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 Mécanique



Mémoire de Fin d'Études

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

Option : Science des Matériaux

THEME

Comparaison entre deux fontes grises sphéroïdales GSC (FGS 38-15) et GSA (FGS 56-5) de point de vue : composition chimique, structure, et caractéristiaues mécaniaues

Proposé et dirigé par : -Mr. Habireche Mohamed

- Mr. ElMohri.A

Préparé et présenté par : -Soualhi Mohamed El Amine

-Bougheraf Youcef

AnnéeUniversitaire2014-2015

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- Mon père qui n'est plus, que Dieu le Tout Puissant l'accueille en son vaste paradis.
- Ma mère à qui je souhaite une longue vie.
- Mes frères et leurs familles.
- Ma sœur et son enfant.
- Toute la famille et tous les amis



Remerciements

Ce travail a été réalisé au département de génie de mécanique, spécialité science des matériaux à l'université de Yahia Fares - Médéa terme de ces années d'études, je remercie tous mes enseignants et tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier vivement mon frère pour son soutien et ses conseils durant toutes ces années d'études.

J'exprime ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire monsieur Habireche Mohamed et Elmohri Abdenoure, qui n'a épargné aucun effort pour m'encadrer dans les meilleures conditions…

J'adresse mes vifs remerciements et mon profond respect à docteur Zirari Mounir, chef département de génie de mécanique à l'université de Yahia Fares –Médéa qui a bien accepté de présider le jury de ma soutenance.

Je tiens également à remercier tous le personnel de l'entreprise (SNVI) l'unité de fonderie-Rouiba (U.F.R)qui m'ont aidé à réaliser la coulée des échantillons, spécialement monsieur Boutarek Nacer chef département ,contrôle.

Je présente mes remerciements aux ingénieurs des laboratoires (SNVI) l'unité de fonderie-Rouiba.
Mes remerciements vont également à tous mes amis et à tous mes collègues pour leur aide et encouragement.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE …… 1

Chapitre Ⅰ : Etude Bibliographie.

1-Généralités ……. 2

1-1 – Définition des Fontes ……. 2

1-2- Modes D'obtentions ……. 2

1-3-Structure des Fontes Selon Diagramme D'équilibre Fer- Cémentite ……. 2

1-3-1- Diagramme D'équilibre Fer-Cémentite ……. 3

1-4-Constituants et Phase des Fontes ……. 4

1-4-1-Différente Aspect du Graphite ……. 5

1-4-2-Types des Graphites ……. 5

2-Différents Types des Fontes ……. 9

2-1- Fontes Blanches ……. 9

2-2- Fontes Grises ……. 10

2-3-LES Types des Fontes Grises ……. 11

2-3-1- Fonte à Graphite Lamellaire (FGL) ……. 11

2-3-2- Fonte à Graphite Malléables (FGM) ……. 12

2-3-3- Fonte à Graphite Vermiculaire (FGV) ……. 12

2-3-4- Fonte à Graphite Sphéroïdale (FGS) ……. 13

2-4-Les Familles des Fontes GS ……. 13

2-4-1-Fonte GS Ferritique …… 13

2-4-2-Fonte GS Ferrito-Perlitique …… 13

2-4-3- Fonte GS Perlitique …… 13

2-4-4-Fonte GS Martensitique …… 14

2-4-5-Fonte GS à Trempe Bainitique …… 14

2-5-Principe Les Application des Fontes …… 15

3-Etude des Fontes GS …… 16

3-1 – Pourquoi La Fonte GS ? …… 16

3-2-Élaboration du Métal Liquide …… 16

3-2- 1- Élaboration des Fontes GS …… 17

3-3- Désulfuration …… 17

3-4- Sphéroïdisation de La Fonte (G.S) …… 17

3-5- Inoculation et Post- Inoculation …… 18

3-6-Système Fer-Carbone-Silicium …… 18

3-7- Système Fer-Carbone-Phosphore …… 20

3-8-Solidification et Transformation à L'état Solide des Fontes … …… 20

4-Influence des éléments D'élaboration …… 25

4-1– Action des éléments (FGS) …… 25

4-2– Analyse Chimique élémentaire …… 30

5-Traitement Thermique Applique Aux Fontes GS …… 30

5-1.-Généralité …… 30

5-2- Diagramme T.R.C …… 31

5-3- Diagramme T.T.T …….……. 32

5-4- Traitements Thermiques de Ferritisation ……..…… 33

5-4-1-Recuit à des Températures Situées Entre 820°C et 900°C ……..... 33

5-4-2- Recuit à une Températures Comprise Entre 730°C et 790°C …….. 33

5-5- Influence du Recuit de Ferritisation Sur Le Comportement Mécanique .34

5-6- Traitements Thermiques de Type Bainitique ……..….. 34

5-7- Traitements Thermiques de Type Martensitique …….. 37

5-8-Méthode de Traitement …….……..….. 37

5-8-1- L'austénisation ……..…….…… 37

5-8-2-La Trempe ……...……..….. 37

5-8-3-Le Revenu …… 36

6- Propriétés Mécaniques ……..….. 36

Chapitre Ⅱ : Technique D'analyse.

1- Le Four à Induction ……...…… 38

2- Elaboration de La Fonte GS Alliée et Coulé des échantillons ……..….40

3- Observation Microscopique ……..…….... 40

4- Essais Mécaniques Destructifs ……..…….. 41

4-1- Essais de Dureté ……..…….. 41

4-2- Essais de Traction ……...…….. 44

4-3- Essais de Résilience …… 46

4-4- Eprouvette En Escalier L …….. 49

Chapitre Ⅲ : Partie Expérimentale.

1-Introduction …….. 51

2-But de Travail …….. 51

3- Equipement …….. 51

4-Elaboration …….. 53

5- Préparation de La Charge …….. 53

6-Fusion de La Charge …….. 54

7 –Maintient et réajustement …..…….. 54

8-Traitement de Sphéroïdisation ……..…..... 55

9 –Addition des Eléments Perlitisations …… 56

10- Inoculation et Coulée ……...…… 57

11-Métallographie ……...…….. 57

11-1-Préparation des échantillons …… 57

11-2- Le Polissage ……..…….. 57

11-3 –L'attaque Chimique . ……...…….. 58

12-Propriétés Mécaniques ...…….…….. 58

13-Résultats Intertation ……..……..…….. 60

13-1-Morphologie du Graphite ….. …….. 60

13-2-Interprétation …… 61

13-3-Analyse de Matrice …….. 64

13-4-Influence de L'épaisseur Sur Les Propriétés Mécaniques et Structurale de Fonte GSC et GSA à L`état Brut de Coulées …….. 66

13-5- Influence de L'épaisseur Sur La Dureté …….…….. 66

13-6-Analyse Qualitative et Quantitative des Fontes GSC et GSA ….……. 71

13-7- Analyse Micrographique de La Matrice des Fontes GSC et GSA ……..… 75

13-8-L' influence de L`épaisseur Sur La Résilience et La Dureté ……..…..… 75

13-9-Recuit de Feritisation ……..…….. 78

13-9-1-La Fonte GSC ……...……... 79

13-9-2-Choix de Traitement de Ferritisation Optimal Pour La Fonte GSC …..……...…….... 79

13-10-Recuit de Perlitisation ……...……... 80

13-11- Caractéristiques Mécaniques des Fontes (GSC et GSA) Optimisées … 82

Conclusion Générale……...…… 83

Liste des figures		
figure	***Titre***	***Page***
	Chapitre I : Etude bibliographie	
1	*diagramme fer-graphite est similaire au diagramme fer-cémentite.*	*3*
2	*Influence de quelques éléments d'addition sur la résistance à la traction de la ferrite.*	*4*
3-a	*Graphite en lamelles*	*6*
3-b	*Graphite en rosettes.*	*6*
3-c	*Graphite (lamelles superposées)*	*7*
3-d	*Graphite interdendritique de surfusion*	*7*
4	*Graphite en nodules*	*8*
5	Graphite sphéroïdal	*8*
6	*Vue au microscope de fonte blanche*	*9*
7	*Vue au microscope de fonte grise*	*11*
8	*Vue au microscope de fonte à graphite lamellaire.*	*11*
9	*Vue au microscope de fonte à graphite malléables*	*12*
10	*Vue au microscope de fonte à graphite vermiculaire*	*12*
11	*Vue au microscope de fonte à graphite sphéroïdal*	*13*
12	*les matrices des fontes GS*	*14*
13	le feuillet orangé inclus dans la pochette de la couverture arrière de cette brochure présente des renseignements additionnels sur les applications et les propriétés	
14	*Fiabilité de 0.4 alliage ferreux*	*16*
15	*Le pourcentage de silicium entraine.*	*19*
16	*Description schématique de la solidification d'une fonte GS hypereutectique*	*21*
17	*section partielle du diagramme de phases Fe-C-Si à teneur en silicium fixée*	*22*

18	courbes représentant schématiquement l'évolution de la température en fonction du temps lors du refroidissement et de la solidification d'une fonte à graphite sphéroïdale hypoeutectique (a) hypereutectique (b).	23
19	schéma de l'élément du volume considéré pour décrire la formation de la microstructure d'une fonte à graphite sphéroïdale durant réaction eutectique dans le système stable.	24
20	fonte à graphite sphéroïdale : variation des teneurs en carbone et en silicium et facteurs pratiques qui tendent à limiter se domaine.	27
21	Diagramme T.R.C pour les fontes G.S. ←et ↑avec 3,3 et 2,3 % de Si (refroidissement continu effectué après un traitement d'austénitisation à 875°C durant 10 minutes).	31
22	Diagramme T.T.T d'une fonte perlitique non alliée (austénitisation à 900°C, 10 minutes).	32
23	Schéma du traitement thermique de trempe martensitique suivie d'un revenu.	35
24-a	Propriétés mécaniques de fontes G.S. trempées et revenues [SOR90] (a) Influence de la température du revenu (2 heures), après trempe à l'huile, sur la dureté (b) Gammes de propriétés mécaniques obtenues par trempe et revenu de fontes G.S..	37
24-b	illustre l'important domaine de propriétés mécaniques qu'il est possible de couvrir par l'intermédiaire de ce type de traitement thermique. Ce graphique montre l'évolution de la ductilité en fonction de la résistance à la traction et de limite d'élasticité).	37
Chapitre II : Technique d'analyse		
25	Four électrique à induction.	39
26	Méthode de coulée des éprouvettes.	40
27	Microscope utilisé pour l'étude métallographique	41
28	principe de dureté HB	42
29	Machine utilisée pour l'essai de dureté HB	43
30	Eprouvette de traction.	43
31	Principe de l'essai de traction	44
32	Forme et dimension de l'éprouvette de traction	45
33	Eprouvette de traction utilisée	45
34	Machine utilisée pour les essais de traction	46

35	*éprouvette de résilience.*	47
36	*Forme et dimensions de l'éprouvette de résilience.*	47
37	*Principe de l'essai de résilience*	48
38	*Machine utilisée pour les essais de résilience*	49
39	*Eprouvette "Escalier"*	50
	Chapitre Ⅲ :partie Exprimentale	
40	*Opérations d'élaboration de la fonte de moulage*	52
41	*Principe de traitement de sphéroïdisation*	55
42	*représenté machine de polissage.*	58
43	*Fonte GSC, épaisseur 2.5mm Brut de coulée.* *Forme Ⅵ, répartition E, dimension 8-7.*	62
44	*Fonte GSC, épaisseur 2.5mm Brut de coulée.* *Forme Ⅵ, répartition E, dimension 8-7.*	62
45	*Fonte GSC, épaisseur 20 mm Brut de coulée.* *Forme Ⅵ, répartition c, dimension 5.*	63
46	*Fonte GSA, épaisseur 2.5mm Brut de coulée.* *Forme Ⅵ, répartition E, dimension 8-7.*	63
47	*Fonte GSA, épaisseur 6 mm Brut de coulée.* *Forme Ⅵ, répartition E, dimension 6.*	64
48	*Fonte GSA, épaisseur 20 mm Brut de coulée.* *Forme Ⅵ, répartition C, dimension 5.*	68
49	*Distribution des phases en fonction de l'épaisseur (GSA)*	65

50	Distribution des phases en fonction de l'épaisseur(GSC)	66
51	Variation de la dureté en fonction de 1'épaisseur (GSC 38-15 et GSA 56-5)	67
52	Micrographie sur l'état brut de coulée de fonte GSA et GSC.	68
53	Réparation des taux des phases des deux formes GSC et GSA	69
54	courbe de traction conventionnelle de la fonte GSA à l'état brut de coulée.	70
55	courbe de traction conventionnelle de la fonte GSC à l'état brut de coulée.	71
56	micrographie d'une fonte GSA à l'état brut de coulée à différentes épaisseurs (a, b, c) (attaqué au Nital).	73
57	micrographie d'une fonte GSC à l'état brut de coulée à différentes épaisseurs (a, b, c) (attaqué au Nital).	75
58	Distribution des phases en fonction de l'épaisseur A) fonte GSC, B) fonte GSA.	76
59	variation de la dureté en fonction de 1'épaisseur.	77
60	variations de la résilience en fonction de l'épaisseur	77
61	Cycle de ferritisation directe de fonte GSC.	78
62	Cycle de ferritisation indirecte de fonte GSC .	79
63	micrographie sur la ferritisation indirecte de la fonte GSC	80
64	cycle de traitement de perllitisation des fontes GSC et GSA.	81
65	variation du taux de perlite en fonction de la durée de maintien ou cours de la pérlitisation .	81
66	variation de la durée HB en fonction de durée de maintien au cours de la perlitisation .	82
67	micrographie d'une fonte GSA à apres tt à différentes épaisseurs (a, b, c) (attaqué au Nital).	84
68	micrographie d'une fonte GSA à apres tt à différentes épaisseurs (a, b, c) (attaqué au Nital).	85

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
1	Propriétés de la ferrite en fonction de la teneur en Si	4
2		10
3	Caractéristiques des matériaux utilisés	31
4	Propriétés mécaniques sous sollicitations monotones, traction et ténacité, de fontes G.S. brutes de coulée et après traitement thermique de ferritisation [DIE96, MON00].	34
5	Analyse chimique des constituants	53
6	Quantités des constituants de la charge	53
7	Composition chimique des essais A et B après fusion.	54
8	Composition chimique des bains après réajustement et homogénéisation	54
9	Composition chimique des fontes A et B après traitement	56
10	analyse chimique.	56
11	Compositions chimiques des différents bains de fontes après les additions.	56
12	Prélèvement d'éprouvettes pour les essais réalisés.	57
13	Les compositions chimiques des fontes élaborées par l'U.F.R.	59
14	Les caractéristiques mécaniques des fontes élaborées par l'U.F.R.	59
15	Morphologie du graphite	60
16	Variation du diamètre moyen du graphite en fonction de l'épaisseur	61
17	variation du diamètre moyenne en fonction de l'épaisseur	77
18	Caractéristiques mécaniques des deux fonte après le recuit de ferritisation optimisé.	98
19	Caractéristiques mécaniques des fonte GSC et GSA après le recuit de perlitisation optimisé.	99

Références Bibliographies

[1] : Jean-Claude MARGERIE

Élaboration des fontes (hormis les fontes malléables) *Ingénieur de l'École Polytechnique Conseiller Scientifique au Centre Technique des Industries de la Fonderie*

[2] Lakhine :

Métallographie et traitement thermiques des métaux. Ed. Mir Moscou 1978

[3] H.Le Breton :

Manuel pratique du fondeur de fonte, DUNOD, 1962.

[4]-LACY(C.E) et GENSAMER (M.) :

Tran. Am. Metals, 88, p.32 (1944).

[5] J .Barralis et G.Maider :

précis de métallurgie Edition Nathan 1990

Précis de métallurgie. Elaborations, structures – proprietes et normalisation Précis de métallurgie Ed. Nathan Paris 1990 p.50-60

[6]-L. Giai-Bruer :

Fonderie. Eléments fondamentaux, DUNOD, 1983.

[7]Atlas :

Métallographique des fontes, éditions techniques des industries de la fonderie 1980.

[8]-H.Laplanche et R.Thiron:

Du choix et de l'emploi des principaux aciers. Fontes et alliages ferreux. Edition Paris 1973.

[9] Akkou :

Elaboration des fontes GS PFE ENP 1992 optimisation de leurs paramètres de recuit

PFE 1996 USTHB

[10] J.Laine :

Techniques de l'ingénieur moulage et fonderie de la fonte M760-1

[11] document cours master 2

[12]-MICHEL GEIER :

Métallurgie de fonderie. Tome 1. Editions Eyrolles 1976.

Métallurgie de fonderie (Tome 2), Eyrolles, paris 1978

Métallurgie de fonderie Edition eyrolles 1978

Métallurgie de fonderie Tome l Edition : MIR.

[13] J . C Margerie :

Elaboration des fontes technique de l'ingénieur M 760, 1995 P. 12-15

Techniques de l"ingénieur Caractéristiques des fontes ›› M 392-3

Centre français d'exploitation. Techniques de l'ingénieur, traitématériaux métalliques. M 380.
Centre français d'exploitation.Technique de l'ingénieur. M760-14.

[14] I. Minkoff

The physicol metrallurgie of cost iron A. WILAY - Interscience Publication 1983 p.35-40.

[15] J-Lacaze :Formation des structures dans les fontes ferrito-perlitiques àgraphite

sphèroidale.revue de métallurgie-CIT/ Science et Genie des materiaux. Mai 1996.P.643-645

[16] -HECHT (M.) :

Les eutectiques des alliages à base de fer et de carbone, éditions techniques
des industries de la fonderie 1969.

[17] :

Métallographie et traitement thermique des métaux, Edition 1 MIR P 194, 197.

