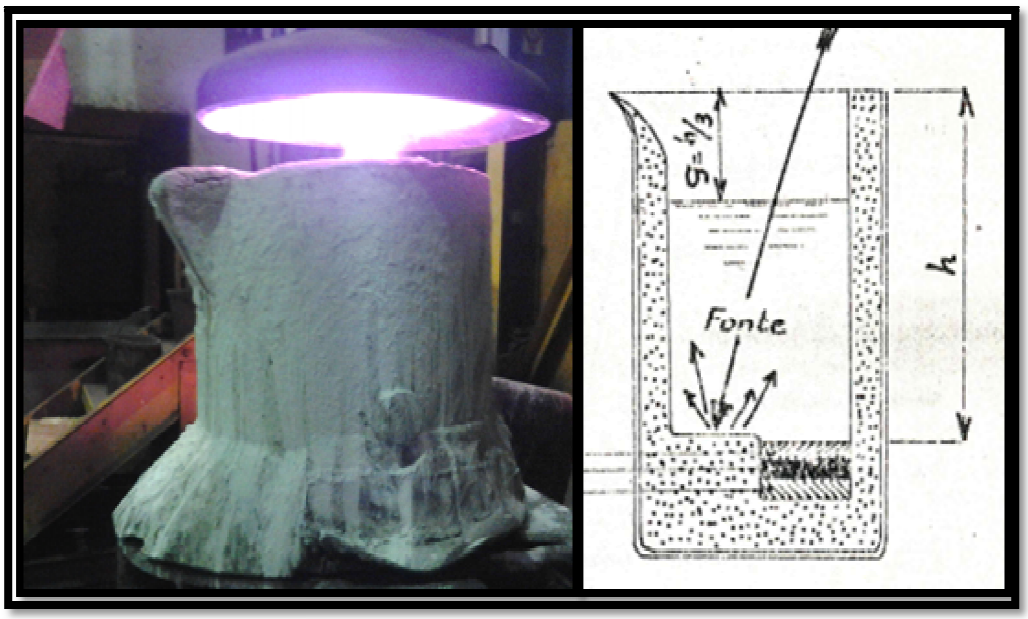


Figure 40: La poche de traitement (procède Sandwich).

2-4-Poches de coulée :

Il existe quatre poches de coulées. Au niveau des chaines 1 et 2 pour la moyenne production, on a deux poches de 500kg, et deux autres poches de 1t (1000kg) au niveau des chaines 3 et 4 pour les grandes séries.la figure 41 représente la poche de coulée de 500Kg et la figure 42 la vérification ou le control de la température



Figure 41: La poche de coulée.



Figure 42 : Le contrôle de température dans la poche de coulée.

II-Les composition et les propriétés des fontes étudiées:

1-Propriétés de la fonte à graphite lamellaire FT25 :

La norme NF A32-101 donne une fourchette de composition chimique, minéralogique, les propriétés mécaniques et la température de fusion pour la fonte à graphite lamellaire FT25 comme indique les tableaux 9 ,10 et 11.

Tableau 9: Les compositions chimiques données par la norme NF A 32-101 de la fonte FT25.

Nuance	C %	Si%	Mn%	S%	P%	Cu%
(FGL) FT25	3,16-3, 36	1,60-1,90	0,60-0,90	≤0,10	≤0,15	Tambour 0,5 à 0,8

Tableau 10: Représentations des caractéristiques mécaniques de la fonte FT25 d'âpres la direction de fonderie de Rouïba.

Nuance	T.TH	Graphite	Matrice	Dureté 3000/10/30	Rm N/mm^2	KCU J/cm^2	A%
(FGL) FT25	Sans	I-A-3-7 Bet qq.Eadmis	Perlite ferrite≤5% cémentite≤ 5%	187HB 260HB	≥250	---	---

Tableau 11:la température de fusion de la fonte FT25.

T° de décrassage	T° de transvasement	T° de picage	T° de coulee
1400 C°	1480 – 1530 C°	1530 C°	1380-1410 C°

2-Propriétés de la fonte à graphite sphéroïdal (GSA) FGS56-5:

La norme NF A32-101 donne une fourchette de composition chimique, minéralogique, les propriétés mécaniques et la température de fusion pour la fonte à graphite sphéroïdal (GSA) FGS56-5comme indique les Tableaux 12 ,13 et 14.

Tableau 12: Les compositions chimiques de (GSA) FGS56-5 du la fourchette utilise à la fondre de Rouïba.

Nuance	%C	Si%	Mn%	S%	Cu%	P%
(GSA)FGS56-5	3.5-4	2.5-2.8	0.45-0.90	≤0.02	≤0.2	≤0.06

Tableau 13 les caractéristiques mécaniques de la fonte gris à graphite sphéroïdale (GSA) FGS56-5.

Nuance	T .TH	Graphite	Matrice	Dureté 3000/10/30	Rm N/mm2	KCU j/cm2	A%
(GSA)FGS56-5	Trempe et revenu	VI>90% 5-7	Sorbito-ferritique (martensite de revenu)	190HB 270HB	≥ 560	≥6	≥5

Tableau 14: Température de fusion de la fonte grise à graphite sphéroïdale (GSA) FGS56-5.

T° de décrassage	T° de transvasement	T° de picage	T° de coulé
1400C°	1480-1530 C°	1530 C°	1385-1415 C°

III- Elaboration de la fonte étudiée:

1-Procédés de fabrication des éprouvettes :

L'étude de l'influence des éléments d'addition est réalisée par une comparaison entre des éprouvettes élaborées à partir de fonte inoculée par ces addition et des éprouvettes préparées à partir da fonte de base (FT25) ce dernier est obtenue à partir des cubilots de fonderie de Rouïba est composé de lit de fusion (Retour de fonderie 60% ,Hématite 20% , Tôles en acier 20%) .

La préparation de moules pour les éprouvettes est effectué par deux procédés (procédés à froid et à chaud).

1-1-élaboration des kils bloc :

Ces barreaux sont préparés comme suit :

Longueur L : 200 mm ;
Diamètres D : 28 mm.

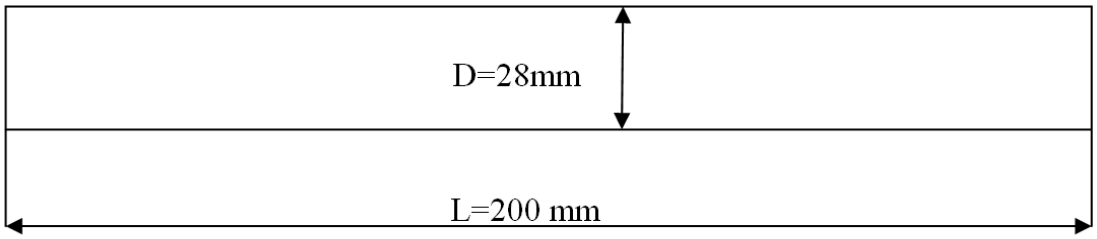


Figure 43 : Dessin simplifie pour les barreaux de la fonte(GSA) FGS56-5.

1-2-Elaboration de moule de kils bloc :

Dans ce procédé la réalisation des moules s'effectue à travers une boite a noyau assuré la forme des barreaux sont préparés comme suit :
- Nous avons d'abord préparés les moules kils bloc (voir la figure **44**) .ces moules sont constitués de deux parties : inférieure et supérieure.

La partie inférieure est obtenue à l'aide d'un modèle en bois rempli d'un mélange (procède à froid), la matière constituant de moule contient la composition suivant :

- 75% de sable extra-Siliceux ;
- 8% de Silicate de soude ;
- 13% d'argile ;
- 4% De noir minéral ;
- CO2 pour le durcissement.

Ce procédé est dit à froid car le mélange est durci sous l'action du gaz carbonique. Quant à la partie supérieure, c'est un noyau qui est obtenu par le procédé à chaud .Les deux parties sont ensuite rassemblées à l'aide d'une colle à froid.

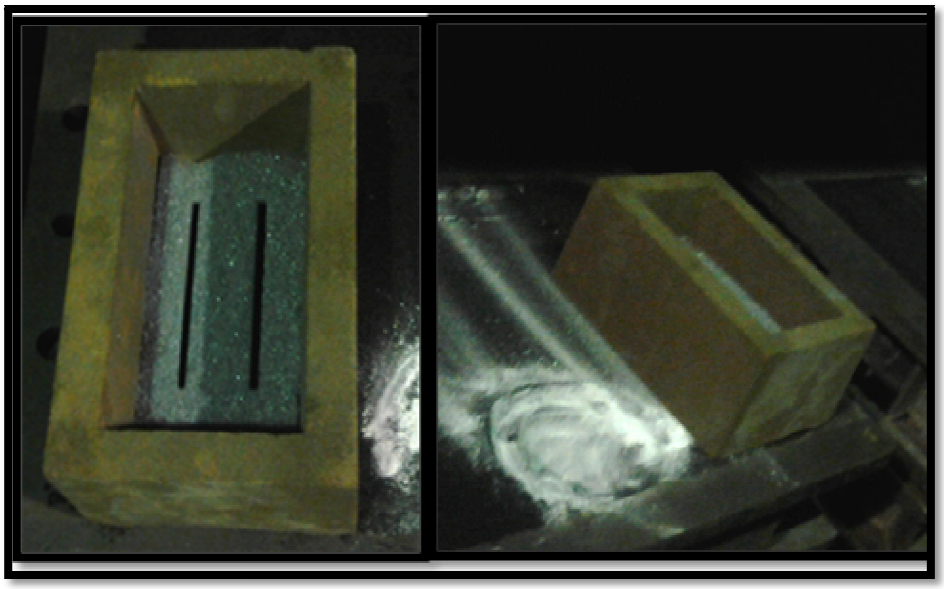


Figure 44 : Le moule en sable silice pour coulée les kils bloc de fonte utilisé avec le noyau.