[18] P. Cuenin

Métallurgie des alliages de fonderie Technique de 1'ingénieur M 3520, 1990 p. 2-15

[19] Gérer :

Métallurgie de fonderie. Ed. Eyrolles 1978 p. 150-160

[20] A.Roos et B.Milet :

Précis de métallurgie appliquée Edition Lavoisier 1982

Précis de métallurgie appliquée 1978 P.120-125

[21] Lakhine :

Métallographie et traitement thermiques des métaux. Ed. Mir Moscou 1978

[22] S. Bechet, KHORNUNG, J .DODD :

Revue de traitement thermique n° 219. 1988 P 69, 70.

Revue de traitement thermique n° 187-84. P 30, 31, 32.

Revue des mémoires scientifiques n°1-1968 P 2, 3.

Trempe étagée de la fonte à graphite Sphéroïdal. Geserei, n°4, fév. 1978, P.73.

[23] O.BADER et E. THERET :

2 Dictionnaire de métallurgie.P 78.

[24]C.GRIGY ; J.LEGAL

Revue de traitement thermique n° 164 – 1982.P 48.

[25]-Jean-Marcel :

MASSON. Centre francais d'exploitation. Techniques de l'ingénieur. Elaboration de l'acier moulé-Fours de fusion. M 3623. Edition Sep 2005.

[26]-Pierre Cuinin :

Centre français d'exploitation. Technique de l'ingénieur. Métallurgie des alliages de fonderie. M 3520-2.

[27] DETREZ (P.) :

Moulage et fonderie de l'acier.M780, traité Matériaux métalliques, oct. 1989

[28] Fritz Klocke :

Manufacturing Processes 2 Grinding, Honing, Lapping, (The Machinability of Various Materials), Engineering Rwthedition, Germany 2009.)

[29]. Gülcan Toktas, Mustafa Tayanc, Alaaddin Toktas :

Effect of matrix structure on the impact properties of an alloyed ductile iron, Materials Characterization 57 (2006) 290-299.

[30]-MICHEL GEIER :

Métallurgie de fonderie. Tome 2. Editions. Eyrolles 1978.

ملخص

ان القطع الميكانيكية من حديد الزهر تمثل خصوصيات تركيبية وميكانيكية مختلفة بتغيير سمك اجزاء القالب ومن اجل هذا الترابط صممنا قطعة تجارب مدرجة مختلفة السمك ثم قمنا بتجربة الصلابة وقوة التماسك وكذلك دراسة مجهريه للمكونات ومعالجة حرارية

Abstract 1

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

Résumé 2

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

INTRODUCTION

Introduction Générale :

Les pièces mécaniques en fonte (G.S) élaborées à l'unité Fonderie de Rouïba (U.F.R) nécessitent souvent un traitement thermique pour améliorer leurs propriétés mécaniques.
Cependant, la grande consommation d'énergie durant ces traitements, fait augmenter le prix de revient unitaire (pour chaque pièce) réduisant ainsi fortement la compétitivité du produit fabriqué sur la marche mondiale. On sait que les propriétés mécaniques dépendent principalement de la microstructure, et particulièrement du rapport entre les quantités de ferrite et perlite pour les fontes (G.S).
Cette étude est présentée sous forme de 3 chapitres principaux :
Dans ce chapitre nous présentons une étude générale sur l'élaboration des fontes, leurs classifications, leurs propriétés mécaniques et traitement thermique.

Ce chapitre nous présentons les matérielle et les machine des essais mécanique, Les techniques de préparation des éprouvettes et des échantillons.

Ce chapitre explique en détail l'élaboration des fontes (G.S) A l'U.F.R ainsi que les essais expérimentaux que nous avons réalisés dans cette unité. Préparation le lit fusion et traitement des fontes GSA et GSC, Les techniques de préparation des éprouvettes et la métallographie, traitement thermique et les essais mécanique.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIE

1-Généralités :

1-1 – Définition des Fontes:

Une fonte est un alliage métallique dont l'élément essentiel est le fer, et dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Il est à noter que la présence de fortes teneurs en éléments carburigènes peut modifier cette limite de la teneur en carbone.[1]

1-2- Modes D'obtentions :

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

b) 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.

c) 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. [1]

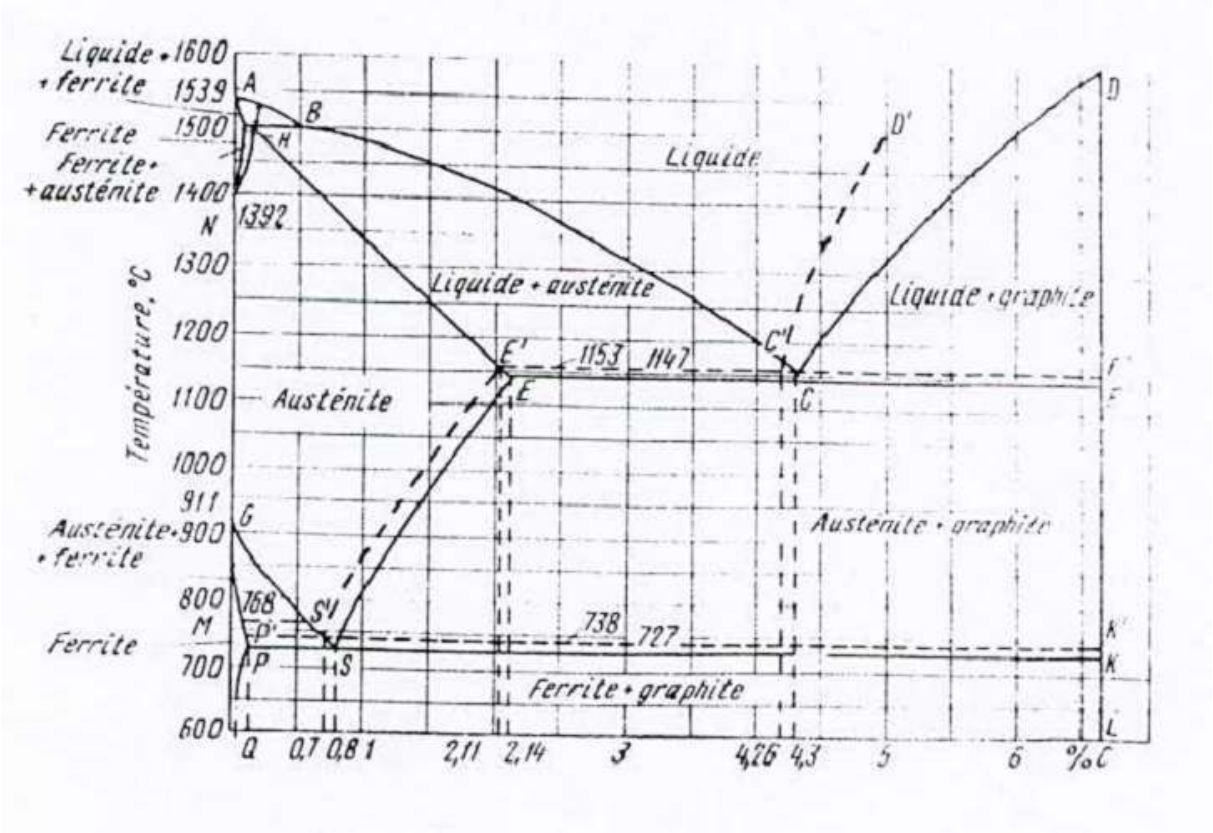
1-3-Structure des Fontes Selon Diagramme D'équilibre Fer- Cémentite :

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 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 d'autres éléments. 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 perlite 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. [1]

1-3-1- Diagramme D'équilibre Fer-Cémentite :

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



La figure 1 : diagramme fer-graphite est similaire au diagramme fer-cémentite.

Le 1er diagramme le graphite primaire cristallise aux températures qui correspondent à la ligne C'D' et le graphite eutectique A celle qui correspondent a la ligne E'C'F'. La ligne E'S' délimite le domaine de la précipitation du graphite secondaire et le palier S'K' au graphite eutectoide. [2]

1-4-Constituants et Phase des Fontes :

a) Ferrite :

C'est une solution solide d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer. Les atomes de carbone se logent au milieu des arrêtes. Sa dureté brinell est d'environ 80.
Les propriétés de la ferrite dépendent de la taille du grain mais aussi de la nature et de la

quantité des éléments qui peuvent s'y trouver en solution. Le plus important d'entre eux, le silicium, toujours présent en quantité notable dans les fontes, modifie les caractéristiques de la ferrite ainsi qu'il est indiqué au tableau 1. [3]

Type de ferrite	Caractéristique mécanique		
	Résistance à la traction	Allongement(%)	Dureté brinell(HB)
Ferrite pure……..	275	61	75
Ferrite à 0,82%Si...	309	50	88
Ferrite à 2,28%Si…	437	43	124
Ferrite à 3,4%Si…	530	28	150

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

Dans les fontes grises ferritiques à graphite lamellaire, cette influence du silicium peut être masquée par celle du graphite. L'influence des autres éléments sur la dureté et la résistance de la ferrite apparaissent sur la figure 2.

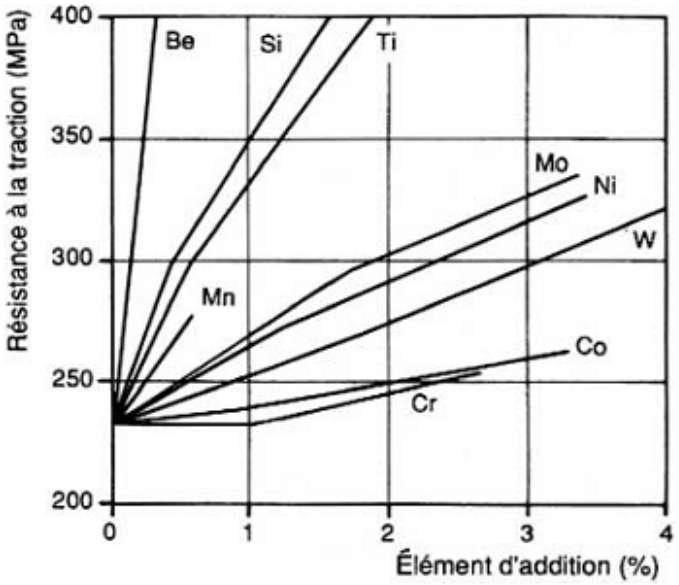


Figure 2 : Influence de quelques éléments d'addition sur la résistance à la traction de la ferrite. [4]

b) Perlite :

Dans le cas d'un refroidissement lent, après solidification a la température de 721°c, les alliages fer-carbone sont le siège d'une transformation interne eutectoide an cours de la quelle la ferrite et la cémentite forment un nouveau constituant ayant la forme d'un agrégat très fin et lamellaire appelé perlite.

Ce constituant est formé de 87 % do ferrite et 13% de cémentite. En couches alternées et orientées parallèlement. L'épaisseur entre deux lamelles est inférieure à l0mm^2. La teneur en carbone de la perlite est d'environ 0.87 %. [3]

c) Lédéburite :

Elle se présente sous forme d'agrégat appelé (eutectique) de plaquettes et globules alternés de cémentite et de perlite. [1]

d) Graphite :

Le graphite c'et une structure cristalline, de type hexagonal. C'est un corps très stable qui ne sera dissocié qu'à 3650 c° par sublimation. Sa masse volumique set très faible (2,2 kg/dm^2), sa résistance est très faible en traction. [1]

e)Cémentite :

C'est une combinaison chimique du fer et du carbone qui peut dissoudre du carbone jusqu'a une concentration de 6.7 % pour former un carbure de fer, Fe_3C, appelé cémentite. C'est une combinaison chimique très dure (HB =600 a 700). un usinable aux outils de coupes ordinaires, sa charge de rupture à la traction est élevée : 175 à 1200 da N/mm^2. Son allongement et sa résilience sont très faibles. [3]

1-4-1-Différente Aspect du Graphite :

Ces différents aspects sont en fonction de la composition chimique, de la vitesse de refroidissement et des traitements thermiques ultérieurs effectués dans les pièces. Les graphites se présentent sur les formes suivantes :

- Graphite lamellaire.
- Graphite nodules. -

Graphite sphéroïdal. **[11]**

1-4-2-Types des Graphites :

- **Graphite Lamellaire :**

● Type A : graphite en lamelles réparties uniformément (figure 3a). 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 hypoeutectique (le plus souvent : épaisseur supérieure à 20 mm dans la coulée en sable ; carbone équivalent 4,0 à 4,4 %). [3]

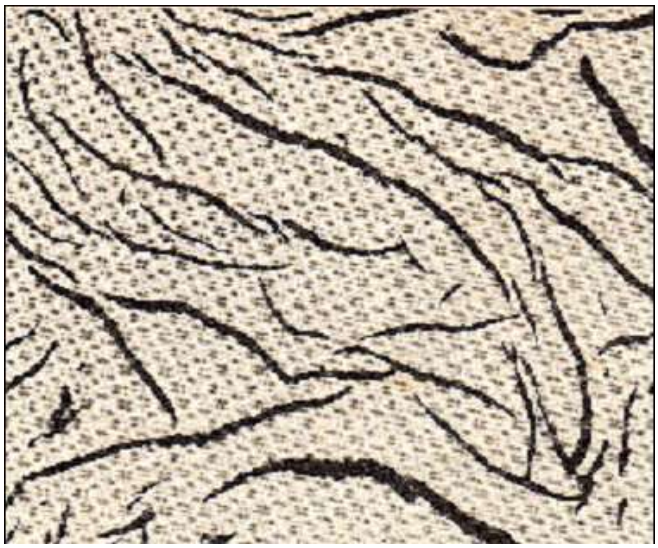


Figure 3a : Graphite en lamelles (type A) [6].

● Type B : graphite en rosettes (figure 3b). 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). [3]



Figure 3b. Graphite en rosettes. [6]

● Type C : graphite en lamelles et amas de graphite (figure 3c). On n'observe cette structure que dans le cas de fontes hypereutectiques 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 hypereutectique 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 hypereutectique de la fonte n'est pas masqué à la solidification par une surfusion importante (figure 3c).



Figure3c : Graphite type C (lamelles superposées). [7]

● Type D : graphite inter dendritique sans orientation préférentielle ou graphite de surfusion (figure 3d). 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.[7]



Figure 3d : Graphite interdendritique de surfusion (type D). [7]

- **Graphite en Nodules:**

Il est réparti dans la fonte sous forme d'amas ou nodules (inscrits dans des cercles de 0,005 à 0,2mm 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 4).

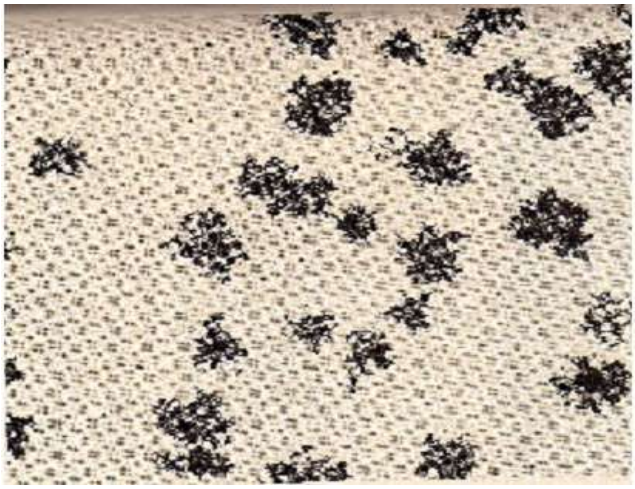


Figure 4 : Graphite en nodules. [6]

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. [5]

- **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. [3] Le graphite sphéroïdal apparaît à l'examen au microscope comme schématisé (figure 5).

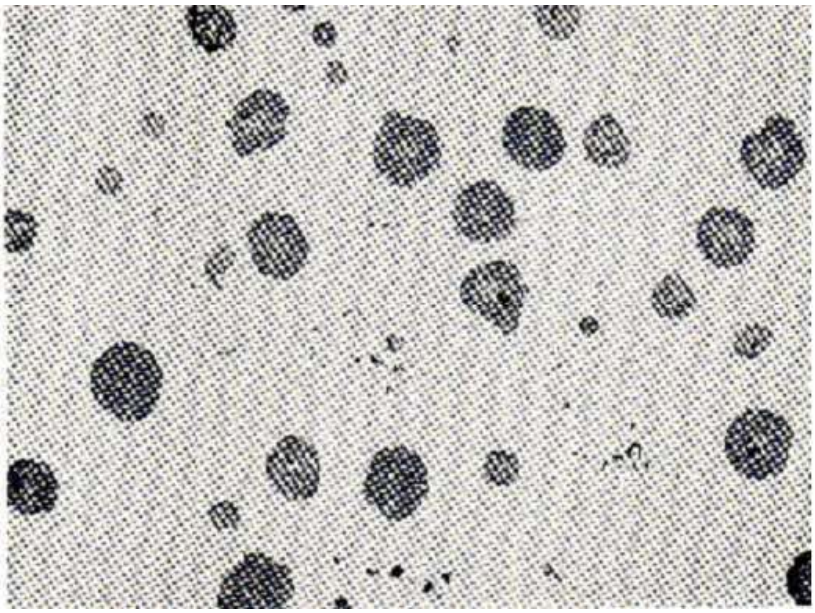


Figure 5 : Graphite sphéroïdal. [7]

2-Différents Types des Fontes :

2-1- Fontes Blanches :

Leur solidification se fait suivant le diagramme fer-cémentite. De ce fait, leur structure est formée d'un réseau important de carbures et d'une matrice perlitique. Leur cassure présente un aspect métallique blanc brillant. Ces fontes ont une bonne coulabilité, légèrement inférieures aux fontes grises.

Il ne faut pas confondre fonte blanche avec les fontes trempées, il ne s'agit pas là d'une fonte martensitique. Une fonte de composition comparable à celle d'une fonte grise, coulée contre un refroidisseur peut se transformer en fonte blanche sur une certaine épaisseur. Cela permet d'allier de bonnes caractéristiques de résistance à l'usure avec une meilleure capacité de résistance aux chocs. Dans la zone de transition entre la fonte blanche et la fonte grise, existe une structure intermédiaire (fonte blanche dans laquelle sont insérées des lamelles de graphite) dite fonte truitée.

Par rapport aux aciers, les fontes blanches présentent une dureté élevée, d'où une grande résistance à l'usure par frottement et par abrasion, par contre cette dureté les rend fragiles et pratiquement inusinables par les moyens courants. [6]



Figure 6: Vue au microscope de fonte blanche.

***Les Caractéristiques :**

-Une excellente résistance à l'usure et l'abrasion ;
-Un bel aspect ;
-Une excellente coulabilité ;
-Difficilement usinable.

Composition chimique	Fonte blanche	Fonte trempée
C_t %	2.8 à 3.6	3 à 3.6
Si %	0.5 à 1.3	0.5 à 1.6
Mn %	0.4 à 0.9	0.25 à 0.7
HB	300 à 575	350 à 575
R_m (N/mm^2)	140 à 350	140 à 350

Tableau 2 : représenté les compositions chimiques et mécaniques de fonte blanche.

2-2- Fontes Grises :

La fonte grise est une famille de fonte où le carbone se trouve sous forme de graphite. La structure graphitique du carbone est obtenue par un refroidissement très lent de la fonte, ou l'ajout de composants graphitisants comme le silicium.
la fonte ductile ou fonte GS est une fonte dans laquelle le graphite se trouve sous forme de nodules (sphéroïdes). Cette microstructure particulière est obtenue par l'ajout de magnésium dans la fonte peu de temps avant le moulage. Le magnésium s'évapore mais provoque une cristallisation rapide du graphite sous forme de nodules. Cette micro-structure lui donne des caractéristiques mécaniques proches de l'acier. [6]



Figure 7 : Vue au microscope de fonte grise.

***Caractéristiques :**

-Facilité d'usinage ;
-Très bonne résistance à la corrosion et à la déformation à chaud ;
-Très bonne absorption des vibrations ;
-Stabilité dimensionnelle (réalisation de machines outils silencieuses et géométriquement stables) ;
-Excellente coulabilité ;
-Prix du métal peu élevé ;
-Relativement fragile comparé aux aciers.

2-3-LES Types des Fontes Grises :

2-3-1- Fonte à Graphite Lamellaire (FGL) :



Figure 8 : Vue au microscope de fonte à graphite lamellaire.

La fonte à **graphite lamellaire** est un type de fonte grise qui est la plus courantes des fontes grises. Comme son nom l'indique, le graphite est sous forme de **lamelles**. La fonte à graphite lamellaire est utilisée pour réaliser des pièces mécaniques, des bâtis de machines, des tuyaux ou des canalisations. [8]

-Qualités, Défauts:

Les fontes à graphite lamellaire sont **facile à usiner**, elles possèdent une très bonne résistance à la corrosion, elles possèdent aussi une très bonne absorption des vibrations. Elles disposent d'une stabilité dimensionnelle, d'une excellente coulabilité. Le prix du métal est peu élevé, elles sont relativement fragiles par rapport aux aciers. [6]

2-3-2- Fonte à Graphite Malléables (FGM) :

- Il existe trois catégories de fontes malléables ;
- fonte malléable à cœur blanc;
- fonte malléable à cœur noir;
- Fonte malléable perlitique;



Figure 9 : Vue au microscope de fonte à graphite malléables.

L'intérêt des fontes malléables est que tout en gardant de bonnes propriétés de coulabilité des fontes, ces matériaux ont des caractéristiques mécaniques se rapprochant de l'acier. [6]

2-3-3- Fonte à Graphite Vermiculaire (FGV) :

La fonte à **graphite vermiculaire** est une fonte grise où le graphite apparait sous une forme qui est entre les lamelles (Fonte à graphite lamellaire) et les sphères (fonte à graphite sphéroïdal). La microstructure de la fonte à graphite vermiculaire est obtenue grâce à un ajout de magnésium moins important que dans la fonte à graphite sphéroïdal. L'avantage de cette technique est de rassembler des qualités de la fonte lamellaire (la coulabilité et l'absorption de vibration) avec des qualités de la fonte à graphite sphéroïdal (notamment la résistance mécanique). Elle est utilisée principalement dans les blocs moteurs de camion. [6]

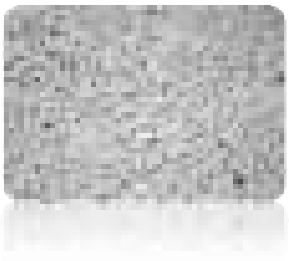


Figure 10 : Vue au microscope de fonte à graphite vermiculaire.

2-3-4- Fonte à Graphite Sphéroïdale (FGS) :

Ces fontes sont caractérisées par un graphite de solidification sphéroïdal répartie de manière uniforme dans la matrice ferritique, ferrito-perlitique, perlitique, perlito-ferritique (à l'état brut de coulée).

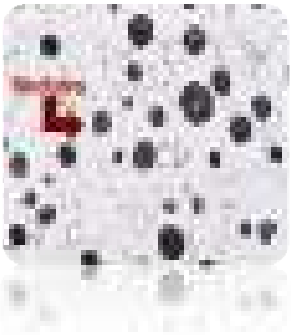


Figure 11 : Vue au microscope de fonte à graphite sphéroïdal.

La fonte à **graphite sphéroïdal**, aussi appelée fonte ductile, possède un graphite sous la forme de **nodules** (sphéroïdes). Ce type de fonte est obtenu par l'ajout de magnésium lorsque la fonte est en fusion. Cet ajout permet la cristallisation du graphite qui rend cette fonte très résistante et élastique (propriétés proche de celle de l'acier). [6]

2-4-Les Familles des Fontes GS :

La majorité des pièces en fonte GS sont produites dans l'un des trois types suivants, lesquels peuvent tous être obtenus bruts de coulée, sans traitement thermique. [9]

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 thermique. Perméabilité magnétique élevée. Dans certains cas, bonne résistance à la corrosion. Bonne usinabilité. [9]

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 (Fe_3C). Relativement dure. Ductilité moyenne. Conductivité thermique un peu réduite. Faible perméabilité magnétique. Bonne usinabilité.

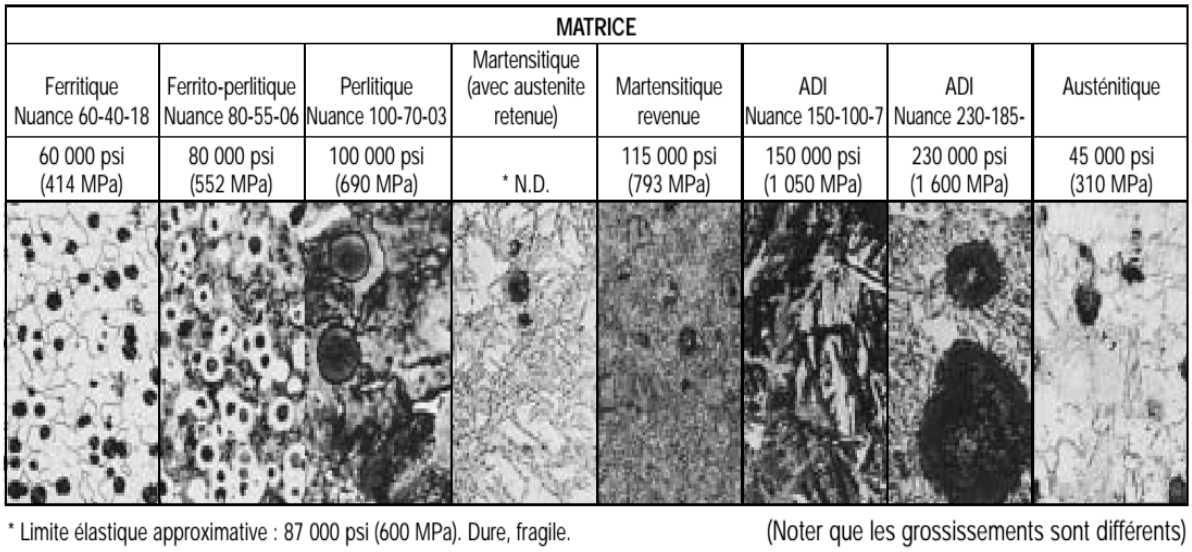


Figure 12 : les matrices des fontes GS**.**

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 600°C, 250 HB de dureté. [9]

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.

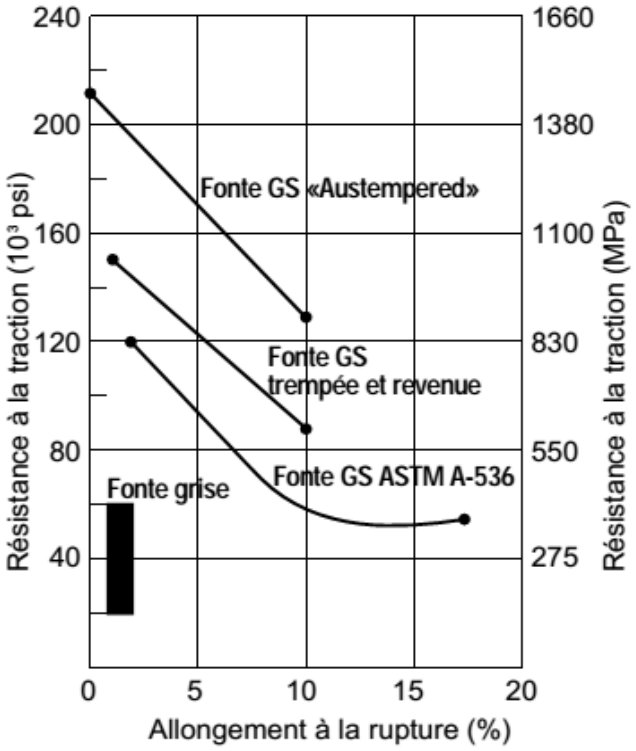


Figure 13 : le feuillet orangé inclus dans la pochette de la couverture arrière de cette brochure présente des renseignements additionnels sur les applications et les propriétés. [6]

2-5-Principe Les Application des Fontes :

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

- Une faible température de Fusion et une meilleure coulabilité que l'acier.
- Une bonne résistance a 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 el dimensions recherchées.
- Les fontes G.S perlitiques sont utilisées en raison de leurs excellentes qualités de frottements, dans la fabrication d'engrenages de vilebrequins de moteurs, de segments de pistant 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.). [10]

3-Etude des Fontes GS :

3-1 – Pourquoi La Fonte GS ?

La ductilité, c'est-à-dire la capacité du matériau à se courber, se tordre ou se déformer plastiquement sans cassure est considérée comme une mesure de sécurité.
Dans la figure 14, en compare les modules de résilience (indicatifs de fiabilité en service) de 04 matériaux.
A hautes valeurs d'allongements. La résilience la plus élevée est évidemment celle de l'acier moulé, suivi des GS ferritique puis perlitique, alors que la résilience de la fonte grise est nulle (elle casse facilement).

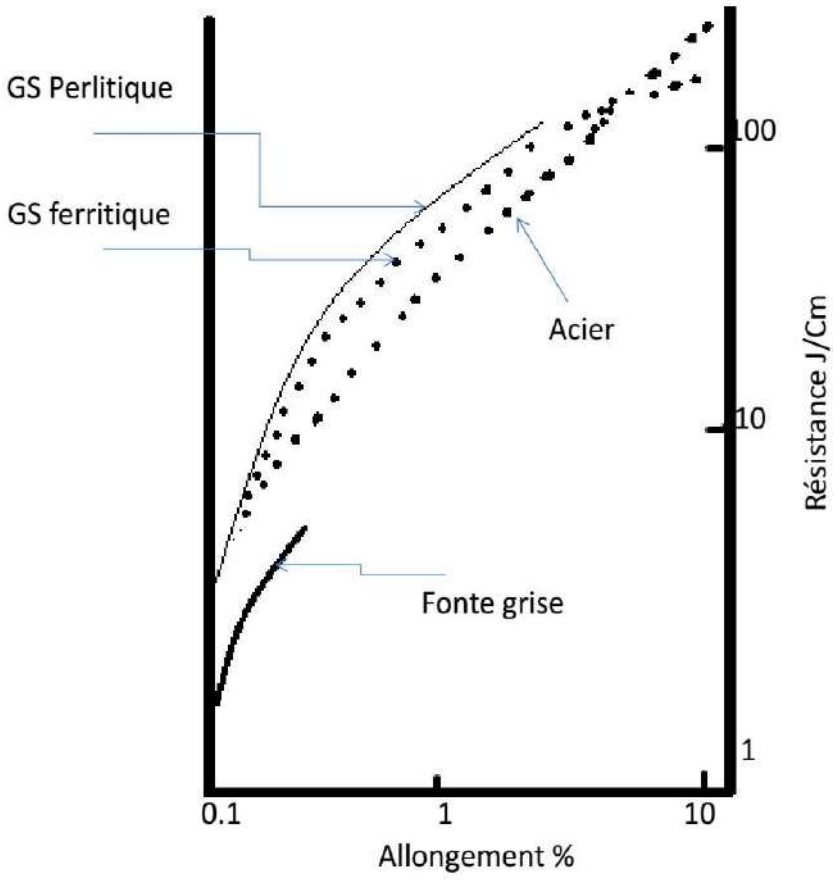


Figure 14 : Fiabilité de 0.4 alliage ferreux**.** [11]

3-2-Élaboration du Métal Liquide :

La fonte grise ordinaire est élaborée au cubilot à vent froid, à vent chaud, au four électrique ou même dans d'autres types de four. Ces divers engins de fusion absorbent, pour certaines raisons techniques et économiques, des charges différentes ; ils produisent des fontes liquides qui, pour une composition déterminée, n'ont pas exactement les mêmes propriétés et qui

appellent, plus ou moins nécessairement, des traitements métallurgiques correctifs. Nous énumérons ci-après les principaux caractères de l'élaboration contribuant à déterminer la structure et les propriétés. [12]

3-2- 1- Élaboration des Fontes GS :

L'élaboration de la fonte à graphite sphéroïde consiste principalement au magnésium, suivi d'une inoculation au Ferro silicium, d'un bain de l'état liquide, composition chimique et de pureté bien définies.
L'action du magnésium ou du cérium à une teneur variant de 0,2% à 0,1% dans la fonte ordinaire en fusion dans des poches appelées poches de traitement, nous donne la fonte GS.
Certaines précautions doivent être prises :
- vu que le Mg à une température d'ébullition de 1100 C°, son immersion dans la fonte donne lieu à des projections de fonte liquide, d'où l'utilisation d'alliage qui abaisse cet effet :

15%Mg +85%Ni ou 15%Mg +30%Ca+50%Si+5%Fe

- le Mg est très avide d'oxygène et de soufre, il se combine avec ses derniers et s'élimine presque totalement d'ou l'intérêt de disposer d'une fonte de base, désoxydée et contenant très peu de soufre pour éviter la perte du produit sphèroidisant.
-certains éléments dit poison (Pb, Bi, Ti,…. Etc.) à très faible teneur provoque la dégénérescence du graphite sphéroïdal. La production exige donc une matière première rigoureusement choisie. [12]
A l'état brut de coulée, fonte GS a une structure :
- Soit perlitique.
- Soit ferritique.
- Soit ferrito- perlitique.
-Soit perlito-férritique

3-3- Désulfuration :

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

3-4- Sphéroïdisation de La Fonte (G.S) :

L'obtention de la fonte G.S se fait par un traitement de la fonte liquide au magnésium qui en abaissant la teneur en soufre et en oxygène de la fonte, permet au graphite de la forme sphéroïdal en plus de ça le magnésium augmente ainsi considérablement les caractéristiques mécaniques de la fonte. La technologie de l'addition du magnésium est dominée par le fait que sa température d'ébullition est de l090°C. [10]
Pour se faire on peut :
- le diluer dans des ferro-alliages divers (alliages sphéroidisants).
- Introduire celui-ci A l'aide d'un plangeur au fond de la poche.