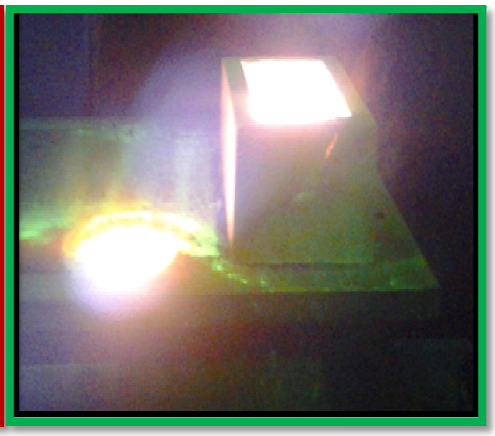


Figure 45 : Le début de coulée les kils bloc. **Figure 46 :** La fin de coulée les kils bloc.



Figure 47 : Les barreaux finis des fontes étudiées.

2-Secteur métallurgies:

Consiste à l'observation de microscope optique et les essais mécaniques (la dureté, traction, …).

A- La dureté:

La dureté à été définie par un autre matériel plus dur, la mesure est faite auprès de la dimension de l'empreinte laissée (surface ou profondeur) après que la force d'essai ait cessé. Cette méthode ne permet d'affiner les caractéristiques mécaniques des différents types de matériaux.

-Dureté brinell:

L'essai brinell utilise comme poinçon un bille en acier trempé ou en carbure de tungstène de 10mm de diamètre (D).la pression est maintenue pendant 15 à 30 s selon le métal et en

F=charge d'essai (fonction du matériau) de 500 à 3000 daN.

D=diamètre de la bille (5 ou10mm)

d=diamètre de l'empreinte en mm.

La charge est appliquée progressivement pendant 15 secondes et maintenue à sa valeur finale pendant 15secondes l'essai BRINELL est très peu utilisé en odontologie.



Figure 48 : Machine utilisée pour l'essai de dureté HB d'âpres le Direction de Fonderie de Rouïba.

B-Essais de traction :

L'essai de traction est pratiqué sur des éprouvettes de traction usinées, et cela dans le but de déterminer certaines propriétés mécaniques de notre fonte. D âpres la machine de traction utilisée au cours de notre étude de la marque « FHIMADZU », et de force maximale 300KN.
Cet essai consiste à soumettre une éprouvette (Figure 50) à un effort de traction jusqu'à la rupture
.

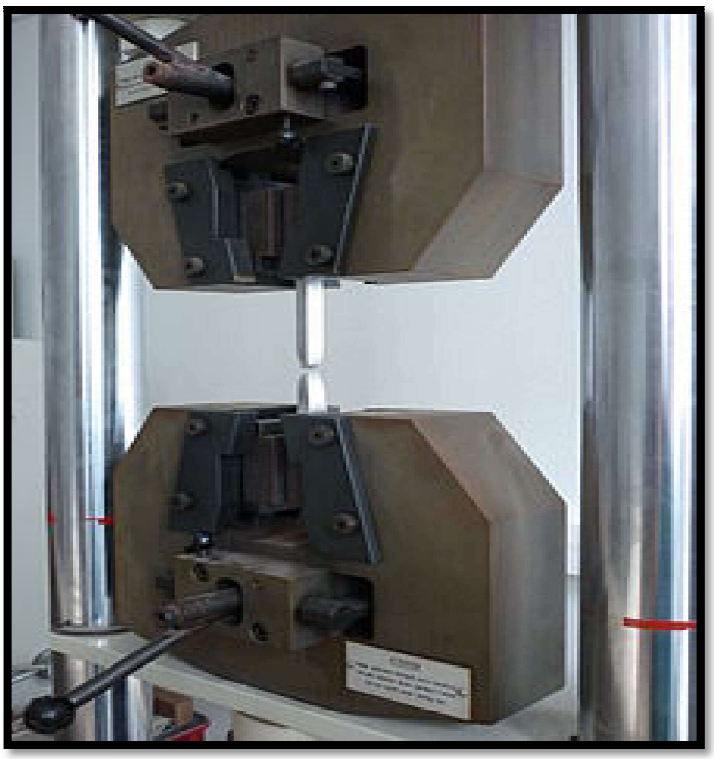


Figure 49 : La machine de traction.

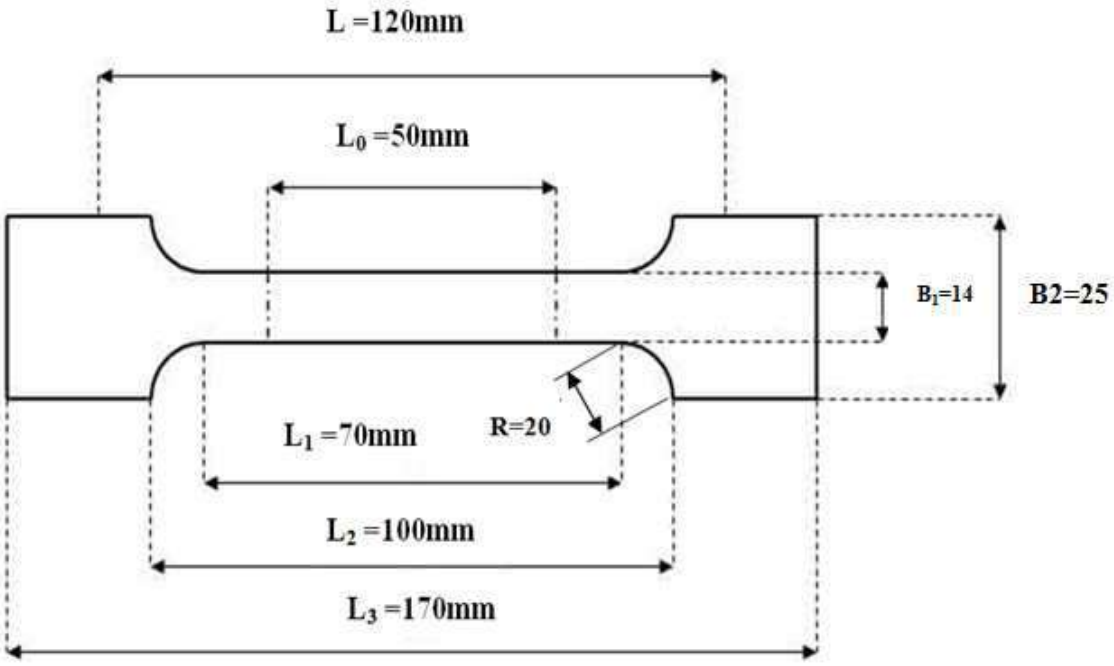


Figure 50: Schéma simple de l'éprouvette de traction qui a servi à l'étude avec leur dimension.

- L_0 = Longueur de référence ;
- L = Ecartement entre outillages ;
- L_1 = Longueur de la partie calibrée étroite ;
- L_2 = Ecartement entre les parties parallèles larges ;
- L_3 = Longueur totale ;
- B_2 = Largeur dans la zone d'épaulement ;
- B_1 = Largeur dans la zone de la longueur de référence.

IV-Conclusion :

Nous avons abordé dans ce chapitre présente les différent aspects des fours utilisent, ce qui peut être due à la technique d'élaboration qui joue un rôle considérable sur le produit fini.

RESULTATS ET DISCUSSIONS :

Introduction :

Ce chapitre présente les nuances de fonte G.S.et de fonte G.L étudiées au cours de ce travail. Nous indiquons tout d'abord les compositions chimiques des matériaux ainsi que la géométrie des pièces utilisées. Nous détaillons ensuite les traitements thermiques appliqués sur les matériaux utilisés. Et les principales caractéristiques des microstructures ainsi obtenues sont présentées, pour finir, les propriétés mécaniques déterminées par l'intermédiaire d'essais de traction
et de dureté.

Ce chapitre décrit les méthodes et les protocoles employées dans l'expérimentale et toutes les étapes de préparation et d'exécution des tests seront décrites.

Avec les résultats et leurs discussions aussi la partie la plus importante.

Ces procédures sont de l'ordre suivant :

- Analyse chimique ;

-Examen métallographiques ;

-Examen mécanique.

Patrie I : résultats et discussion de la fonte FT25 :

I-1-Analyse chimique :

Les analyse chimique par fluorescence sont effectuées sur une médaille prélevée de four de maintien, les résultats de la composition normalisée selon la norme NF A 32-101 pour le tambour de frein portés sur le tableau 15 tandis que le tableau 16 donne les résultats d'analyse de fonte étude.

Tableau 15: Les compositions chimiques de médaille d'analyse de tambour de frein de la fonte (FGL) FT25 donne par la norme NF A 32-101.

Nuance	C %	Mn%	Si%	Cu%
(FGL) FT25	3,16-3, 36	0,60-0,90	1,60-1,90	≤ 1,00

Tableau 16: Les compositions chimiques de médaille d'analyse de la fonte (FGL) FT25 donne par la norme NF A 32-101.

Nuance	C%	Mn%	Si%	Cu%
(FGL) FT25	3.36%	0.7%	1.8%	0.013%

I-2- Examen métallographiques :

I-1-1- Détermination de la structure :

Pour étudier l'influence des éléments chimique (C, Mn, Si, Cu) sur la fonte grise à graphite lamellaire, nous avons découpé un échantillon dans chaque barreau élaboré à l'aide d'une tronçonneuse avec l'injection de l'eau pour éviter l'échauffement des échantillons et le changement des propriétés structurelles, la figure (51) représente l'éprouvettes pour l'observation de la structure et pour faire l'essai de dureté en suit la figure (52) représente l'éprouvette pour l'essai de traction.

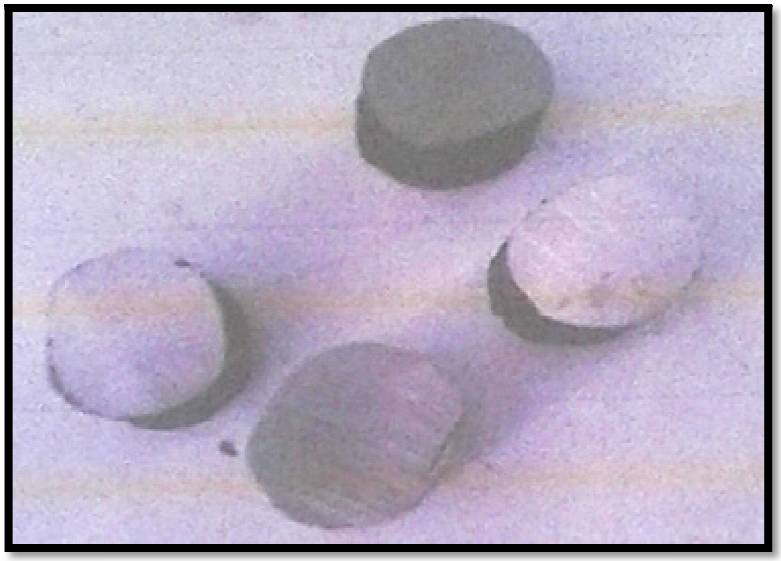


Figure 51 : Le découpage de l'échantillon pour l'étude métallographique et la dureté.