- Le placer au fond d'une poche et le protéger par des tôles ou de la ferraille légère dont la fusion retardera le contact avec la fonte jusqu'au remplissage complet de la poche. Cette technique dite **méthode sandwich.**
- Utiliser un appareil spécifique tel que le convertisseur George Fisher.
- Immerger dans la fonte un tube d'acier fourré d'alliages sphéroidisants et déroulé à une vitesse telle que ce dernier, après fusion doit libéré les ferre-magnésium et une profondeur prédéterminée dans la poche.
- Déposer la sphéroïdisation a l'entrée du système de coulée dans le moule en cherchant à assurer l'élimination complète des crasses produites par filtration et décantation successives (procédé in-Mold). [13]

3-5- Inoculation et Post- Inoculation :

Pour combattre la tendance des fontes à la solidification blanche (fontes lamellaires ou fontes traitées au magnésium) on procède a l'inoculation de produits graphitant (Fe-Si 75% par exemple).
Cette inoculation peut se faire séparément ou successivement à la poche, dans le jet de coulée ou à l'entrée du système de coulée (post-inoculation) en utilisant des produits en poudre ou sous forme de petits morceaux déposés darées une cavité du canal de coulée. [13]

3-6-Système Fer-Carbone-Silicium :

Les fontes se composent de plusieurs éléments normaux (Si, Mn, P, S, C….ect) et éléments d'addition (Cu, Cr, Ti, V, Mg……ect). Ces éléments peuvent se dissoudre dans les phases Liquide et solide de la fonte (ferrite, austénite, cémentite, graphite) faisant varier les conditions de leur équilibre. Ils peuvent aussi former avec le fer, le carbone et entre eux des liaisons chimiques indépendantes.
Les influences d'une impureté x sur l'équilibre des phases des alliages Fe-C sont décrites complètement par le diagramme ternaire Fe-C-X.
Nous limitons dans le cadre de la présente étude, à présenter l'influence du silicium sur les fontes ou sa teneur est généralement élevée.
La figure 15 ci-dessous indique les sections verticales du diagramme F e-C-Si pour différentes teneurs en silicium

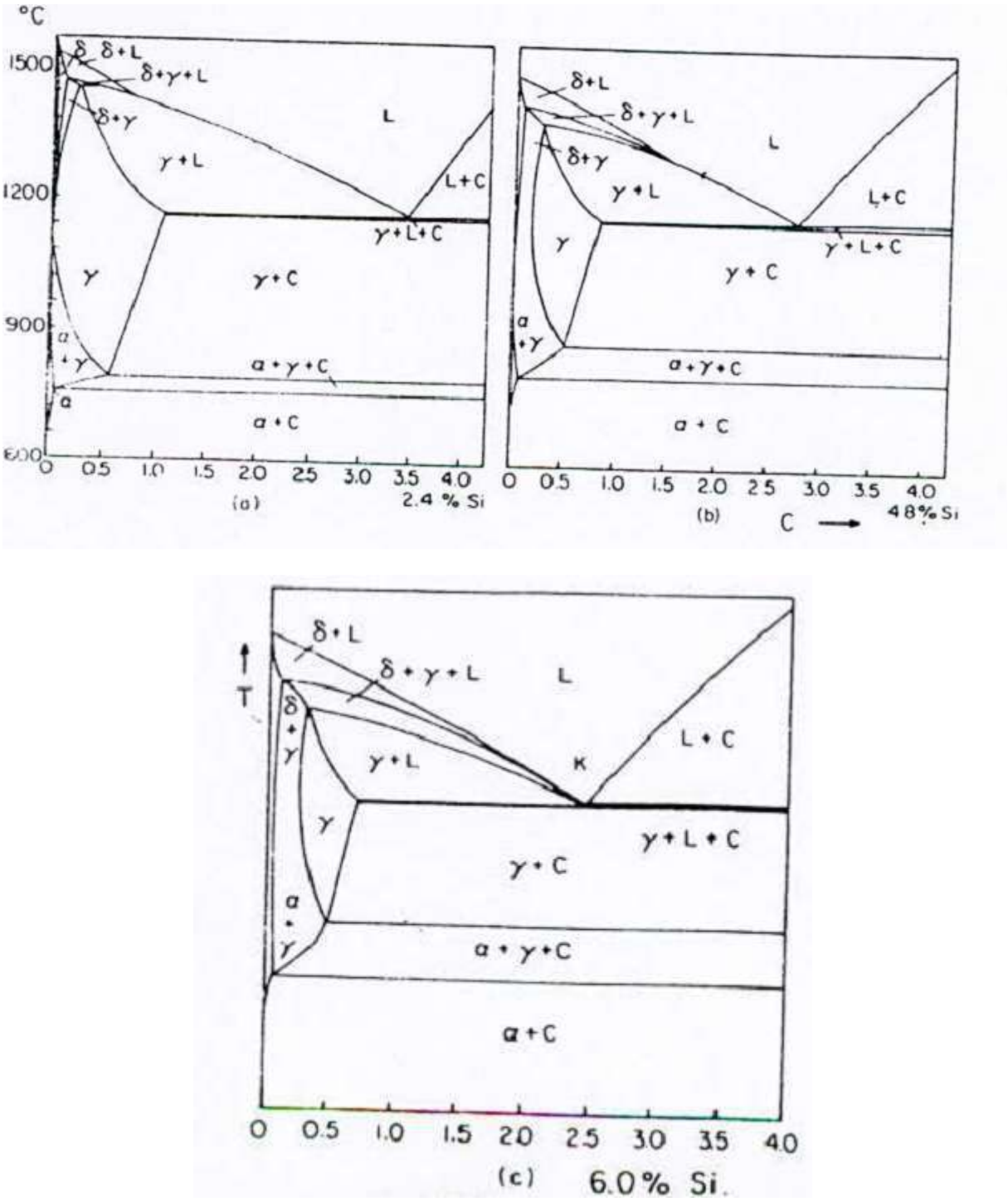


Figure 15 : Le pourcentage de silicium entraine.

-L'abaissement progressif de la température du début de solidification et le rétrécissement du domaine austénitique.

-Le déplacement des paliers eutectique et eutectoide vers le domaine des hautes températures.

- Le déplacement à gauche des points C (eutectique) et S (eutectoide) vers de plus faibles concentration en carbone (la teneur de l'eutectique diminue de 0.3% par pourcentage de silicium. [14]

3-7- Système Fer-Carbone-Phosphore :

Dans les fontes industrielles courantes, la teneur en phosphore est comprise entre 0,03 et 1,2 % ce qui amène, par analogie avec la classification des producteurs de fonte neuve, à distinguer entre les fontes hématites (P < 0,15 %), les fontes phosphoreuses (P > 1 %) et les qualités intermédiaires qu'on pourra dire semi-hématites ou semi-phosphoreuses selon qu'elles seront plus proches de l'une ou de l'autre des catégories précédentes.
L'introduction du phosphore dans un système fer-carbone modifie profondément le mécanisme de solidification. Nous donnerons, pour illustrer l'influence de cet élément, la projection du diagramme ternaire Fe-Fe_3C-Fe_3P, étant entendu que, dans sa partie utile ici, le diagramme stable Fe- P perlite en est probablement très peu différent. L'important est la formation d'un eutectique ternaire à bas point de fusion (953 °C) et contenant 6,9 % P et 2,4 % C , en raison de la faible solubilité du phosphore dans l'austénite, le constituant dit eutectique phosphoreux ou stéatite apparaît effectivement (quoi qu'en quantité négligeable dans les fontes hématites) dans toutes les fontes industrielles sous la forme d'un agrégat de phosphure de fer Fe_3P, d'austénite (transformée ultérieurement en ferrite ou en perlite) et, dans certains cas, de carbure de fer Fe_3C. Si, en raison de la graphitisation naturelle, le carbure de fer ne se forme pas, ou s'il est décomposé artificiellement par recuit, l'eutectique phosphoreux ne contient plus que Fe_3P et l'austénite transformée : il est dit alors pseudo binaire, pour ne pas le confondre avec l'eutectique binaire du système Fe-P (à 10 % de phosphore celui-là ; température 1 020 C). La bonne connaissance du double diagramme Fe-C ainsi que de la forme générale des diagrammes Fe-C-Si stable et Fe-C-P est indispensable pour l'interprétation des propriétés essentielles des fontes grises. On peut admettre que les influences du silicium et du phosphore se superposent dans les fontes industrielles ; c'est ainsi, par exemple, que la position par rapport à la composition eutectique peut être estimée grâce à la confrontation du diagramme Fe-C et de la notion d'équivalent en carbone. [14]

3-8-Solidification et Transformation à L'état Solide des Fontes :

Les fontes G.S sont majoritairement de composition eutectique ou hypoeutectique. Lors de la solidification, c'est le graphite qui se forme en premier dans le bain liquide sur le site de germination constitué lors de l'étape de l'inoculation. Les sphéroïdes formés s'entourent ensuite d'une grain austénitique, appelées cellules eutectiques à travers laquelle le carbone doit diffuser pour les faire croître. (La figure 16) schématise les mécanismes de solidification

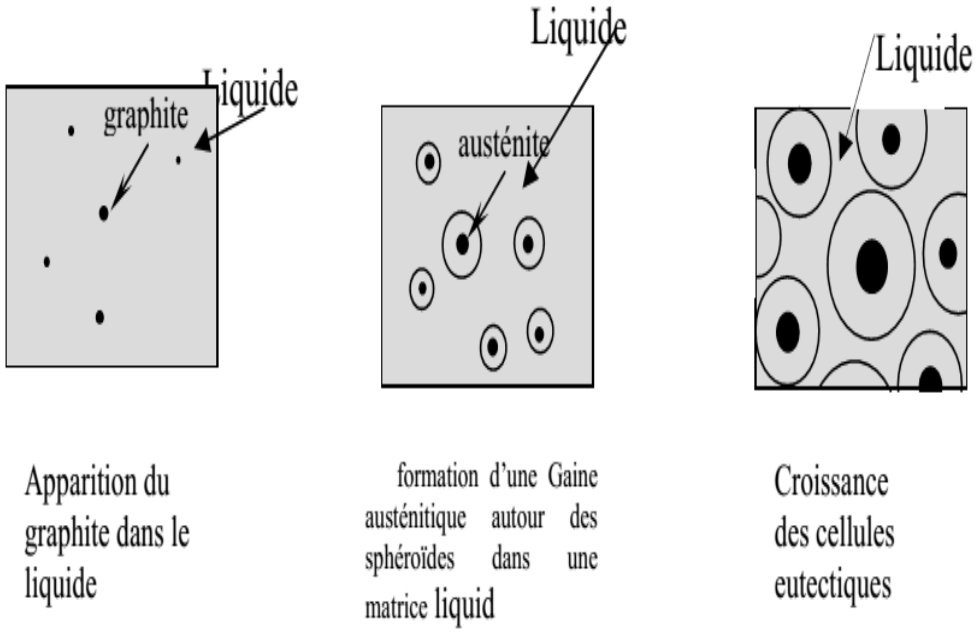


Figure 16 : Description schématique de la solidification d'une fonte GS hypereutectique .

La solidification des fontes usuelles peut être décrite par référence au diagramme de phases du système Fe-C-Si de plus, si l'on admet que le silicium ségrége peu pendant le dépôt proeutectique, quel que soit le dépôt primaire, le chemin de solidification peut être décrit comme une courbe pour laquelle la teneur on silicium demeure constante. Dans de nombreux cas, on peut donc raisonner à partir d'une coupe isopléthe (T, Wc) du diagramme Fe-C-Si, correspondant à la teneur nominale en silicium de l'alliage $°W_{Si}$, pour est présentée sur la solidification des fontes. Une section de ce type est présentée sur la figure 14, où la teneur en carbone a été remplacée par celle en carbone équivalent, Ce définie par Ce = Wc + 0.28°Wsi expression dans laquelle les teneurs sont données en pourcentages massiques.les températures TEG et TEM reportées sur ce diagramme sont respectivement les températures à lesquelles la réaction eutectique stable et métastable respectivement peut commencer au cours de la solidification d'une fonte nominale $°W_{Si}$ en silicium.

La séquence de solidification peut être décrite en mettant en parallèle le diagramme de phases et une courbe de refroidissement typique. Dans le cas d'une fonte hypoeutectique (repère 1 sur la figure17), la solidification commences dés que la température du métal s'abaisse en dessous de la température nominale de liquidus de l'alliage, notée $°T_L$.

La figure17, si l'on admet qu'il n'y a pas de barrière notable à la germination et à la croissance de cette phase.[15]

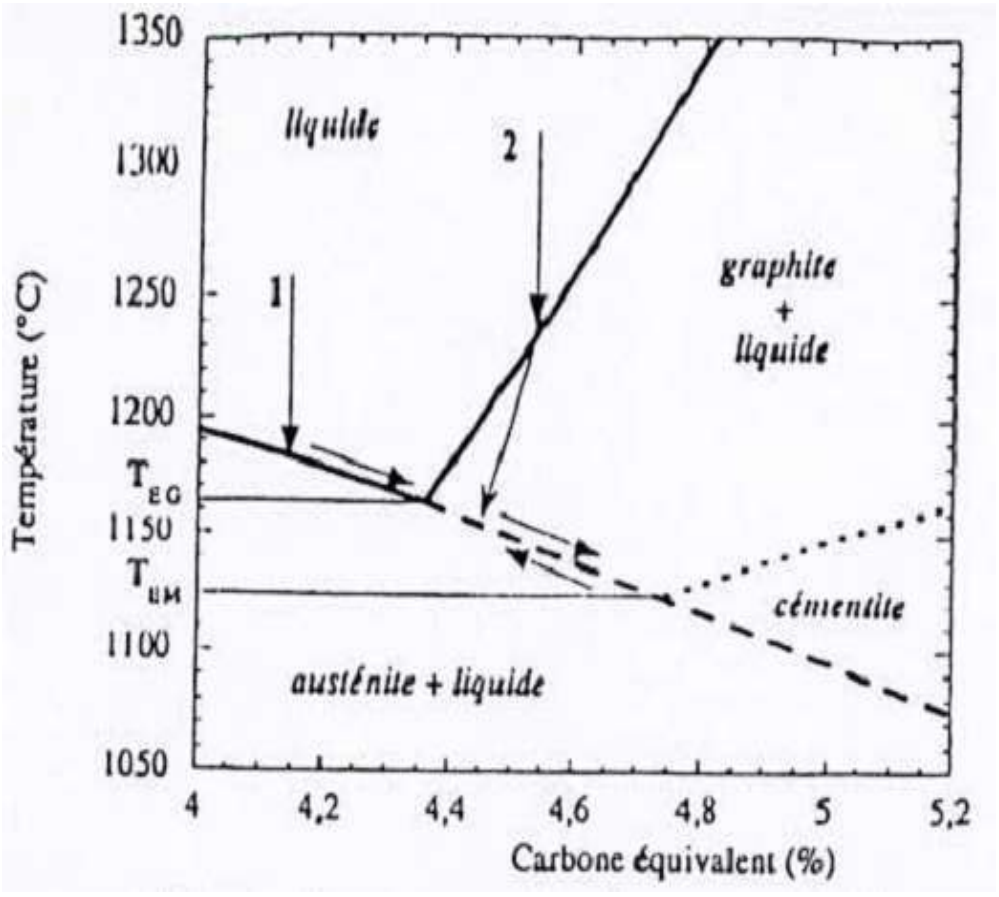


Figure 17 : section partielle du diagramme de phases Fe-C-Si à teneur en silicium fixée.

Les lignes continues correspondent au diagramme de phases stable. La ligne discontinue et l'extrapolation métastable du liquidus de l'austénite.

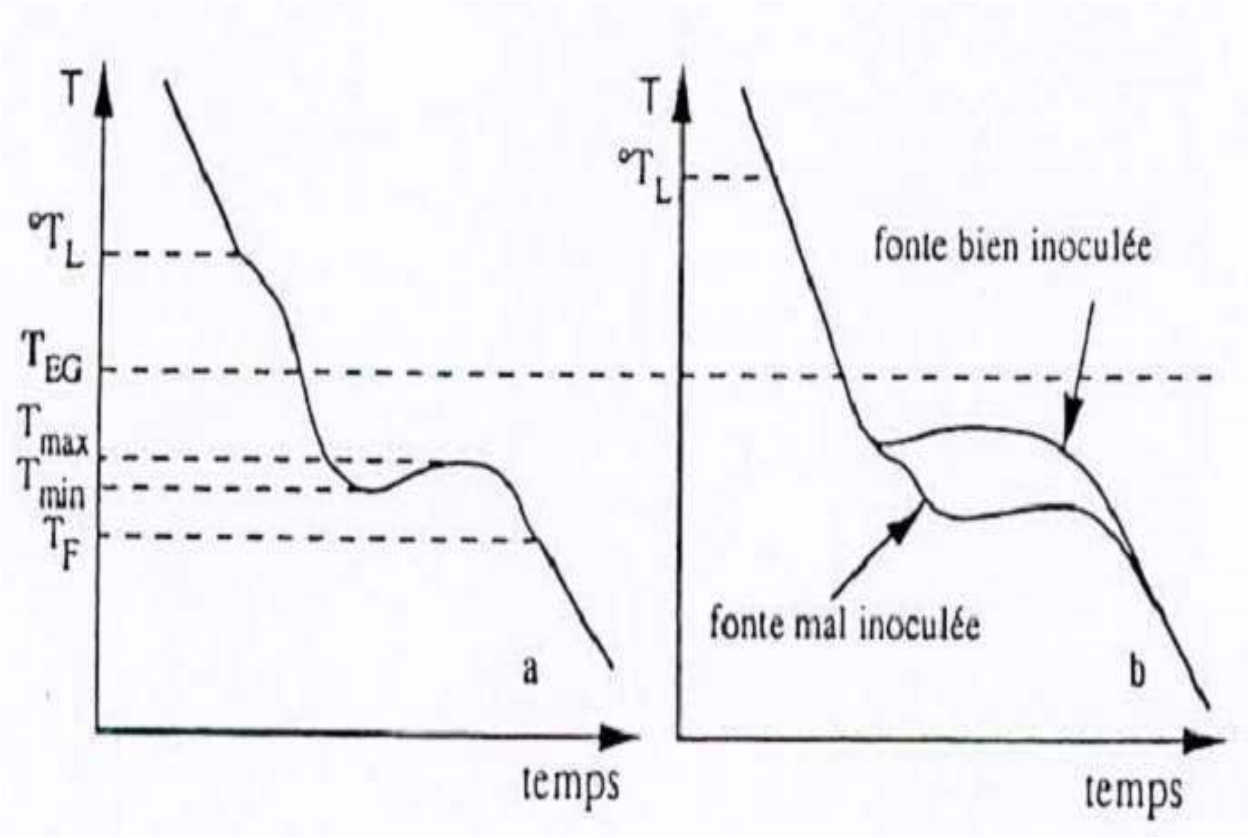


Figure 18 :courbes représentant schématiquement l'évolution de la température en fonction du temps lors du refroidissement et de la solidification d'une fonte à graphite sphéroïdale hypoeutectique (a) hypereutectique (b).

Durant le refroidissement, les dendrites d'austénite croissent dans un liquide dont la composition suit celle du liquidus de l'austénite, quand la température T_{EG} est atteinte, la germination du graphite commence. Les particules de graphites ne peuvent croitre librement dans le liquide que durant un temps très limité avant d'être enrobées dans une coquille d'austénite, l'ensemble formant alors une sphère eutectique figure 18 .

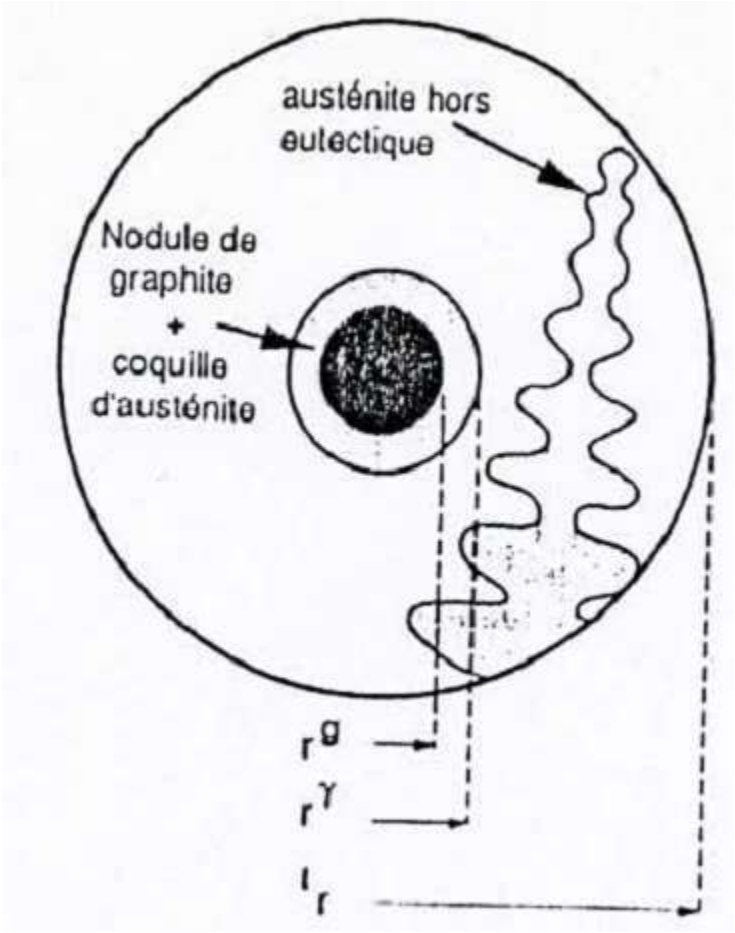


Figure 19 : schéma de l'élément du volume considéré pour décrire la formation de la microstructure d'une fonte à graphite sphéroïdale durant réaction eutectique dans le système stable.

La croissance ultérieure des sphères eutectiques est contrôlée par la diffusion du carbone depuis le liquide vers les modules de graphite au travers des coquilles d'austénite, cette réaction est lente, en regard des réactions eutectiques habituelles, de sorte que, le refroidissement, de nouvelles sphères eutectiques apparaissent progressivement. On imagine fort bien que la croissance des dendrites primaires peut se pour suivre durant ce refroidissement, et l'on considère que la composition du liquide résiduel suit alors l'extrapolation métastable du liquidus de l'austénite représentée en trait discontinus sur la figure 19.

4– Influence des éléments D'élaboration :

4-1– Action des éléments (FGS) :

a- Le carbone :

On le trouve sous forme de graphite et combiné au fer. On a remarqué que l'augmentation du carbone graphitique se fait plus rapidement que celle du carbone total. C'est pour cette raison que l'on peut dire que le carbone est un élément graphitisant. [10]

a-1- Différents Types de Carbone :

***Carbone combinée (Fe $_3$C) :** c'est un carbure de fer appelé cémentite ou carbone combiné : C_c.

***Carbone Libre :** c'est le graphite, on l'appelle aussi carbone graphitique ou carbone libre :C_g.

-En solution solide

-En graphite

***Carbone Equivalent:**

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

$$\mathbf{Céq= C+1/3(si+p)}$$

Dans laquelle les teneurs sont exprimées en pourcentage massique. Cette expression simplifiée existe sous d'autres formes ou plus complètes (pour tenir compte de l'influence des autres éléments) ou tendant à être plus exactes. Ainsi, on propose :

$$\mathbf{Céq=C+1/4\ Si+1/2\ P\ \ ou\ encore\ \ C\ éq=C+1/4{,}5\ Si+1/2\ P}$$

Cependant, l'expression simplifiée, comparée à la teneur en théorique de l'eutectique des alliages fer-carbone, soit 4,3 %, suffit à l'interprétation courante des courbes d'analyse thermique (contrôle du métal liquide et peut être mise encor relation grossière avec les propriétés qui, comme la résistance la traction, dépendent de la quantité de graphite. Des réflexions approfondies sur la signification exacte de l'équivalent en carbone, sur sa comparaison à l'indice de saturation Sc (d'emploi répandu en Allemagne).[10]

***Carbone total** (C_t):

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

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.

$$\mathbf{C_t=C_g+C_c}$$

***Degré d'eutecticité :** se situe à 4.3% de C pour les fontes grises et à 4.25% de C pour les fontes blanches. Dans le cas d'une fonte alliée on se sert de l'indice de saturation du carbone Sc.

$$\mathbf{Sc = \% Ct / D}$$

$$\mathbf{D = 4.25 \text{ ou } 4.3 -(0.31\ Si) - (0.25\ P) + 0.07\ (Mn - 2S) - (0.14\ Cr) - (0.11\ Ni) - (0.16\ Al) - (0.4\ Mo)}$$

Si Sc < 1 : Fonte hypoeutectique
Si Sc > 1 : Fonte hypereutectique
Si Sc=1 : fonte eutectique.

C'est l'élément graphitisant. Comme dans les fontes grises ordinaires, la matrice de la fonte GS est hypo ou hyper ou eutectique suivant l'indice de saturation en carbone S_c.

$$\mathbf{S_{c.} = \% c / \% c_{eq}}$$

$$\mathbf{C_{eq} = [4{,}25 - 0{,}3si - 0{,}25p + 0{,}07\ (Mn - 2S) - 0{,}1cu \ldots\ldots] - 0{,}2}$$

Le carbone équivalent est donné par la relation : en fonction des titres en éléments principaux Si, P, Mn, ……. 0.2 est la perte estimée en carbone admise pour le traitement de sphéroidisation.

a) pour les pièces épaisses : on choisit un $c_{eq} < 4{,}3\%$
Soit en pratique : $c_{eq} = 3{,}8$ à 4%
L'optimum serait de rechercher la composition eutectique pour assurer la meilleure coulabilité ainsi qu'un minimum de la tendance à la retassure.

b) pour les pièces minces : l'eutectique réel est décalé par rapport au diagramme d'équilibre par ce que la solidification de la fonte se fait avec une surfusion d'autant plus élevée que la vitesse de refroidissement est plus grande, c'est-à-dire que la pièce est plus mince. [18] [17]
Le décalage de l'eutectique a lieu :

- Vers la droite pour le titre en carbone.
- Vers une plus basse température pour la réaction eutectique.

b- Le Silicium :

Le silicium est un élément graphitisant qui doit être toujours suffisamment abondant pour éviter la formation d'une fonte truitée, c'est-à-dire de plages blanches.
Le tiers du si total est légèrement, de ce fait, supérieur à celui d'une fonte grise.
Le si accroit la vitesse de diffusion du carbone dans l'austénite lors de la formation des sphéroïdes de graphite.
Le si durcit la ferrite et augmente la résistance de la ferrite et de la fonte. [18]

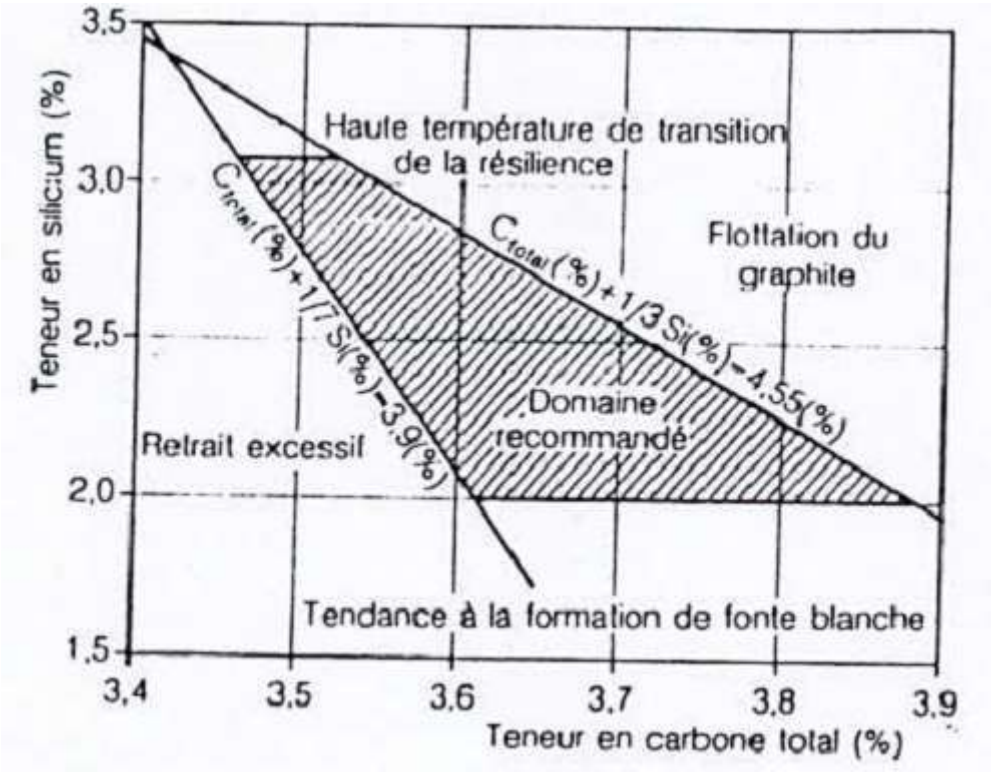


Figure 20 : fonte à graphite sphéroïdale : variation des teneurs en carbone et en silicium et facteurs pratiques qui tendent à limiter se domaine.

c- Le Manganèse :

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

Etant donné le faible teneur en S de la fonte GS, le rôle du Mn n'est pas de désulfure, comme das la fonte grise lamellaire, mais de dénitrurer, car les nitrures de fer, dus à l'azote dissous, perturbent la graphitisation. [19]

Les nitrures sont en effet des stabilisateurs de carbures.
La désulfuration se fait au sulfure de silicium Si.
Pour la fonte GS ferritique on mantient Mn < 0.2% .
Pour la fonte GS perlitique on mantient Mn > 0.4%

Un titre Mn > 0.4% peut faciliter l'obtention d'une matrice perlitique en favorisant la formation de cémentite fero-manganése $(Fe, Mn)_3 C$ dans la perlite.

d-Le soufre :

Son titre est toujours très faible pour :

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

En effet le Mg est un désulfurant très actif et la part qui sert à la désulfuration ne peut plus servire à la sphéroidisation du graphite.
-éviter la formation de sulfure de Mg (MgS), qui donne des inclusions néfastes aux caractéristiques mécaniques des moulages. [19]

e-Le Phosphore :

Son influence s'ajouterait à celle du Si pour fragiliser la fonte GS.

Il agit en fragilisant les joits de grains et en provoquant une rupture inter granulaire , le P en ségrégeant aux joints des grains, peut former des phosphures qui abaissent la résilience. Nous avons vu que le steadite est dure et fragile.

Afin de conserver une bonne ductilité dynamique (résistance au choc) à la fonte GS, qui est aussi appelée fonte ductile, on maintient le titre en P aussi bas que possible et dans tous les cas P < 0,08% . [20] [5]

f-Le Magnésium :

C'est élément à la fois :

- blanchissant de la matrice .
- sphéroidisant du graphite .

le titre en Mg résiduel nécessaire pour la sphéroidisation doit être d'autant plus élevée que les moulages sont plus épais.
Pour les piéces minces %Mg = 0.03% suffit.
Pour les piéces de moyenne épaisseur il faut : %Mg = 0.045 à 0.065%.
Seul le Mg dissous dans le liquide est actif pour la sphéroidisation.
Le fondeur doit tenir compte qu'il s'en perd :
-par évaporation : la pert de 0.001% à 0.003% de Mg par minute du temps passé entre le début du traitement en poche et celui de coulée.

-par formation d'un peu de sulfure de MgS :
D'où la nécessité de prévoir un certain excés de Mg, tanant compte de ces pertes, pour le calcule du lit de fusion et des additions en poche. [20]

g-Le Cuivre :

L'addition de Cu dans le lit de fusion de la fonte GS entraine, au refroidissement dans l'état solide une perlitisation de la matrice.

Le Cu étant graphitisant, comme le Si, lors de la solidification on peut se permettre de baisser le titre en Si.
Par contre le Cu est antigraphitisant au cours du refroidissement (étant solide) de l'austénite à travers le domaine eutectoide, soit vers 700 °C.
L'addition de Cu évite ainsi la ferritisation directe.
En variant la teneur en Cu on obtient à vilonté :

. une fonte GS à matrice ferrito-perlitique.

. ou une fonte GS à matrice totalement perlitique.
En l'absence de cuivre, la matrice est ferritique. [20] [14]

h-Chrome :
C'est un élément très durcissant et carburigène. Il affine la perlite, améliorant ainsi les caractéristiques mécaniques.

Avec 1% de chrome, apparition de carbures.
Avec 2% de chrome, la fonte devient blanche
Avec 12% de chrome les carbures s'affinent
Avec 30% de chrome la structure est une ferritique au chrome donnant une bonne résistance à la corrosion.

i-Étain :
Cet élément est intéressant dans les pièces courantes de fonderie, lorsque l'on veut obtenir une matrice perlitique. Ainsi avec 0.1% de Sn seulement, on transforme une matrice ferrito-perlitique en une matrice perlitique. [14]

j-Molybdène :
Élément carburigène, il favorise la formation de structure aciculaire et affine celle -ci Bonne action sur la résistance aux chocs. On l'associe souvent au nickel et au chrome en addition de 0.3 à 1%. On peut en trouver jusqu'à 10% dans les fontes blanches.

k- Nickel :
Soluble dans le fer, il n'est pas carburigène. C'est un élément graphitisant, trois fois moins énergétique que le silicium. Il affine la structure et plus on en ajoute, plus il modifie celle-ci qui passe de perlite en martensite, puis en austénite.

4-2– Analyse Chimique élémentaire :

Les fontes GS sont des fontes potentiellement grises, c'est-à-dire des alliages qui, sans traitement particulier à la sortie du four de fusion, donneraient à la solidification dans un moule en sable une fonte grise.
La composition chimique élémentaire est fixée par le fondeur en fonction de :

- La structure désirée.
- L'épaisseur des moulages.

5-Traitement Thermique Applique Aux Fontes GS :

5-1.-Généralité :

Les fontes sont constituées d'une matrice analogue à un acier mais à teneur variable en carbone, dans laquelle se trouvent des particules de graphite de forme sphéroïdale dans le cas des alliages qui nous concernent.
Cette matrice, qui, brute de coulée peut être composée de ferrite et d'une certaine quantité de perlite est modifiable par traitement thermique suivant les mêmes principes qu'un acier : trempe, revenu, recuit, etc. Il convient toutefois de souligner le rôle important joué par le graphite au cours des transformations de la matrice des fontes :
- le graphite est une réserve de carbone qui permet à la matrice de se saturer par dissolution et diffusion en tendant vers l'état d'équilibre prévu par les diagrammes, notamment en phase austénitique au cours d'un maintien au-dessus du point de transformation Ac_3,
- par le processus inverse, lorsque la solubilité du carbone décroît, l'austénite rejette cet élément qui tend à précipiter sous forme de graphite [NAG85] (formation d'une coquille sur les sphéroïdes préexistants ou bien parfois formation de nouveaux sphéroïdes) ou d'un autre composé selon le cycle thermique utilisé.
Ce la permet de dire que les matrices des fontes se transforment par traitement thermique comme des aciers, mais dont la teneur en carbone varierait en fonction de la température et du temps. Il est ainsi possible d'obtenir, à partir d'un même alliage, une très large gamme de propriétés mécaniques, qui va de la ductilité élevée, propre aux aciers bas carbone jusqu'aux résistances importantes, caractéristiques des aciers à haute teneur en carbone.
Pour définir précisément les traitements thermiques appropriés afin d'obtenir les caractéristiques mécaniques souhaitées, il est important de disposer des diagrammes de transformation de type T.R.C (Transformation en Refroidissement Continu) et T.T.T (Transformation-Température-Temps). Des travaux entrepris par A. Ikhlef et al. [IKH82a, IKH82b] ont permis d'établir un certain nombre de diagrammes relatifs à différentes nuances de fontes G.S... Les caractéristiques des 3 alliages utilisés sont répertoriées dans le Tableau 3. [21] [22] [23]

Matériaux	Principaux élément d'alliages (%poids)				Dureté Hv 30
	C	Si	Cu	Mn	
←Fonte ferritique	3,8	3-3,3	/	0,25	160
↑Fonte ferrito-perlitique	3,8	2,3	/	0,25	260
→Fonte perlitique	3,8	2,6-2,7	0,6	0,3	2070

Tableau 3 : Caractéristiques des matériaux utilisés.

5-2- Diagramme T.R.C :

La Figure 21 présente un diagramme T.R.C de 2 nuances de fonte G.S. ayant des teneurs en silicium différentes (matériaux ←et ↑).