Figure 52 : L'éprouvette de traction utilisée pour nos essais.

I-1-1- Observation micrographique :

Les surfaces préparées auparavant sont ensuite observées à l'aide d'un microscope optique. Ces observations permettent d'évaluer qualitativement l'état de la microstructure différente échantillons.

Pour chaque échantillon observé on a pris des photos de différents grossissements. Pour ces observations et les prises de photos nous avons utilisé un microscope métallographique.

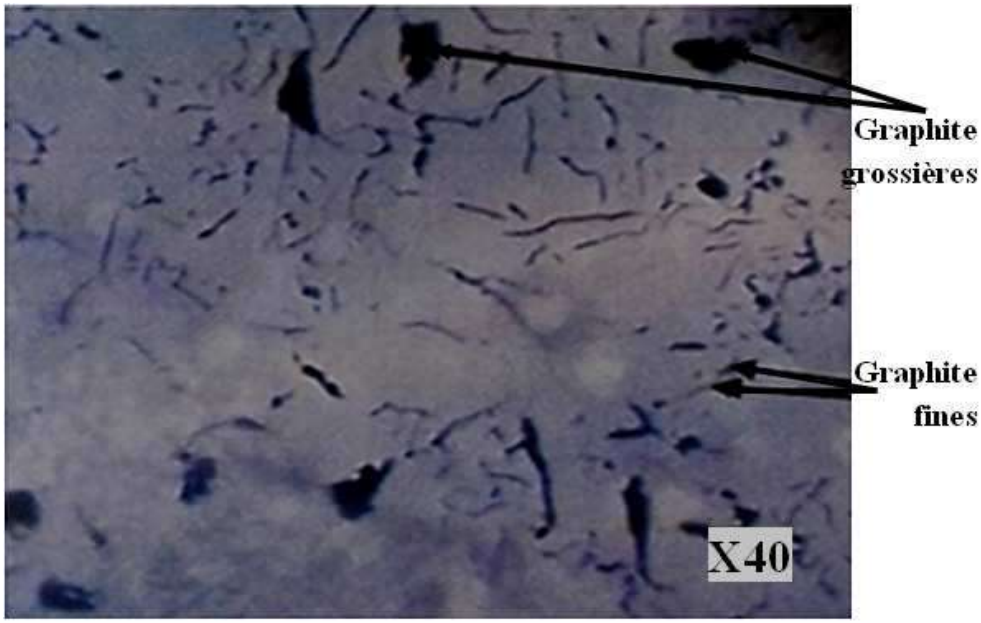


Figure 53 : La microstructure de l'échantillon sans attaque (fonte de base).

Les figures 53 représente des clichées micrographique sur dès l'échantillon prélevée à partir des barreaux élaborés dans les mêmes conditions que tambour de frein, avec des grossissements 40 fois respectivement, ces images montrent des lamelles de graphite grossier et un peu des lamelles fines uniformément réparties.

a-Micrographie de l'échantillon attaqué prés dans les barreaux élaborés :

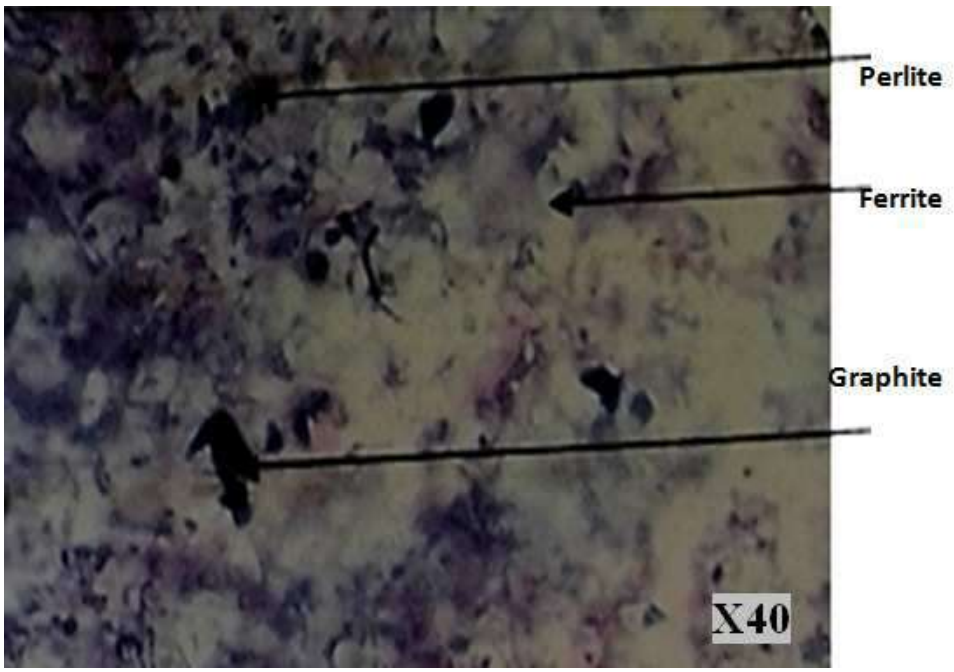


Figure 54 : Observation de la microstructure de l'échantillon attaqué (fonte de base).

La figure 54 représente la micrographie de l'échantillon attaqué par le produit chimique, prélevées d'un barreau élaboré avec les mêmes conditions que le tambour de frein. La couleur blanche représente la phase ferritique, la figure 54 montre qu'elle est uniformément repartie sur les côtés d'une phase de couleur sombre, c'est la perlitique. En remarque que la phase ferritique est plus abondante que la phase perlitique.

b-Micrographie de l'échantillon attaqué à 3% et 4% carbone :

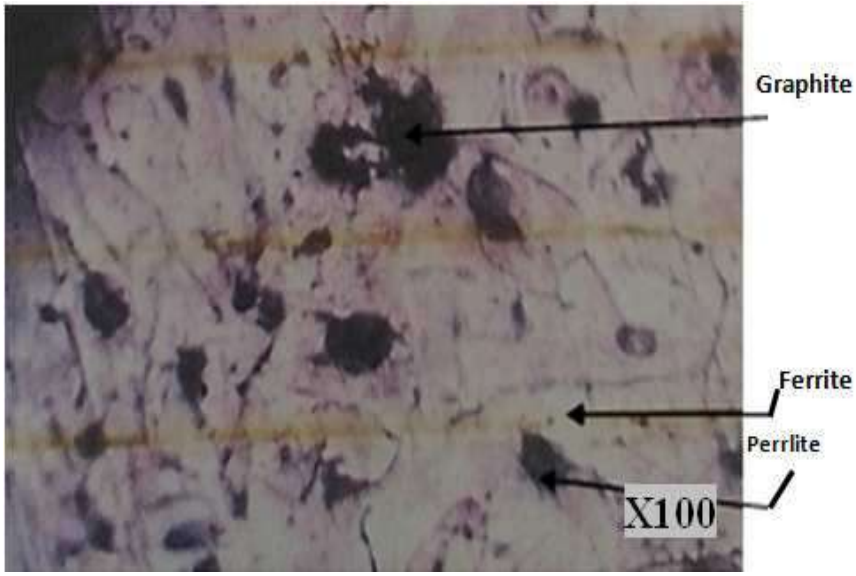


Figure 55 : La micrographique de l'échantillon attaqué à 3% de carbone.



Figure 56 : Observation de la microstructure de l'échantillon attaqué à 4% de carbone.

La figure 55et 56 représente la micrographie des échantillons préparés à partir des barreaux élaborés respectivement à 3%et 4% de carbone (avec inoculation de l'acier à la fonte base), On remarque que le pourcentage de graphite dans la fonte est augmenté, ce qui explique par la nature graphitique de carbone.

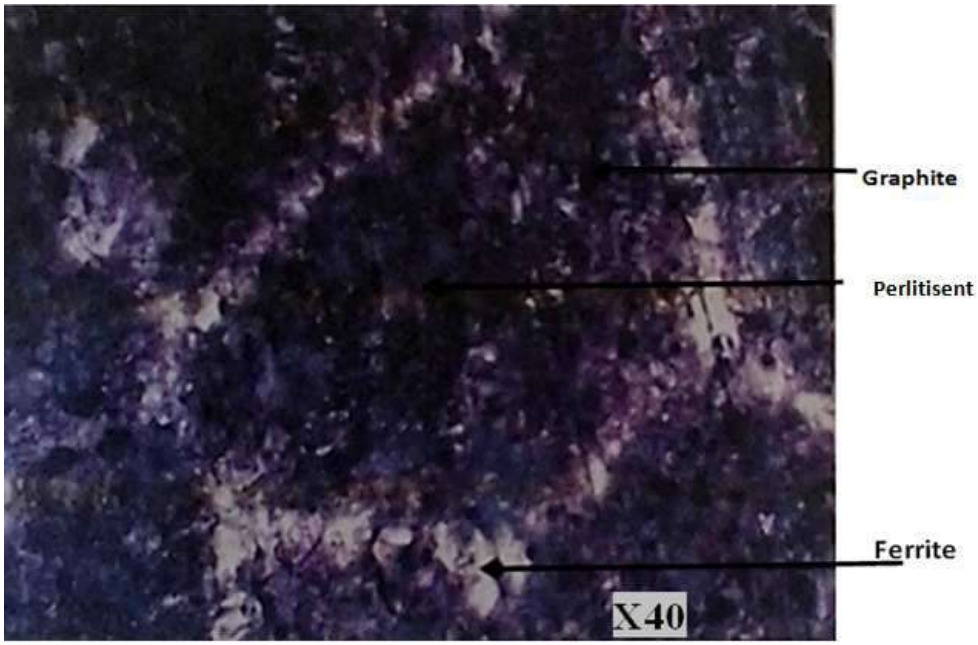


Figure 57 : Photographique de l'échantillon attaqué à 1% de manganèse.