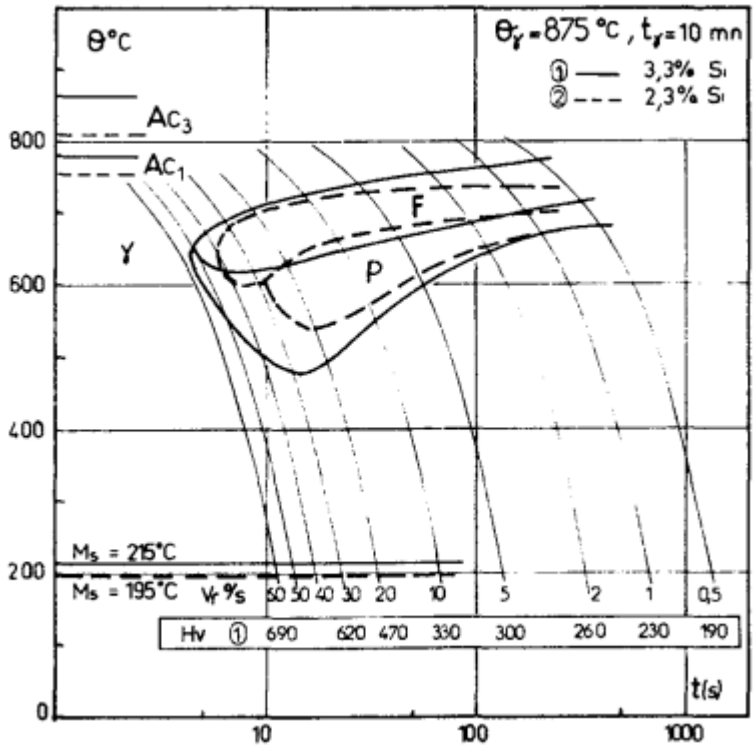


Figure 21 : Diagramme T.R.C pour les fontes G.S. ←et ↑avec 3,3 et 2,3 % de Si (refroidissement continu effectué après un traitement d'austénitisation à 875°C durant 10 minutes). [22]

Pour des vitesses de refroidissement Vr inférieures à 50°C/s il y a formation de ferrite (F) puis de perlite (P). La quantité de perlite, pratiquement inexistante aux faibles vitesses (Vr < 100°C/h), s'accroît progressivement lorsque Vr augmente, et ce aux dépens de celle de la ferrite qui se forme alors principalement dans les régions entourant les sphéroïdes de graphite. Pour les vitesses de refroidissement très rapide (Vr > 50°C/s) la structure est constituée de martensite. Notons que pour ces alliages, et dans ces conditions de traitement la transformation bainitique n'est pas observée. La teneur nominale en silicium n'exerce qu'un effet limité, notamment sur la vitesse de trempe : les diagrammes de la Figure 19 : ne révèlent pas de différence significative pour cette variation de la teneur en Si.

5-3- Diagramme T.T.T :

La Figure 22 représente le diagramme T.T.T d'une fonte perlitique (matériaux →) qui indique les transformations microstructurales intervenant lors de traitements isothermes succédant à une trempe depuis 900°C.

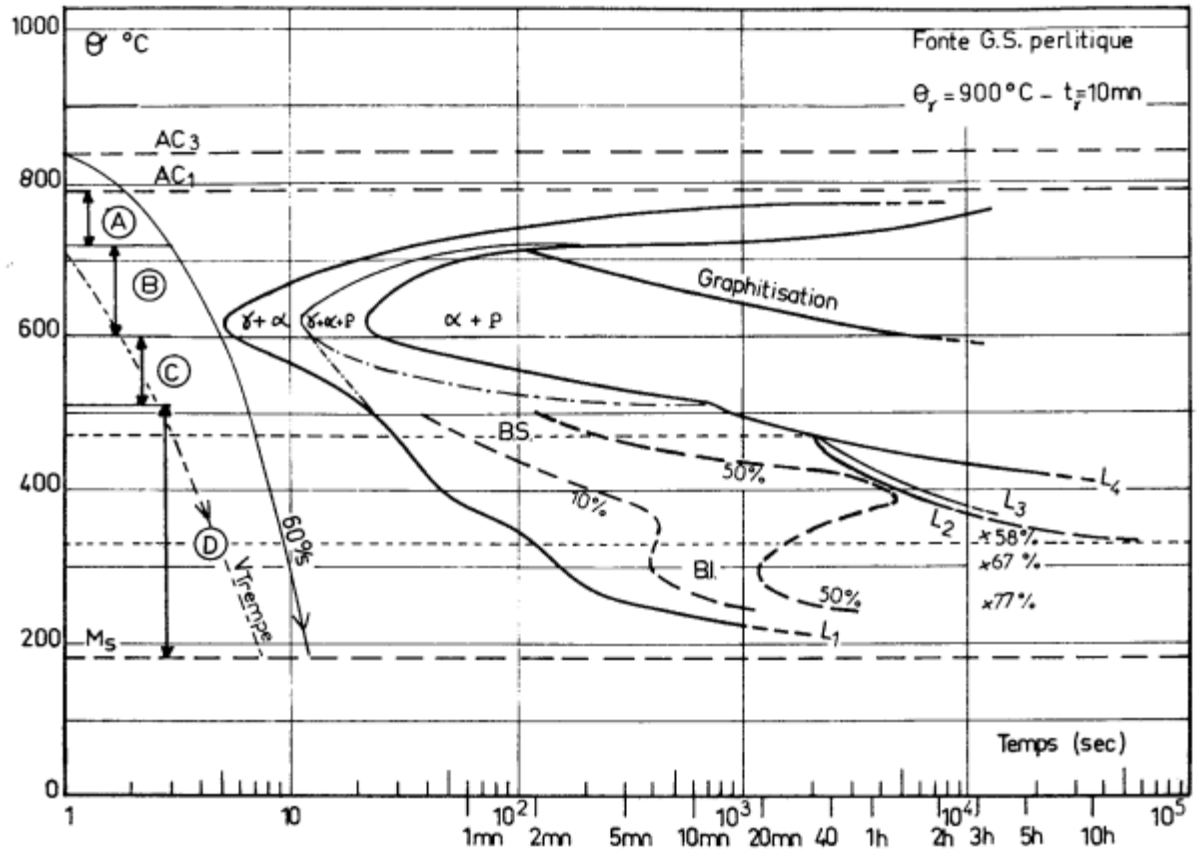


Figure 22 : Diagramme T.T.T d'une fonte perlitique non alliée (austénitisation à 900°C, 10 minutes).

Ce diagramme T.T.T présente 2 grands domaines de transformation qui se chevauchent aux températures moyennes (600 - 500°C) ; ils se différencient essentiellement par la nature des produits formés et les processus mis en jeu au cours de la transformation isotherme de l'austénite.

Domaine supérieur : $510°C < \theta_{iso} < Ac_1$ ⇒Transformations ferritique et perlitique Dans ce domaine l'austénite évolue, soit uniquement en ferrite équipage, soit en ferrite puis en perlite.

- Les plus hautes températures ($\theta > 710°C$) favorisent la diffusion du carbone (provenant de la décomposition de l'austénite) vers les sphéroïdes de graphite. Il se forme, en conséquence, une matrice entièrement ferritique .
- Pour les plus basses températures ($600°C < \theta < 710°C$), la phase mère se transforme successivement en ferrite et en perlite au cours des premiers instants du maintien isotherme. Lorsque ce maintien est prolongé, la perlite formée est susceptible d'évoluer par graphitisation.
- Pour les températures inférieures à 600°C, le processus de graphitisation n'a plus lieu.

Domaine de la transformation bainitique $M_S < \theta_{iso} < 510°C$.

Une transformation de type bainitique plus ou moins complexe intervient lors de trempe interrompue à des températures comprises entre 510°C et le point MS (Température de début de transformation martensitique). La microstructure de la bainite va dépendre de la température de maintien. Ainsi il est possible de distinguer deux variantes, la bainite

supérieure qui se forme dans une gamme de température comprise entre 470 et 330°C et la bainite inférieure obtenue pour des températures inférieures (entre 330°C et le point MS).

Ces transformations qui conduisent à l'obtention de microstructures complexes, qui traite plus particulièrement de ce type de traitement thermique. [22]

5-4- Traitements Thermiques de Ferritisation :

Il n'est pas évident d'obtenir, brut de coulée, une fonte G.S. avec une matrice entièrement ferritique. Il est donc nécessaire dans certains cas d'avoir recourt à un traitement thermique supplémentaire, appelé recuit de ferritisation, son but étant d'éliminer la perlite contenue dans la matrice.

5-4-1-Recuit à des Températures Situées Entre 820°C et 900°C :

Cette gamme de température, située juste au-dessus de l'intervalle de transformation α/ γ (la température est ajustée selon la teneur en silicium) est utilisée pour assurer la ferritisation totale de la matrice. Lors du traitement thermique, nous allons passer d'une matrice ferritique pauvre en carbone et contenant de la cémentite et du graphite à une matrice austénitique pouvant accueillir une quantité plus importante de C (de 0,8 à 2,1% selon la température). Lors du maintien à la température d'austénitisation, le système va se mettre en équilibre et l'austénite va s'enrichir en carbone. Ce carbone provient de la décomposition de la cémentite et également d'une remise en solution partielle des sphéroïdes de graphite [MON00].

Afin d'obtenir une matrice 100% ferritique, il est important de refroidir la pièce lentement autour de Ac_1 (voir diagramme T.R.C, Figure 21). Cette vitesse de refroidissement est fonction de la microstructure du graphite et de la teneur en Si. Plus le graphite est grossier et la teneur en Si faible, plus cette vitesse devra être lente. Il faut déssaturer l'austénite γ lentement pour ne pas former de Fe_3C. Si l'espace entre les sphéroïdes est important de nouvelles sphères de graphite peuvent nucléer et croître. Toutefois la formation de nouveaux sphéroïdes est rare [SCH93] et le carbone diffuse de nouveau vers les sphéroïdes de graphite ce qui provoque l'incorporation de particules de matrice à leurs circonférences, au niveau des zones de dissolution préférentielle [DIE96, MON00]. [22]

5-4-2- Recuit à une Températures Comprise Entre 730°C et 790°C :

La transformation de la perlite en ferrite et graphite peut également être provoquée par chauffage des pièces, juste au-dessous de l'intervalle de transformation, suivi d'un refroidissement lent [CIF83]. Au cours de ce traitement, la cémentite de la perlite est décomposée, et la graphitisation s'opère par une diffusion progressive des atomes de carbone

Vers les sphéroïdes de graphite (voir diagramme T.T.T, Figure 22). En général, le chauffage est effectué à une température comprise entre 730 et 790°C, avec un temps de maintien prolongé par rapport au traitement à plus haute température, suivi d'un refroidissement à une vitesse de 55°C par heure environ. La vitesse de ferritisation est fonction de la teneur en silicium, de la température de chauffage et de la forme du graphite. Lorsque la température du traitement est abaissée, la vitesse de ferritisation diminue rapidement et, au-dessous de 650°C, elle devient trop lente pour que le traitement puisse être réalisé dans des conditions économiques.

Bien que la ferritisation au-dessous de l'intervalle de transformation puisse être complète, le recuit à température plus élevée, avec un maintien dans le domaine austénitique, est parfois privilégié pour s'assurer de la dissolution de tous les carbures libres qui pourraient se trouver accidentellement présents [PAR01]. [22]

5-5- Influence du Recuit de Ferritisation Sur Le Comportement Mécanique :

Les effets d'un traitement thermique de ferritisation vis-à-vis des propriétés mécaniques ont fait l'objet de différentes études [DEC78, LED81, DIE96, MON00]. Le Tableau 4 regroupe les propriétés obtenues à partir d'essais de traction (limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % $\sigma_{0,2}$, contrainte de rupture σ_r et allongement à la rupture A), de ténacité K et de dureté réalisés sur deux nuances de fontes qui diffèrent par leurs teneurs en silicium, à l'état brut de coulée et après recuit de ferritisation. La dissolution de la perlite lors du traitement de ferritisation permet d'améliorer la ductilité et la ténacité, les valeurs de A et K étant plus élevées, par rapport à l'état brut de coulée, pour les deux nuances de fonte. La diminution de la proportion de perlite dans la matrice à tout de même pour conséquence l'abaissement de la résistance en traction ($\sigma_{0,2}$ et σ_r) et de la dureté.

Nuance	état	Matrice	$\delta_{0,2}$ (MPa)	δ_r (MPa)	A (%)	K (KJ/cm^2)	Dureté Hv_{30} Kg
Si : 2,6%	Brut de coulée	50%perlite 50%ferrite	327	513	14	8,5	183
	Ferritisé à 880°C	2%perlite 98%ferrite	277	413	25	1,5	147
Si : 3,2%	Brut de coulée	5%perlite 95%ferrite	350	492	21	4	185
	Ferritisé à 880°C	2%perlite 98%ferrite	315	463	24	5	161

Tableau 4 : Propriétés mécaniques sous sollicitations monotones, traction et ténacité, de fontes G.S. brutes de coulée et après traitement thermique de ferritisation [DIE96, MON00]. [21]

5-6- Traitements Thermiques de Type Bainitique :

La transformation bainitique intervient lors de maintiens isothermes à des températures comprises entre 500°C et le point M_S succédant à une trempe depuis un état austénitique. Les fontes ainsi obtenues sont appelées, fontes ADI (Austempered Ductile Iron) et le traitement thermique de trempe étagée, austempering.

5-7- Traitements Thermiques de Type Martensitique :

Il est possible d'obtenir des fontes G.S. possédant une matrice essentiellement composée de martensite. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une première étape d'austénitisation de la matrice, analogue à celle des fontes ADI, suivie d'un refroidissement avec une vitesse appropriée (rapide), de façon à former de la martensite. Une dernière étape de revenu est généralement réalisée afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées (résistance, ductilité et ténacité) et de réduire les contraintes induites lors de la trempe. Le schéma de la Figure 21 présente le cycle thermique correspondant. [27]

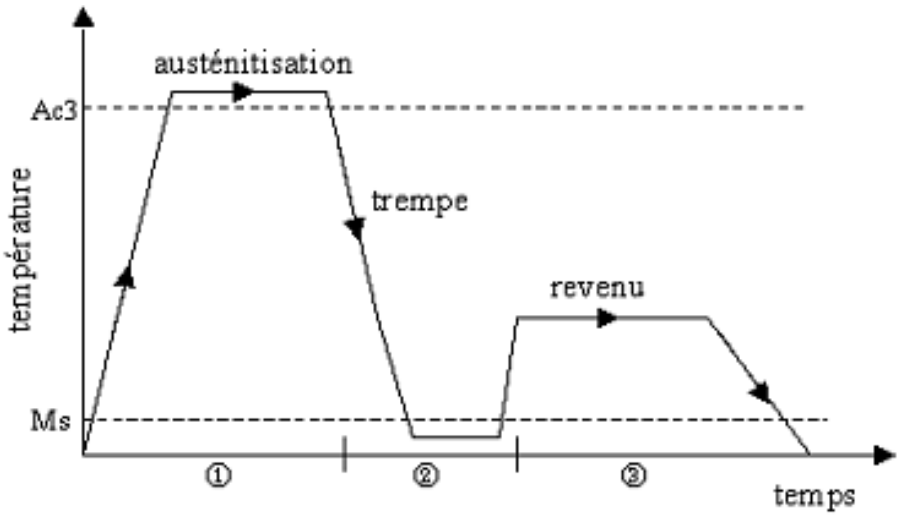


Figure 23 : Schéma du traitement thermique de trempe martensitique suivie d'un revenu.

5-8-Méthode de Traitement :

5-8-1- L'austénisation :

Afin de pouvoir régler les propriétés après trempe et revenu, il convient de choisir la température et la durée d'austénitisation pour obtenir une matrice homogène, suffisamment chargée en carbone, pour répondre aux propriétés recherchées. Comme pour les aciers, la quantité de carbone présente dans la matrice austénitique qui se retrouve dans la martensite règle la dureté de celle-ci. La température d'austénitisation sera d'autant plus élevée que les caractéristiques recherchées le seront, la durée du maintien n'ayant pour objet que d'assurer un même taux de carbone en tout point de la pièce [PAR99].

5-8-2-La Trempe :

La vitesse de refroidissement doit tenir compte de la vitesse critique de trempe, propre à chaque composition de fonte, ceci pour éviter la formation de perlite indésirable. Les vitesses élevées requises sont obtenues par trempe à l'eau, à l'huile ou en bains de sels. La trempe à partir d'une température supérieure à Ac_3produit des constituants aciculaires (martensite) plus ou moins mêlés d'austénite résiduelle [PAR01]. Afin de réduire les risques de tapure lors de la transformation brutale austénite-martensite à la température de formation de celle-ci, une trempe étagée peut être pratiquée ; elle consiste à réaliser, au cours du refroidissement rapide après austénitisation, une halte durant laquelle les températures s'égalisent dans les pièces sans que l'austénite se transforme. La transformation se produit ensuite au cours d'un refroidissement à vitesse relativement faible sans risquer de former de la perlite et sans engendrer des contraintes ou déformations inacceptables. Le refroidissement peut ainsi être composé d'une trempe en bain d'huile ou de sel à une température généralement comprise entre 200 et 350°C, c'est-à-dire au-dessus du point M_S, les pièces sont retirées après quelques minutes, dès que la température est homogène, sans attendre bien entendu que commence la transformation bainitique .Ensuite, elles refroidissent à l'air, la martensite ainsi produite (avec plus ou moins d'austénite résiduelle) pouvant en fin être traitée par revenu [PAR99, CIF83].

5-8-3-Le Revenu :

A Ikhlef et G. Cizeron [IKH84] ont étudié le revenu d'une fonte G.S. après trempe depuis un état austénitique (composition 3,8 % C, 3,3 % Si). Les principales évolutions microstructurales qu'ils observent par l'intermédiaire de différentes techniques (dilatomètre, analyse thermo-magnétométrique, analyse thermique différentielle, micrographie et diffraction des rayons X) au cours d'un chauffage continu se décomposent en quatre stades :

- **Stade I** : 70 – 240°C →la martensite tétragonale (α) rejette le carbone en sursaturation pour donner de la martensite appauvrie (α) et des carbures ε,

- **Stade II** : 240 – 350°C →transformation en ferrite (α) d'une partie de l'austénite résiduelle (γR) ; le carbone rejeté enrichit la fraction restante de cette phase, laquelle se trouve alors stabilisée transitoirement sous la forme γE (austénite enrichie),

- **Stade III** : 425 – 550°C →les carbures de type ε se décomposent, des carbures de transition de type χ apparaissent qui évolue par la suite en cémentite θ. Parallèlement, l'austénite enrichie (γE) se décompose en carbures χ et en ferrite (α),

- **Stade III** : 575 – 700°C →Pour les plus hautes températures, la cémentite se décompose, en restituant le carbone aux sphéroïdes de graphite. [24] [23]

6- Propriétés Mécaniques :

Le revenu de la fonte G.S. trempée, entraîne la décomposition de la martensite et de l'austénite résiduelle en ferrite et en carbures tout en relaxant les contraintes résiduelles de trempe. Ceci a pour conséquence de diminuer la dureté, la résistance à la traction et la limite d'élasticité des fontes trempées, tout en augmentant la ductilité. Lorsqu'une dureté maximale est recherchée, la température choisie sera comprise entre 150 et 200°C, en raison de la formation d'amas de carbone, puis de fins précipités de carbure ε. Cette caractéristique mécanique diminue ensuite à mesure que ces particules grossissent et perdent de leur cohérence [IKH84]. Pour des températures de revenu plus élevées, la dureté va diminuer, en retrouvant une valeur analogue à celle des fontes G.S. ferritiques pour les plus hautes températures, comme le montre la Figure 22 (a).

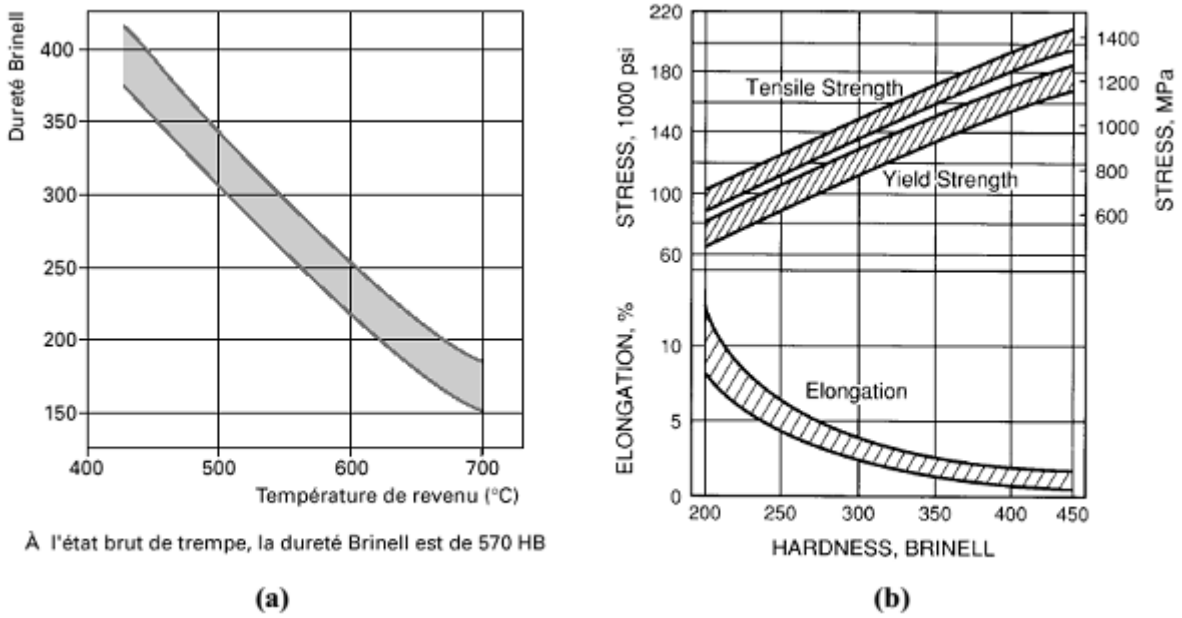


Figure 24(a) : Propriétés mécaniques de fontes G.S. trempées et revenues [SOR90] (a) Influence de la température du revenu (2 heures), après trempe à l'huile, sur la dureté (b) Gammes de propriétés mécaniques obtenues par trempe et revenu de fontes G.S..

La Figure 24(b) illustre l'important domaine de propriétés mécaniques qu'il est possible de couvrir par l'intermédiaire de ce type de traitement thermique. Ce graphique montre l'évolution de la ductilité en fonction de la résistance à la traction et de limite d'élasticité).

CHAPITRE II

technique d'analyse

1- Le Four à Induction :

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

- les pertes au feu sont réduites et constantes.
- les risques d'oxydation et d'absorption des gaz très diminués, sauf en fours à arcs,
- l'obtention des hautes températures est plus facile, ce qui est favorable aux réactions chimiques d'affinage.
- Enfin, les nuisances au poste de travail et la pollution de l'environnement sont en général limitées (sauf pour les fours à arcs polluants), Mais l'énergie électrique est en général plus chère à l'emploi malgré le meilleur rendement des fours. Parmi les types des fours électriques, il existe les fours à induction à creuset, à moyenne ou basse fréquence. [26]

la fusion est assurée par la circulation de courant électrique induit qui parcourt les ferrailles constituant la charge. Le creuset est entouré par un solénoïde parcouru par un courant alternatif de haute fréquence qui crée un flux magnétique alternatif. Les variations de flux magnétique à travers.

la charge créent des courants électriques induits (courant de Foucault) qui génèrent la fusion. Du point de vue électrique, ces fours peuvent être assimilés à des transformateurs dont le secondaire, constitué par la charge, serait en court-circuit.

La pénétration des courants de Foucault à l'intérieur d'un conducteur étant d'autant plus faible que la fréquence est plus élevée (effet pelliculaire), la fréquence du courant doit être ajustée au diamètre du creuset. [25]

Un four à induction se compose principalement des éléments suivants:

A) Le Creuset :

Le creuset comporte un garnissage réfractaire destiné à recevoir la charge métallique autour duquel est montée une bobine inductrice refroidie à l'eau. Un système de rotation autour d'un axe situé près du bec de coulée permet de vidanger le four (figure 1).

Les revêtements acides des creusets sont les plus fréquemment utilisés pour l'élaboration de la fonte et de l'acier. Ce type de revêtement à une bonne résistance aux chocs thermiques.

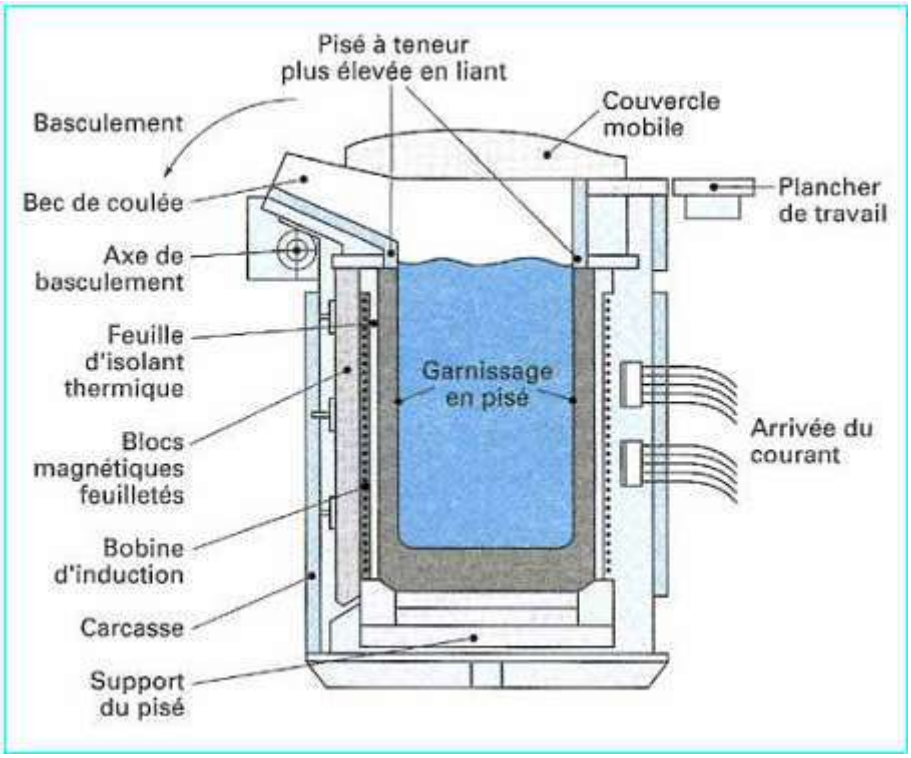


Figure 25 : Four électrique à induction. Schéma type [25]

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

C) Les écrans Magnétiques /Ou Culasses :
Pour réduire les fuites magnétiques et éviter l'échauffement de la carcasse métallique, des écrans magnétiques constitués généralement de fibres isolantes sont intercalés entre la bobine et la carcasse.

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

E) Le Couvercle :
Pour diminuer les pertes thermiques par rayonnement, les gros fours sont équipés de couvercles. Ces couvercles comportent une voûte en acier sur laquelle on dépose un garnissage réfractaire. Des systèmes plus ou moins sophistiqués permettent d'éclipser rapidement le couvercle. Certains fours sont également équipés de systèmes d'aspiration de fumées qui améliorent les conditions de travail. [25]

2- Elaboration de La Fonte GS Alliée et Coulé des échantillons:

L'élaboration de la fonte GS est réalisée à l'U.F.R. La fonte est élaborée dans un four à induction de capacité 6 tonnes. Après la fusion, la fonte est coulée dans une poche de traitement où elle est inoculée par un ferro-silicium-magnésium à 45% de Si et 10% de Mg. Après le traitement de sphéroïdisation et d'inoculation la fonte est transférée dans une poche de coulée. Les échantillons sont coulés dans des moules en sable à la résine furanique .



Figure 26 : Méthode de coulée des éprouvettes.

3- Observation Microscopique:

Nous utilisons cette méthode dans le but d'observer la microstructure de la fonte de base ainsi que la microstructure des échantillons après addition des éléments d'alliage et après inoculation.
Après la finition du polissage, l'examen micrographique sans attaque permet d'étudier le graphite et les inclusions non métalliques.
Pour étudier les autres constituants de la matrice métallique et les carbures nous avons procédé à une attaque chimique au nital 3 %.
L'observation des échantillons a été faite par un microscope optique équipé d'une caméra vidéo marque « Leica » assisté par ordinateur (figure27).
L'ensemble des micrographies ont été prises avec un grossissement de 100.

Ce dernier essai est réalisé au niveau de l'.UF.R.



Figure 27 : Microscope utilisé pour l'étude métallographique.

4- Essais Mécaniques Destructifs :

Notre étude est suivie par la caractérisation de la fonte brut de coulée élaborée de structure perlito-ferritique. Cette caractérisation consiste à évaluer les propriétés mécaniques qui sont : la résistance à la traction, l'allongement, la résilience et la dureté…..
Les éprouvettes pour essai mécaniques ont été usinées selon la norme AFNOR à partir des ébauches (Keel-Blacks) mentionnées précédemment.

4-1- Essais de Dureté :

L'essai de dureté Brinell consiste à appliquer sur la surface polie d'une charge constante et statique F pendant un temps défini (10 à 15 s). Cette charge s'applique par l'intermédiaire d'une bille de diamètre D et à mesurer le diamètre de l'empreinte laissée après suppression de la charge.
La dureté Brinell (HB) est le quotient de la charge F en Kg (ou 1,02 F en da N) de la surface S en mm^2 de l'empreinte considérée comme la calotte d'une sphère de diamètre d.
HB = F/S (Si F en Kg). HB = 1,02 F/S (Si F en da N).

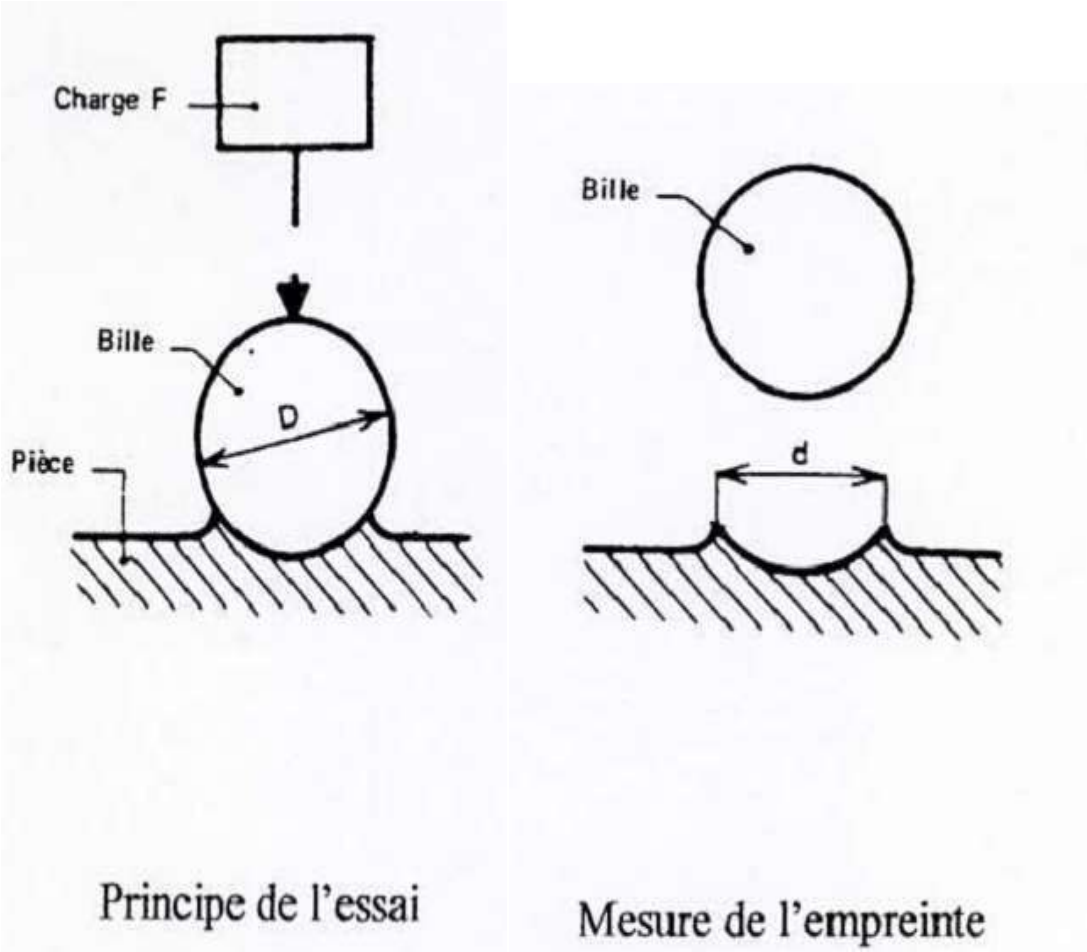


Figure 28 : principe de dureté HB.

La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux. La dureté d'un métal est sa capacité à résister de manière élastique à une contrainte. On la détermine au moyen d'essais normalisés (Brinell, Vickers, Rockwell) en mesurant la profondeur ou le diamètre de l'empreinte faite par un poinçon en fonction de l'essai, lorsqu'on applique une charge donnée.



Figure 29 : Machine utilisée pour l'essai de dureté HB. [28]

4-2- Essais de Traction :

L'essai de traction consiste à exercer un effort de traction de façon continue suivant :
- L'axe longitudinal d'une éprouvette portant deux repères sur une même génératrice et à étudier les déformations de cette éprouvette jusqu'a sa rupture.
L'essai est réalisé sur une éprouvette de forme et dimensions définies par la norme AFNOR NF A32-201, avec une machine de traction universelle USDR selon la norme A03-151.



Figure 30 : Eprouvette de traction.

Le Principe de l'essai de traction (figure 33) montre que l'éprouvette est tenue en deux points (par une pince ou un crochet). L'éprouvette est alors étirée à vitesse constante. Cet essai

permet de tracer une courbe dite de traction à partir de laquelle les caractéristiques suivantes peuvent être déduites :
la déformation élastique en fonction de la force appliquée d'où on peut déduire les dimension de l'éprouvette et le module d'Young ; la limite élastique souvent notée R_e, ou bien la limite d'élasticité à 0,2 % R_e;
la résistance à la traction ou tension de rupture souvent notée R_m, qui est la contrainte maximale atteinte en cours d'essais.

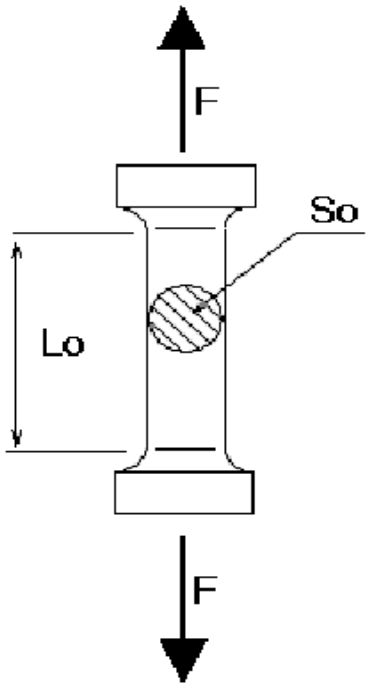


Figure 31: Principe de l'essai de traction.