Le manganèse est un élément perlitisant à teneur très élevée et carburigène, il favorise la formation de perlite, pour cette raison, la figure 57 qui représente la micrographie de l'échantillon pris dans le barreau élaboré à 1% de Mn (avec inoculation de ferromanganèse) représente des surfaces dominante de perlitisant.

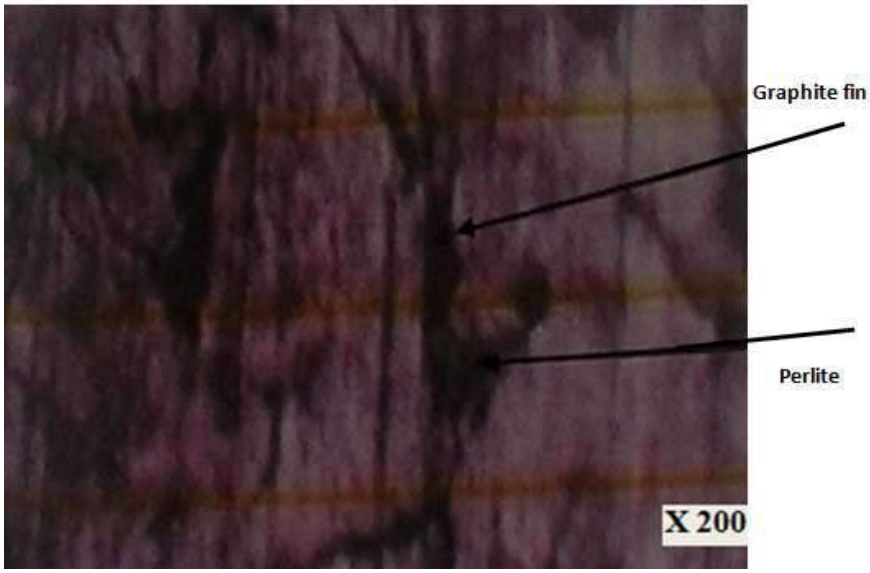


Figure 58 : La micrographique de l'échantillon attaqué à 1, 3% de Silicium.



Figure 59 : Microstructure de l'échantillon attaqué à 2,2% de Silicium.

La figure 58 représente la micrographie de l'échantillon pris dans le barreau élaboré à 1,3% de Si (avec inoculation de l'acier), la figure 59 représente la micrographie de l'échantillon pris dans le barreau élaboré à 2,2% de Si (avec inoculation de Ferro-silicium).

La figure 58 montre la présence de la perlite sans carbure et à graphite fin, avec augmentation de Si on aura une structure ferritique et de graphite comme la figure 59.

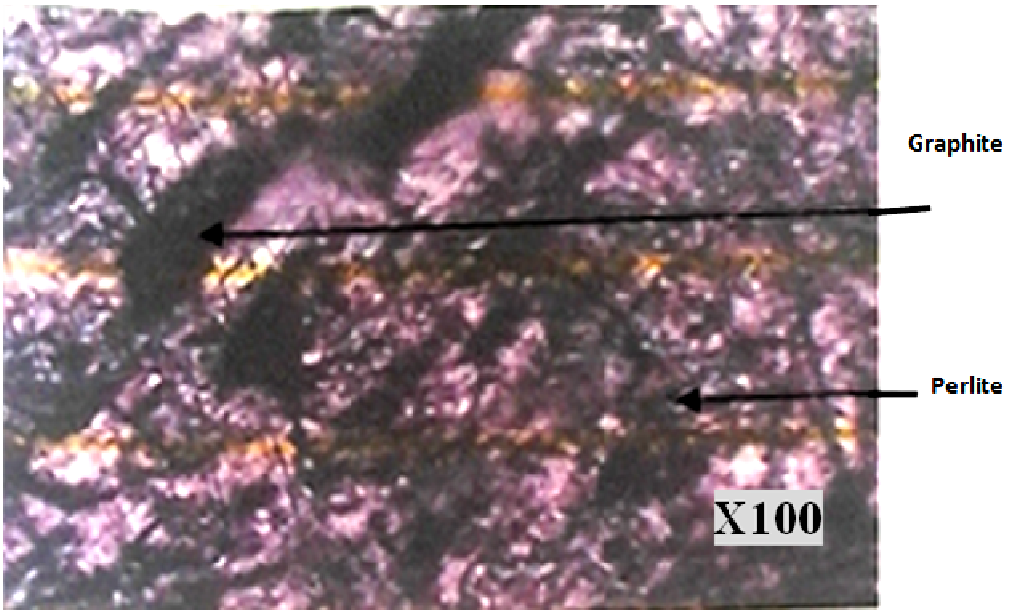


Figure 60: Photographique de l'échantillon attaqué à 0, 3% de Cuivre

.

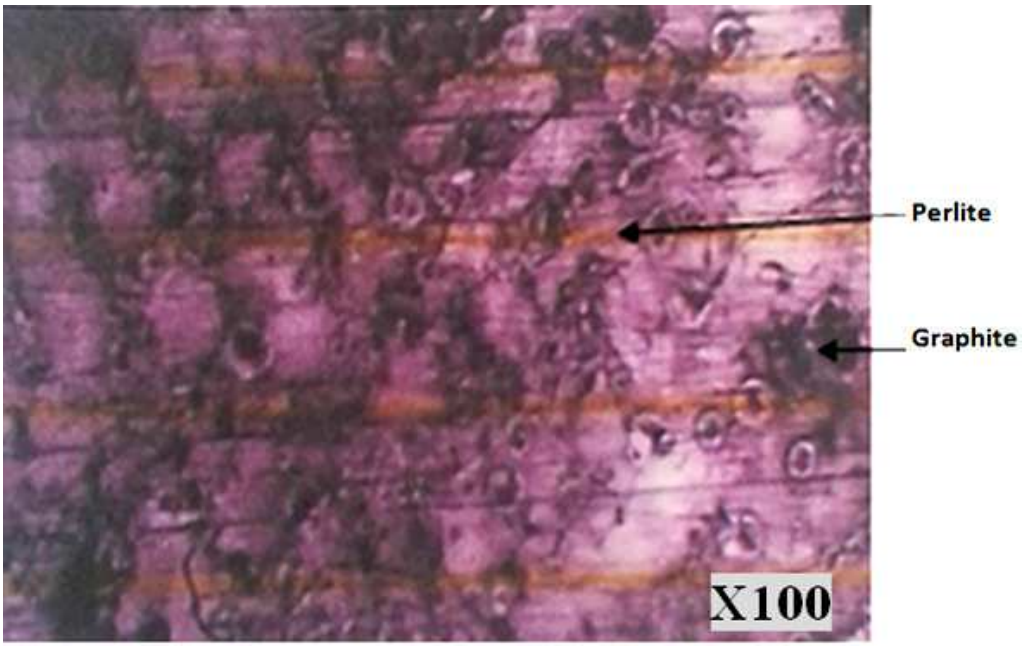


Figure 61: Observation de la microstructure de l'échantillon attaqué à 1% de cuivre.

La figure 60 représente une observation micrographique d'un échantillon dopé de 0,3 % Cu (avec inoculation de cuivre), La figure 61 représente micrographie de dopé par 1% de Cu.

Les échantillons obtenir par inoculation de cuivre présente matrice dominante de la perlite et légèrement une structure graphitant.

I-2- Examen mécanique :

I-2-1-Essai de dureté :

La dureté correspondant un échantillon de fonte de base est présenté dans le tableau suivant :

Tableau 17: Présentent les résultats de dureté HB de fonte de base utilisée comme référence.

Les échantillons	01	02	03
Dureté HB	173,71	166,6	173,71
Moyen	171,36		

La dureté Brinell varie d'un coin à l'autre comme indique le tableau 11 .la valeur moyenne est faible par rapport à l'exigence A32-101 qui donne une dureté allant de 187 – 260 HB, malgré que la composition chimique est rentre dans la fourchette normalisée.

I-2-2-Influence des éléments d'addition sur dureté :

La modification des teneurs des différents constituants s'effectue à partir de la fonte de base analysée précédemment, par l'ajout de l'élément carbone, cuivre, silicium et manganèse dans la poche de coulée.

● **Pour le carbone** : on a fait deux variations à 3% et à 4%

Calcul de la quantité d'élément inoculé

$$\frac{(\text{Quantité de la médaille} - \text{quantité prévue}}{\text{Rendement}} \text{ x } 10^{4} = \frac{(3{,}36-3)}{100} \text{ x } 10^{4} = 36 \text{ g (acier)}$$

$$\frac{(\text{Quantité prévue} - \text{quantité de la médaill}}{\text{Rendement}} \times 10^4 = \frac{(4\% - 3{,}36\%)}{100} \times 10^4$$

$= 69{,}56\ g_{(\text{graphite})}$

Composition de la fonte	N° d'échantillon	Dureté HB	Valeur moyenne De la dureté HB
Fonte base 3,36% de carbone	1	173,17	171,36
	2	166,6	
	3	173,17	
3% Carbone	1	166,66	170,26
	2	153,06	
	3	191,08	
4% Carbone	1	182,90	192,64
	2	192,30	
	3	202,70	

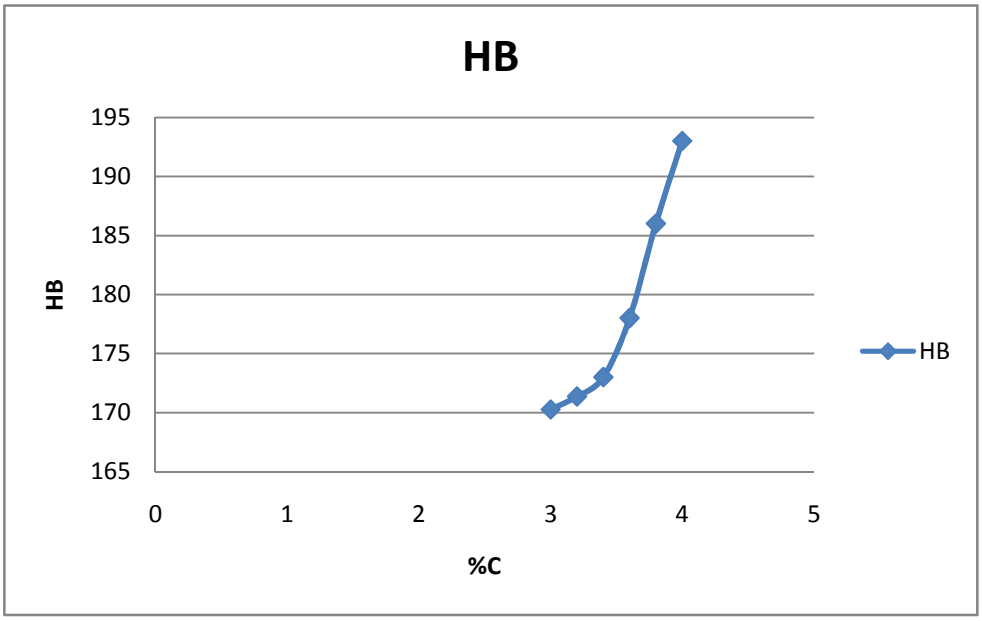


Figure 62: Evolution de la dureté en fonction du taux de carbone.

Cette figure représente l'évolution de la dureté en fonction du taux de carbone d'après la courbe représente dans la (figure 62), la dureté augmente progressivement avec l'ajout de carbone jusqu'à à concurrence de 3%.À partir

de cette valeur la dureté augmente momentanément à partir de la teneur 3,38 % la relation entre la dureté et teneure de carbone est linéaire.

● **Pour le cuivre** : on a fait deux variations à 0,3% et à 1%

$$\frac{(\text{Quantité prévue} - \text{Quantité de la médaille}}{\text{Rendement}} \times 10^4 = \frac{(0,3-0,013)}{63,54} \times 10^4 = 54,16 \text{ g}$$

(cuivre)

$$\frac{(\text{Quantité prévue} - \text{Quantité de la médaille}}{\text{Rendement}} = \frac{(1-0,013)}{63,54} \times 10^4 = 155,33 \text{ g}$$ (cuivre)

Composition de la fonte	N° d'échantillon	Dureté HB	Valeur moyenne De la dureté HB
Fonte base 0,013% de cuivre	1	173,71	171,36
	2	166,6	
	3	173,71	
Fonte base plus 0, 3% de cuivre	1	254,32	209,97
	2	183,10	
	3	192,30	
Fonte base plus 0, 6% de cuivre	1	255,23	216,40
	2	194,23	
	3	197,30	
Fonte base 1% de cuivre	1	215,63	223,96
	2	222,58	
	3	230,99	

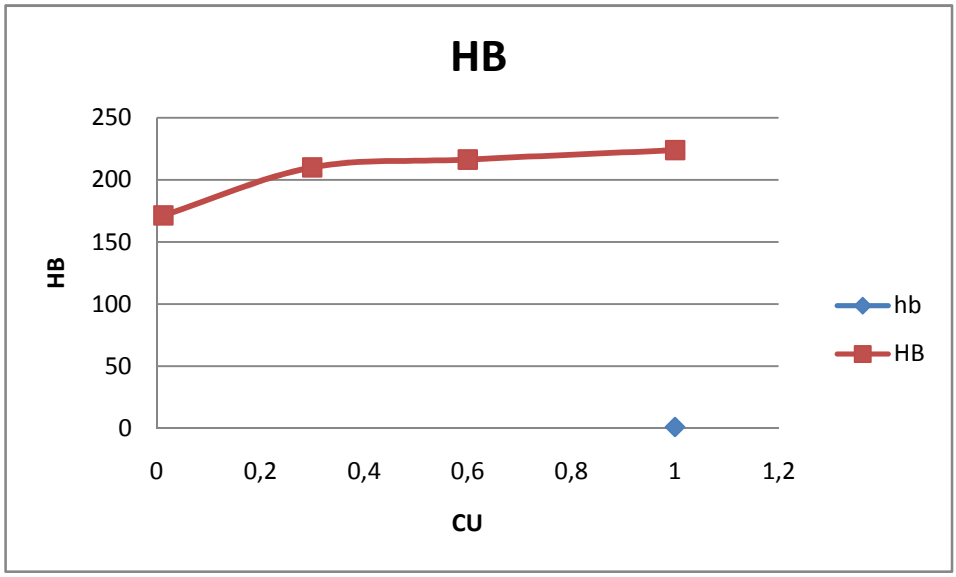


Figure 63: Evolution de la dureté en fonction du taux de cuivre.

Cette figure montre que la dureté est progressivement avec l'ajout de cuivre. Ce minerais stabilise la perlite et améliore les caractéristiques mécaniques et la résistance à l'usure.

● **Pour le Silicium** : on a fait deux variations à 1,3% et à 2,2%

$$\frac{(\text{Quantité de la médaille} - \text{quantité prévue}}{\text{Rendement}} \times 10^4 = \frac{(1{,}88-1{,}3)}{100} \times 10^4 = 58\text{g} \text{ (acier)}$$

$$\frac{(\text{Quantité prévue} - \text{Quantité de la médaille}}{\text{Rendement}} \times 10^4 = \frac{(2{,}2-1{,}88)}{100} \times 10^4 = 42{,}66\text{ g} \text{ (Fe-Si)}$$

Composition de la fonte	N° d'échantillon	Dureté HB	Valeur moyenne De la dureté HB
Fonte base 1,88 % de Silicium	1	173,71	171,36
	2	166,6	
	3	173,71	
1,3% de Silicium	1	282,92	182,80
	2	174,41	
	3	191,08	
2,2 % de Silicium	1	168,20	166,73
	2	167,64	
	3	164,52	

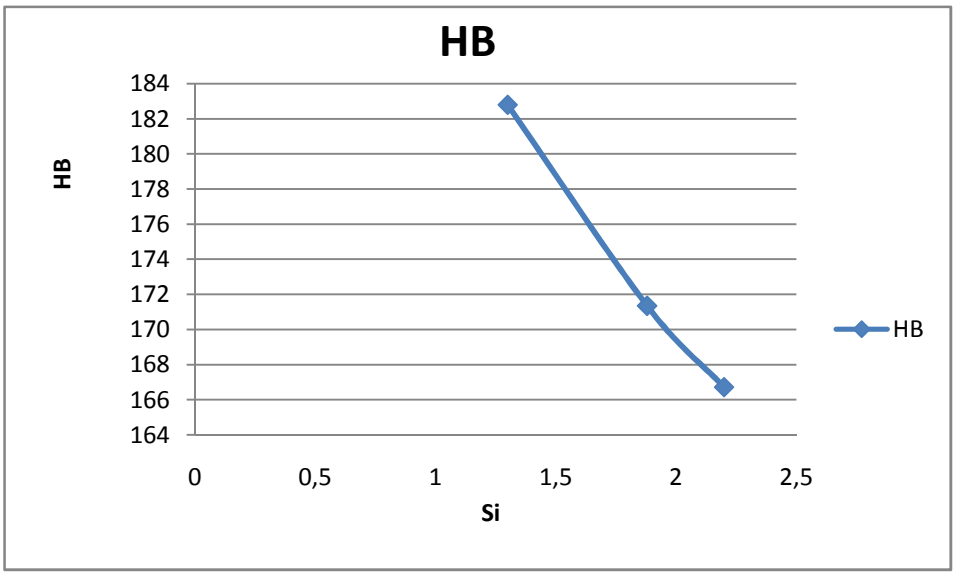


Figure 64: Evolution de la dureté en fonction du taux de silicium.

L'évolution de la dureté représentée par la figure(64) est très sensible vis-à-vis la teneur de silicium jusqu'à concurrence de 1,88%.à partir de cette valeur la dureté démineur momentanément. Le silicium est un graphitassent puissant, il favorise la formation de graphite et empêche la formation de la cémentite. Ilse dissout dans la ferrite (élément alphagéne).

Il joue un rôle fondamental en métallurgie des fontes car, il oriente la solidification des alliages Fe-C-Si vers le système stable (graphite+ferrite).

● **Pour le manganèse** : on a fait deux variations à 0,4% et à 1%

$$\frac{(\text{Quantité de la médaille} - \text{quantité prévue}}{\text{Rendement}} \text{ x } 10^{4=} \frac{(0,7-0,4)}{80} \text{ x } 10^{4=} \text{ } 37,5 \text{ g (fonte neuve)}$$

$$\frac{(\text{Quantité prévue} - \text{quantité de la médaill}}{\text{Rendement}} \text{ x } 10^{4=} \frac{(1-0,7)}{80} \text{ x } 10^{4=} \text{ } 25\text{g(FeMn)}$$

Composition de la fonte	N° d'échantillon	Dureté HB	Valeur moyenne De la dureté HB
Fonte base 0,7 % de Manganèse	1	173,71	171,36
	2	166,6	
	3	173,71	
0,4 % de Manganèse	1	162,11	163,14
	2	164,32	
	3	163	
1 % de Manganèse	1	182,30	187,97
	2	194,70	
	3	185,92	

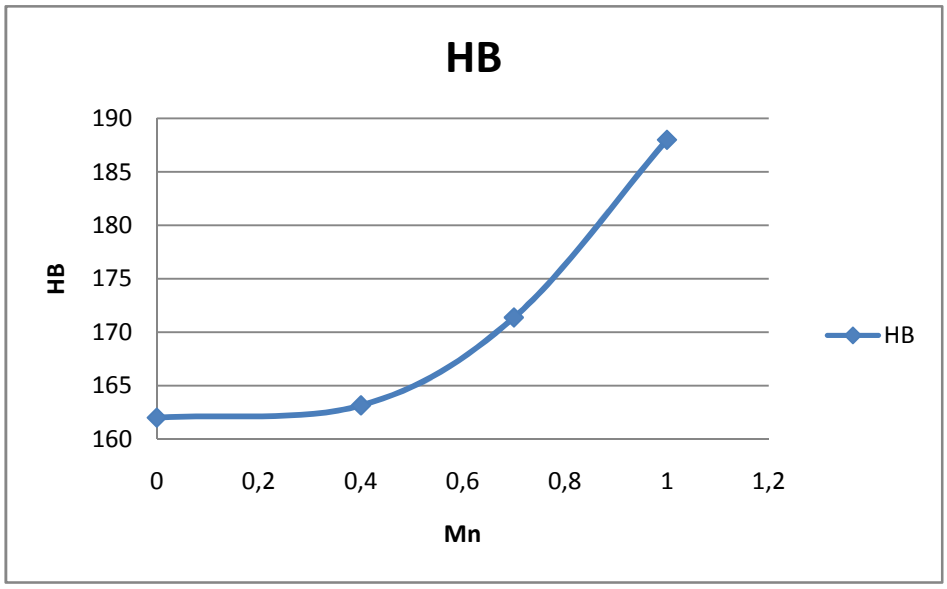


Figure 65: Evolution de la dureté en fonction du taux de manganèse.

Cette figure représente l'évolution de la dureté en fonction de la teneur de Mn, la relation est peut être estimé comme linéaire une fourchette d'amélioration de la dureté pour une augmentation de teneur de 0,7%. Le manganèse est un élément antigraphitisant .Il se dissout dans la ferrite en solution solide et en améliore ces caractéristique. La figure 65 présent un histogramme de comparaison entre l'influence du différent teneur des éléments d'addition et la dureté de brinell.

I-2-2-Essai de traction :

D'après la valeur de la résistance à la rupture, déterminée par l'essai de traction. Nous avons constaté que la fonte élaborée à la fonderie de Rouïba est une FT25 (fonte grise à graphite lamellaire de résistance maximal à la rupture par traction Rm=225,3Mpa).

En comparant cette résistance à la résistance maximale à la rupture par traction imposée par la norme NF A32-101 sur les tambours de freins, qui est de 250Mpa nous remarquons que cette dernière est élevée par rapport à cette de la fonte élaborée à la fonderie de Rouïba.

●Manganèse :

Composition de la fonte	Résistance maximale (Mpa)
Fonte base 0,7% de Manganèse	225,3
1 % de Manganèse	142,1

En revanche, lors de l'ajout du Fe-Mn l'allongement à la rupture à une valeur décroissante cela est due à ce dernier qui favorise la dominance de la perlite dans la matrice de la fonte.

●Carbone :

Composition de la fonte	Résistance maximale (Mpa)
Fonte base 3,36% de Carbone	225,3
4 % de Carbone	273,4

En revanche, lors de l'ajout du graphite l'allongement à la rupture à une valeur croissante cela est due à ce dernier qui il affine la perlite et augmente la résistance à la traction.

●**Silicium :**

Composition de la fonte	Résistance maximale (Mpa)
Fonte base 1,9 % de silicium	225,3
1,3% de silicium	218,3
2,2% de silicium	281,1

De ces analyses, on ressort les constations suivantes :

- Les résultats des valeurs expérimentales montrent un accroissement de résistance à la traction (Rm) avec l'ajout de silicium. Toutefois, on variation de la résistance maximale (Rm) avec les teneurs en Si.
- L'allongement à la rupture dépend de la matrice perlitique ou ferritique mais beaucoup plus du graphite, l'introduction du Si augmente la taille des nodules de graphite, et par conséquence augmente l'allongement à la rupture donc un accroissement du teneur en Si augmente l'allongement à la rupture.
- ●**Cuivre :**

Composition de la fonte	Résistance maximale (Mpa)
Fonte base 0,013 % de cuivre	225,3
0,3% de cuivre	234
0,6% de cuivre	246
1% de cuivre	277,8

D'après les résultats des valeurs expérimentales de l'essai de traction représente dans le tableau nous avons remarqué que la résistance maximal augmente graduellement avec l'inoculation de cuivre car ce dernier est un élément graphitassent faible qu'il transforme le matériau a un état malléable (dur à l'extérieur et ductile à l'intérieur).

Donc allongement au rupteur augmente.

Patrie II : résultats et discussion de la fonte (GSA) FGS56-5:

II-1-Analyse chimique :

D'âpre la fusion des métaux vous avez prenant un médaille pour trouves les pourcentages des éléments chimiques de la fonte âpre l'ajutent le cuivre, voir les tableaux suivant :

Tableau 18 : Les compositions chimiques de la médaille d'analyse de la fonte grise à graphite sphéroïdale (GSA) FGS56-5 avec le pourcentage de Mn est élève.

Elément	C%	Mn%	Si%	Cu%
Pourcentage	3.71	0.8	2.8	0.1

Tableau 19 : Les compositions chimiques de la médaille d'analyse de la fonte grise à graphite sphéroïdale (GSA) FGS56-5 avec l'ajustement de cuivre.

Elément	C	Mn	Si	Cu
Pourcentage	3.55	0.315	2.49	0.22

II-2- Examen métallographiques :

II-2-1-Observation micrographique :

Les surfaces préparées auparavant sont ensuite observées à l'aide d'un microscope optique.ces observation permettent d'évaluer qualitativement l'état de la microstructure des différents échantillons.

Pour chaque échantillon observé on a pris des photos de différents grossissements.

Pour ces observations et les prises de photos nous avons utilisé un microscope métallographique, qui est alimenté sous une tension de 220V avec fréquence f de 50HZ.

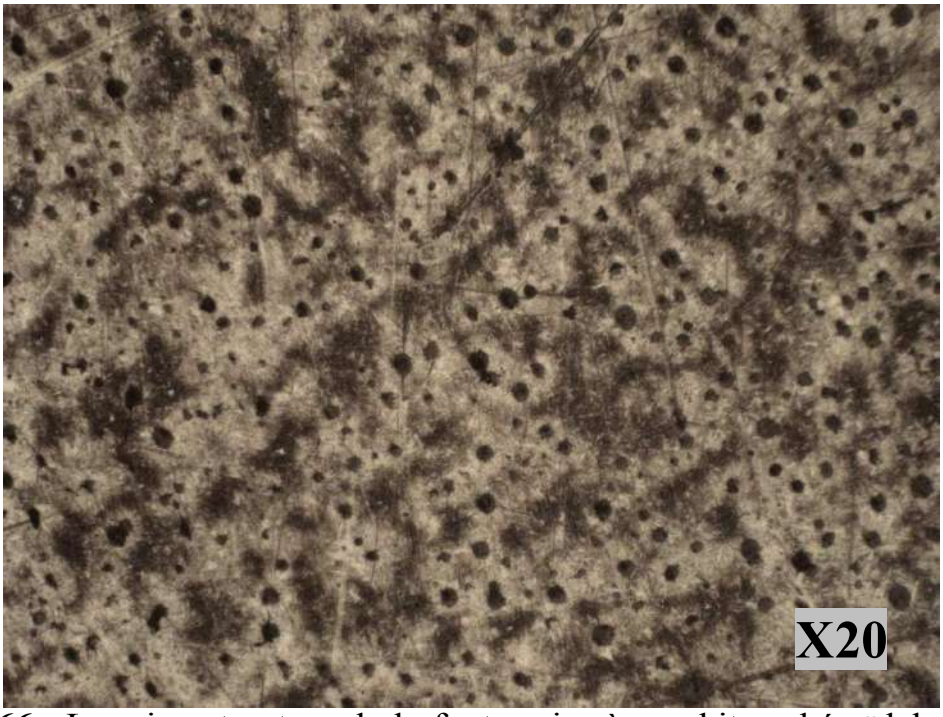


Figure 66 : La microstructure de la fonte grise à graphite sphéroïdale (GSA) FGS56-5 par le traitement thermique applique de trempe à huile et revenu dans un four à 900°C de température.

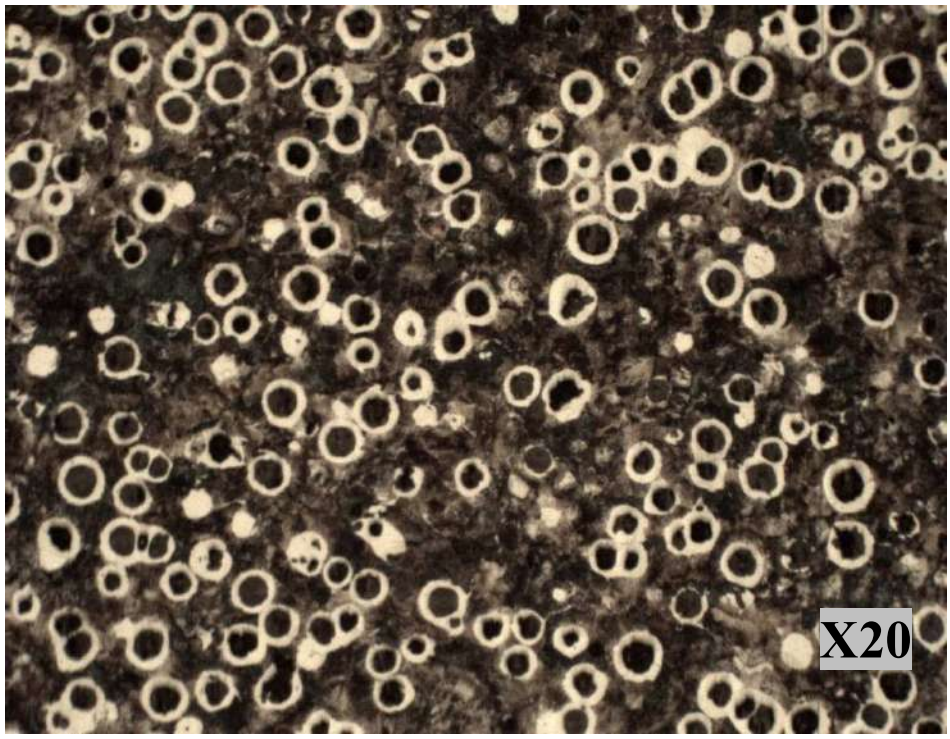


Figure 67 : L'observation du fonte grise à graphite sphéroïdale(GSA) FGS56-5 par le traitement thermique détente dans un four à 550°C de température.

II-2-2-Analyse métallographique :

Tableau 20: La matrice de la (GSA) FGS56-5 par le traitement thermique détente.

Nodularité	Perlite	Ferrite	Carbure	Nombre de nodules
90%	63%	27%	1%	100

II-3- Examen mécanique :

II-3-1- Essai de traction :

Tableau 21 : Résultat de l'allongement qui donne âpre la contrainte applique.

Contrainte (N/mm²)	50	100	150	200	250	300	350
Allongement %	0	0.15	0 .4	0.6	0.75	0.9	1.15
Contrainte (N/mm²)	400	450	500	550	600	650	/
Allongement %	1.5	2	2.7	3.5	4.7	7	/

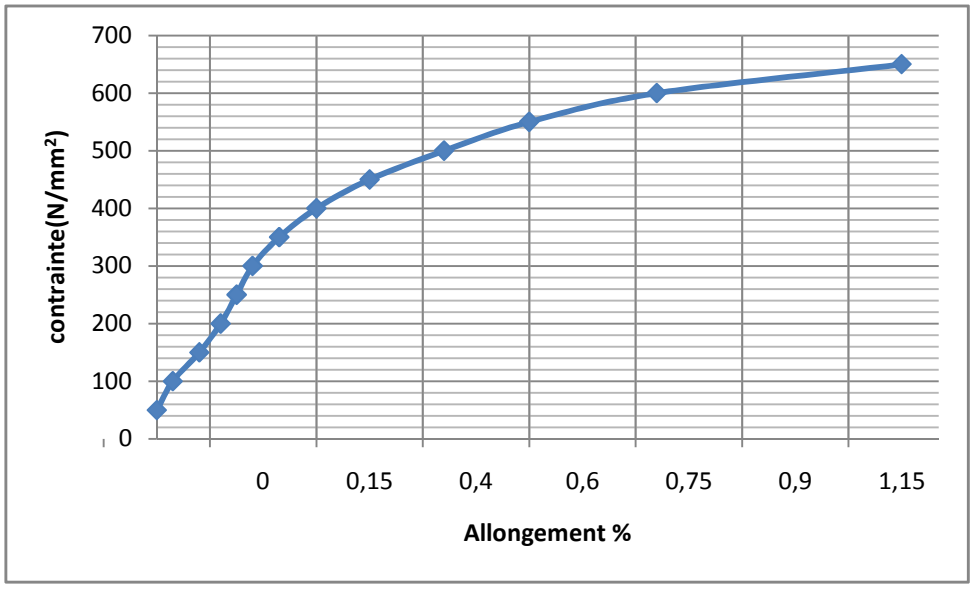


Figure 68 : Diagramme de l'allongement en fonction de la contrainte.

Tableau 22 : L'augmentation de l'allongement avec défirent forces applique :

F(N)	15700	31400	47100	62800	78500	94200	109900
Allongement %	0	0.15	0 .4	0.6	0.75	0.9	1.15
F(N)	125600	141300	157000	172700	188400	204100	/
Allongement %	1.5	2	2.7	3.5	4.7	7	/

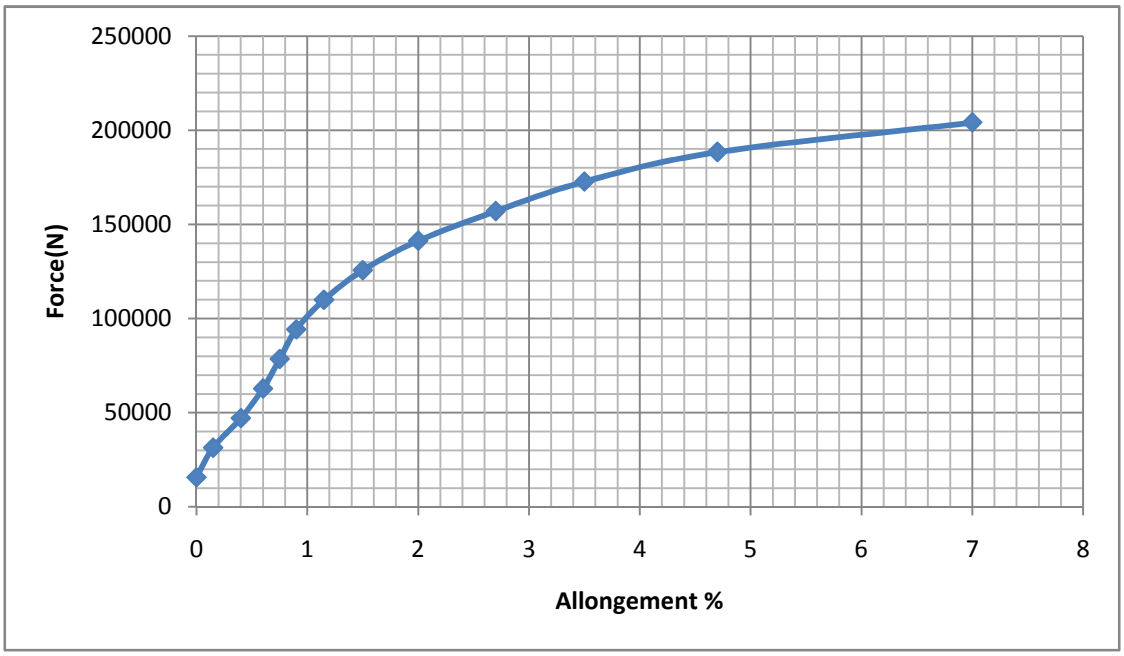


Figure 69 : Excroissance de l'allongement en fonction de la force applique déférentes.

Tableau 23 : Dilatation de traction sur un éprouvette de la fonte gris à graphite sphéroïdal (GSA) FGS56-5 à déférente forces appliqué :

F(N)	15700	31400	47100	62800	78500	94200	109900
ΔL(mm)	0	0,27	0,72	1,08	1,35	1,62	2,07
F(N)	125600	141300	157000	172700	188400	204100	/
ΔL(mm)	2,7	3,6	4,86	6,3	8,46	12,6	/

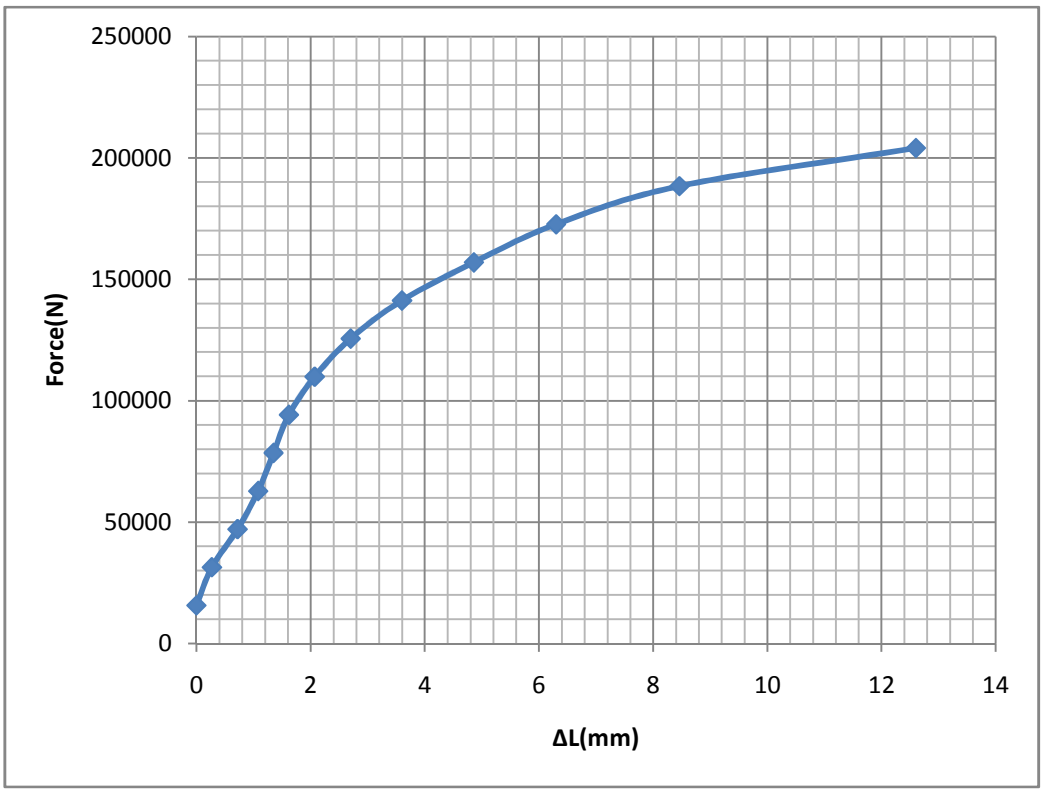


Figure 70 : Excroissance de la dilatation de l'éprouvette en fonction de la force applique.

Tableau 24 : Représente la contrainte qui applique et la dilatation de la fonte (GSA) FGS56-5

σ(N/mm²)	50	100	150	200	250	300	350
ΔL(mm)	0	0,27	0,72	1,08	1,35	1,62	2,07
σ(N/mm²)	400	450	500	550	600	650	/
ΔL(mm)	2,7	3,6	4,86	6,3	8,46	12,6	/

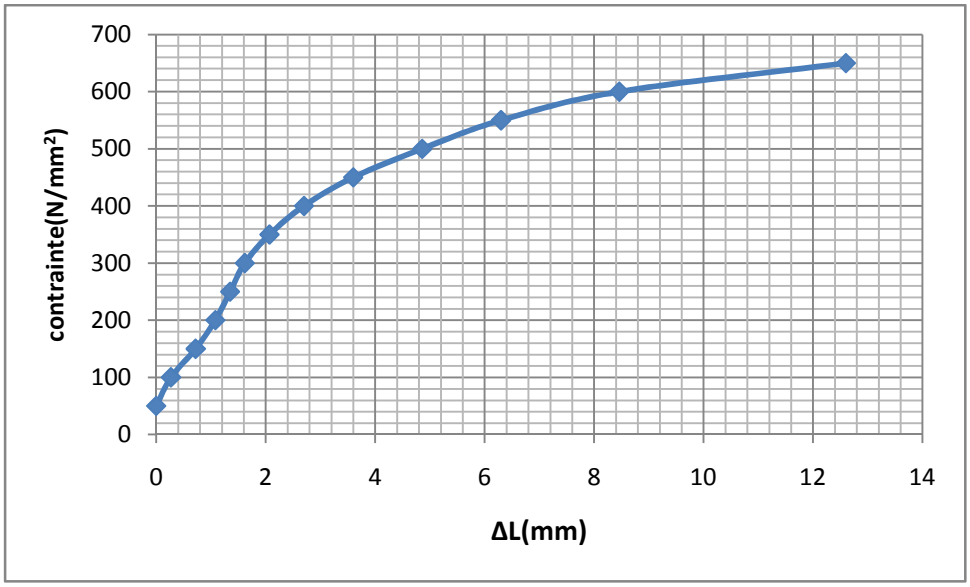


Figure 71 : Variation du long d'éprouvette de traction en fonction de contrainte.

Tableau 25 : Déformation de la fonte (GSA) FGS56-5 par rapport la force qui applique :

F(N)	15700	31400	47100	62800	78500	94200	109900
ε	0	0,0015	0,004	0,006	0,0075	0,009	0,0115
F(N)	125600	141300	157000	172700	188400	204100	/
ε	0,015	0,02	0,027	0,035	0,047	0,07	/

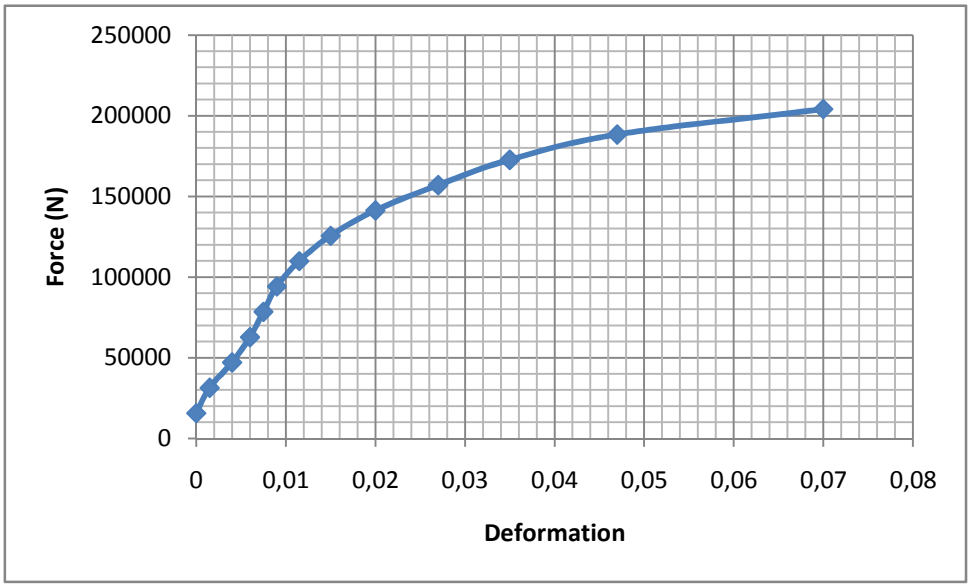


Figure 72 : Courbe de déformation d'éprouvette de traction en fonction de force.

Tableau 26 : le résulta de la déformation de la fonte (GSA) FGS56-5 par rapport la contrainte.

σ(N/mm²)	50	100	150	200	250	300	350
ε	0	0,0015	0,004	0,006	0,0075	0,009	0,0115
σ(N/mm²)	400	450	500	550	600	650	/
ε	0,015	0,02	0,027	0,035	0,047	0,07	/

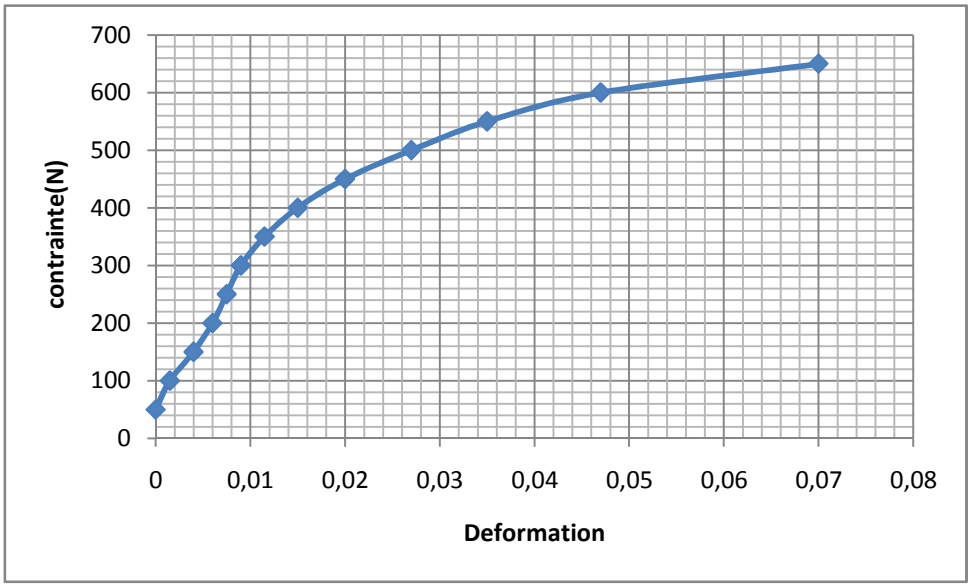


Figure 73 : Courbe qui représente la déformation d'éprouvette de traction en fonction de contrainte.

Essai de dureté Brinell :

Les propriétés mécaniques :

- limite d'élasticité conventionnelle moyenne *Re0. 2 :*

(Contrainte correspondant à 0,2 % de déformation)

- *Re0.2= 392.66 N/mm²*
- Résistance à la traction moyenne *Rm* contrainte maximale atteinte durant l'essai de

Traction:

- *Rm*= 647.28 N/mm
- Module d 'Young Moyne *E:*
- E= 27,77 Gpa

Tableau 27 : Les propriétés de(GSA) FGS56-5 ci la même par les deux traitements qui applique (détente et trempe revenu).

Resistance Rm (N/mm²)	Limite élasticité Rp0.2 (N/mm²)	Allongement (%)	Résilience (joules)	Dureté (HB)
647.28	392.66	7.1	6.5	241

Conclusion Générale :

L'étude que nous avons menée sur l'élaboration de fonte à graphite sphéroïdal et à graphite lamellaire et le matériau avec lequel il est confectionné nous a permis de conclure les points suivants :

- Le cuivre est un élément qui a une action légèrement graphitisant. Il stabilise la perlite, améliore les caractéristiques mécaniques, la résistance à l'usure et aussi certains types de corrosions.
- Nous avons conclu que l'augmentation de cuivre dans ce type d'alliages est une idée mieux et économique au même temps vu qu'il est disponible dans les minerais nationales.
- Par contre, il a été remarqué que le manganèse : empêche la graphitisation et renforce les liaisons atomiques entre le fer et le carbone dans la cémentite.
- La réalisation d'un traitement thermique fut d'une trempe martensitique suivie d'un revenu utiliséva diminuer la dureté, la résistance à la traction, la limite d'élasticité ainsi qu'une augmentation de la ductilité. Cependant, nos matériaux qui ont servi à l'étude comportant une faible teneur en cuivre qui est responsable des propriétés sus-citées.
- la dureté augmente progressivement avec l'ajout de carbone dans la fonte grise à graphite lamellaire (Ft25).

[1] : M. DURAND-CHARRE.
«La microstructure des aciers et des fontes. Genèse et interprétation». Institut National Polytechnique de Grenoble; ISBN 2-906-643-27-0; année 2003.

[2] : Jean-Claude MARGERIE.
Ingénieur de l'École Polytechnique Conseiller Scientifique au Centre Technique des Industries de la Fonderie
«Élaboration des fontes» ; année 1981.

[3] : M. DUPEUX.
«Aide-mémoire science des matériaux». Dunod, Paris, 2005;

[4]: C.Chaussin- G.Hilly.
«Métallurgie élaboration des métaux». Edition Dunod Paris 1972 ;

[5] : Rabah BOUFAS
« Etude du défaut de fissuration des lingotières pour la coulée de la fonte en gueuse ». Magister d'université badji mokhtar-annaba 2003.

[6] :H.Le Breton
«Manuel pratique du fondeur de fonte», DUNOD, 1962.

[7] : Michel Colombié et Coll.
«Matériaux métallique ».2^{éme} édition. Dunod, Paris, 2001, 2008.
ISBN 978-2-10-053918-5

[8] : Akkou.
«Elaboration des fontes GS optimisation de leurs paramètres de recuit»
PFE ENP 1992.

[9] : J- Laine :

«Techniques de l'ingénieur moulage et fonderie de la fonte ». 2003.

[10] :H.Le Breton.
« Manuel pratique du fondeur de fonte ». DUNOD, 1962.

[11] : Centre français d'exploitation. Technique de l'ingénieur. Propriétés des fontes à graphite sphéroïdal- métallurgie, propriétés des alliages ;
M392, 393,396.

[12]: BALLY (M.), CHAVY (R.) ET GRILLAT (J.)
«Etude de quelques propriétés de fontes à graphite sphéroïdal. Fonderie» ;
Année 1951.

[13] : BECHET S.
« Les fontes utilisées à hautes température, hommes et Fonderie»
février 1981.

[14]-F.ARNAUD, P.GODINOT.
«Fonderie-Fondeur ». 183-Mars 1999.

[15] : Techniques des industries de la Fonderie
«Manuel des fontes moulées traduction et adapte de Iron castings Handbook ».
Parte centre d'information des fontes moulées 1983.

[16] : Jean-Claude MARGERIE
Ingénieur de l'École Polytechnique, Chef du Département de la Métallurgie au Centre Technique des Industries de la Fonderie (CTIF)
«Propriétés des fontes grises ordinaires». Référence M1145 |
Date de publication : 10 déc. 2001

[17] : Simone PARENT-SIMONIN, Jean-Claude MARGERIE

«Traitements thermiques des fontes ». 2001.