Pour déterminer la résistance à la traction du matériau étudié, des échantillons sont coupés à partir des barreaux coulés et les éprouvettes sont confectionnées au niveau du complexe de fonderie de Rouïba (figures 32 et 33).

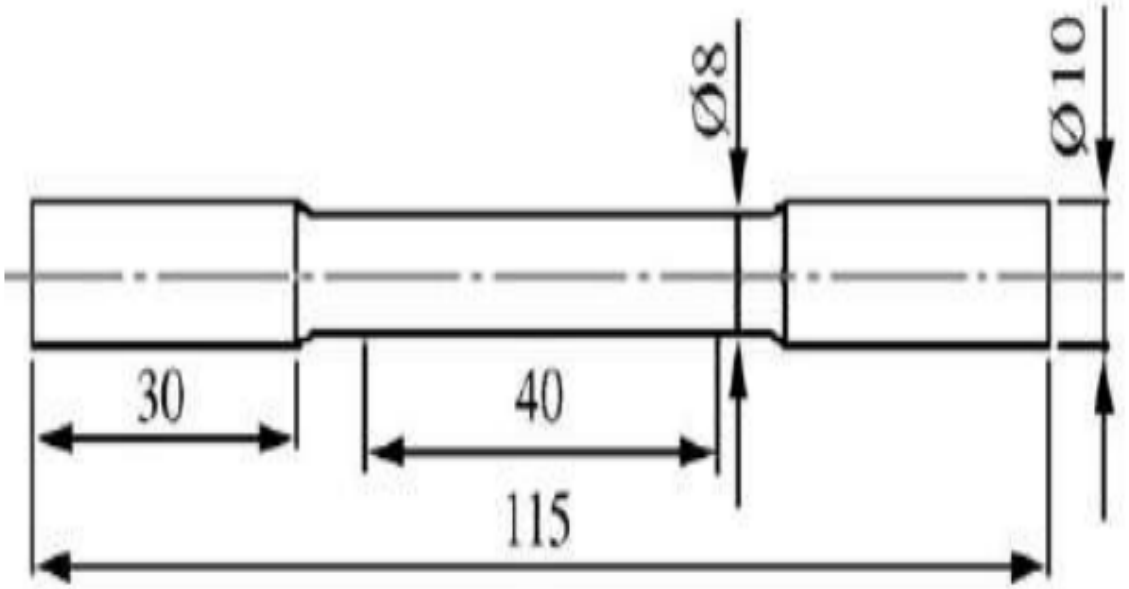


Figure 32 : Forme et dimension de l'éprouvette de traction. [29]

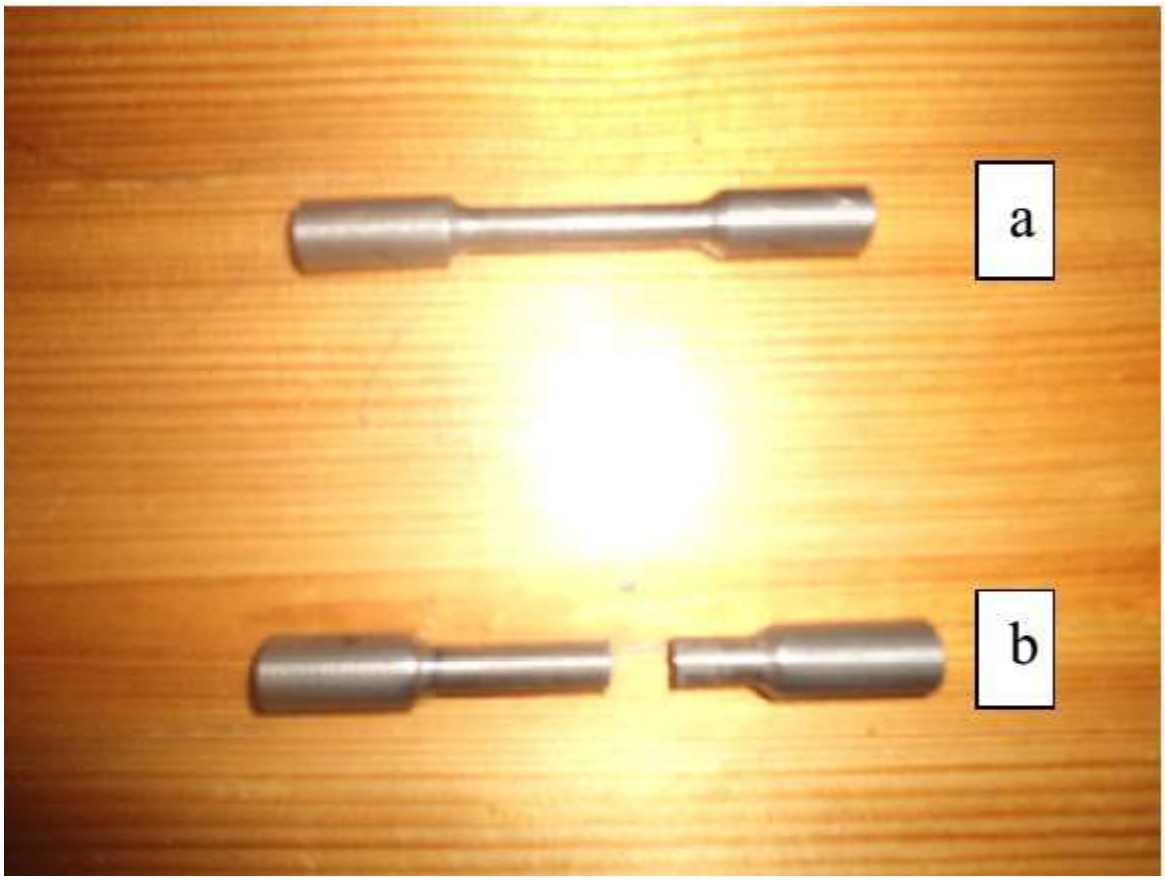


Figure 33 : Eprouvette de traction utilisé

La machine utilisée pour les essais de traction est de type "ZWICK/ROELL Z100" (figure34).



Figure 34 : Machine utilisée pour les essais de traction.

4-3- Essais de Résilience :

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton-pendule dans des conditions définies une éprouvette entaillé en son milieu et reposant sur deux appuis. La caractéristique déterminée est l'énergie absorbée par la rupture exprimée en joules.
La résilience est l'énergie exprimée en joules par cm^2, nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette.

$$K = \text{Résilience} = \frac{\text{Energie absorbée par la rupture (en joule)}}{\text{section de epouvett } (cm^2)}$$

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



Figure35 : éprouvette de résilience.

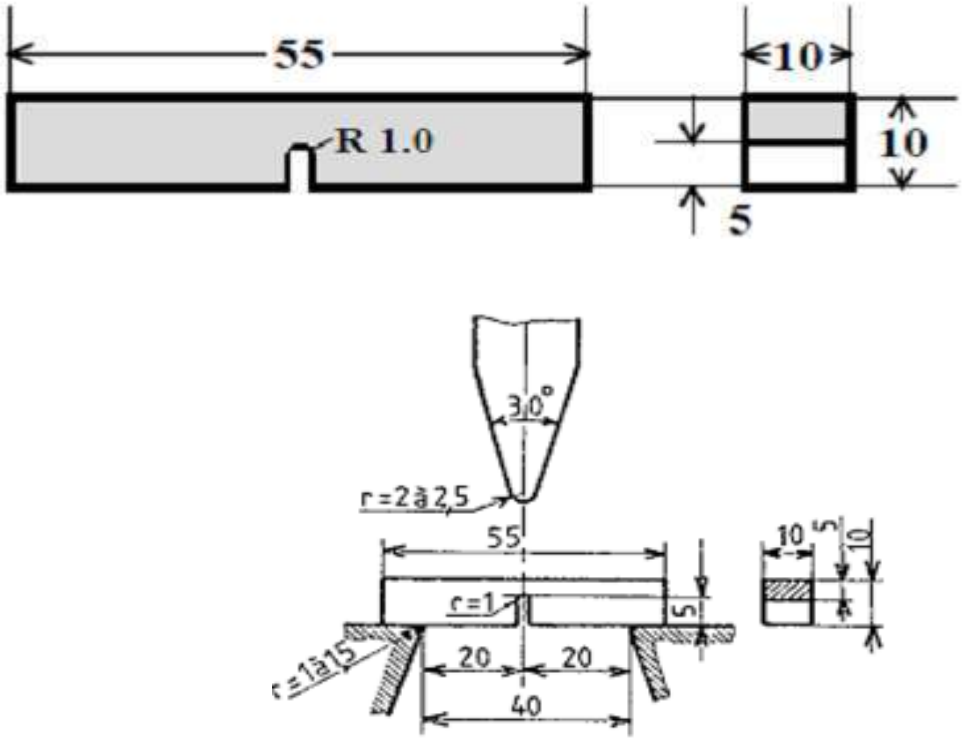


Figure 36 : Forme et dimensions de l'éprouvette de résilience.

L'essai de choc (résilience) a pour objet de déterminer la résistance des matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture, à l'aide d'un mouton de Charpy où un marteau de masse m est fixé à l'extrémité d'un pendule (figure 37).

La résilience est définie comme l'énergie de rupture sous choc (W) ramenée à la section (S) de l'éprouvette à l'endroit de la fissure et calculée d'après la relation suivante : K= W / S. [12]
Les éprouvettes normalisées destiné à la résilience sont obtenues après des opérations de tournage et fraisage des éprouvettes coupées à partir des barreaux cylindriques au niveau du complexe de fonderie de Rouïba.

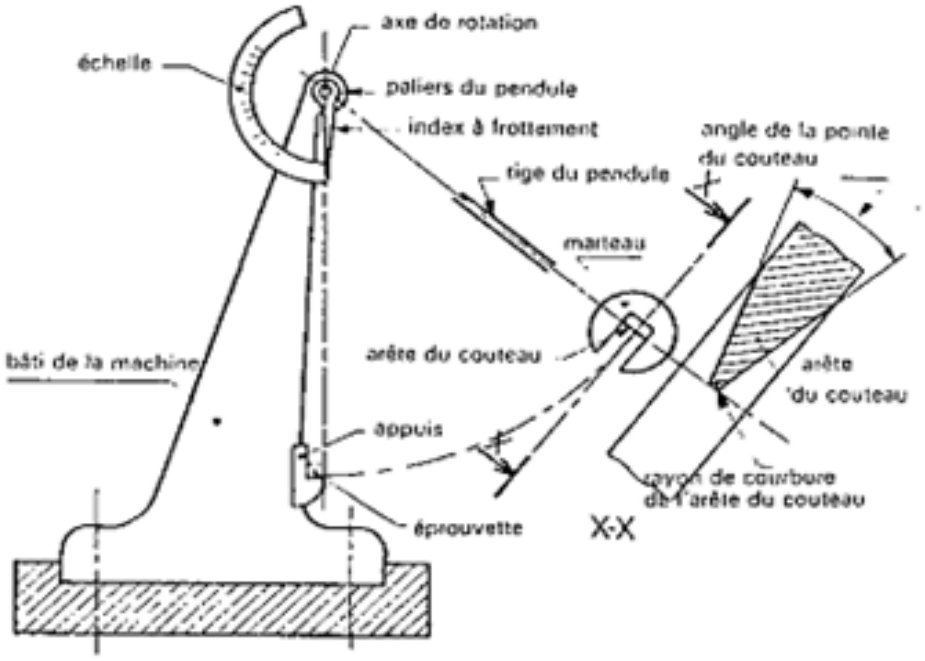


Figure 37 : Principe de l'essai de résilience.

Les figures 36et 37 montrent la forme et les dimensions de l'éprouvette utilisée.
La machine utilisée pour l'essai de résilience est de type "SINTCO" (figure 38). Ces essais sont réalisés au niveau de l'Unité de fonderie-Rouïba.



Figure 38 : Machine utilisée pour les essais de résilience.

4-4- Eprouvette En Escalier L:

L'obtention des pièces en fonte grise sphéroïdale entraine un problème de graphitisation du carbone. Ceci est du à la cinétique de refroidissement, qui est importante pour les épaisseurs minces. Pour connaitre l'influence de la cinétique de refroidissement sur les différentes épaisseurs, on a conçu un type d'éprouvette en escalier (fig37).

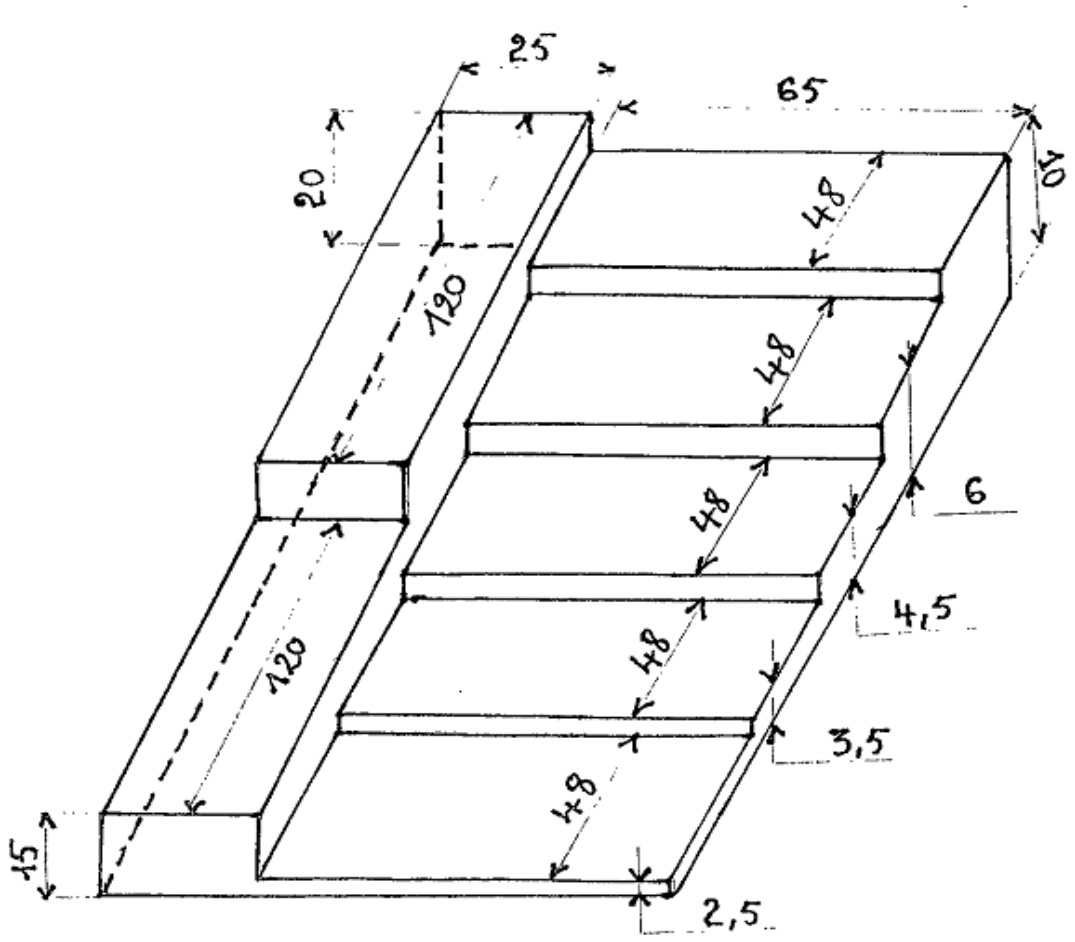


Figure 39 : Eprouvette "Escalier".

A l'issue de la coulée de la pièce en escalier, les éprouvettes ont été prélevées en tenant compte de la nécessité de réaliser les prélèvements dans la zone centrale de chaque paroi de façon à avoir une zone représentative du mode de solidification de l'escalier.
L'étude des vitesses de refroidissement permet de déterminer la forme, les dimensions et l'emplacement des refroidisseurs, pour but de rétablir le mieux possible l'uniformité du *refroidissement* des pièces.
* Coulée des éprouvettes (moulage) : Les pièces échantillons sont coulées à partir des fontes destinées à la production. On doit couler deux pièces échantillons par nuance (GSC 38 – 15 et GSA 56 - 5). Le moule étant en sable constitué de deux châssis, la composition du sable de moulage est :

* Sable silicate	80 à 85%.
* Argile	10 à 12%.
* Noir minéral	3 à 4%.
* Adjuvant	1 à 2%.

Le noir minéral est utilisé pour améliorer l'état de surface des pièces.
L'argile donne une cohésion entre les grains de silice avec la présence de l'humidité.
L'adjuvant est un liant organique, absorbe une quantité importante d`eau.

CHAPITRE III

PARTIE EXPERIMENTALE

1-Introduction :

Les conditions d'élaboration de la fonte (G.S) exercent une influence sur la structure et les caractéristiques mécaniques.
Il existe maintenant deux (02) voies possibles pour 1'obtention d'une structure donnée de fonte à graphite sphéroïdal :
- La première est l'élaboration directe (fonte brute de coulée).
- La seconde indirecte, exige le recours à un traitement thermique.

2-But de Travail :

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

Nos essais ont porté sur l'étude de l'influence de la composition chimique ainsi que le réglage par traitements thermiques de la matrice des deux nuances étudiées à savoir (GSC et GSA).
La fonte GSA caractérisée par une teneur en éléments perlitisants (manganèse et cuivre).

3- Equipement :

Nous avons réalisé ses travaux dans l'unité fonderie de Rouïba (U.F.R) de la Société Nationale de Véhicules Industriels (S.N.V.I).
La figure 40 ci-dessous représente schématiquement les différents ateliers répartis en deux secteurs :

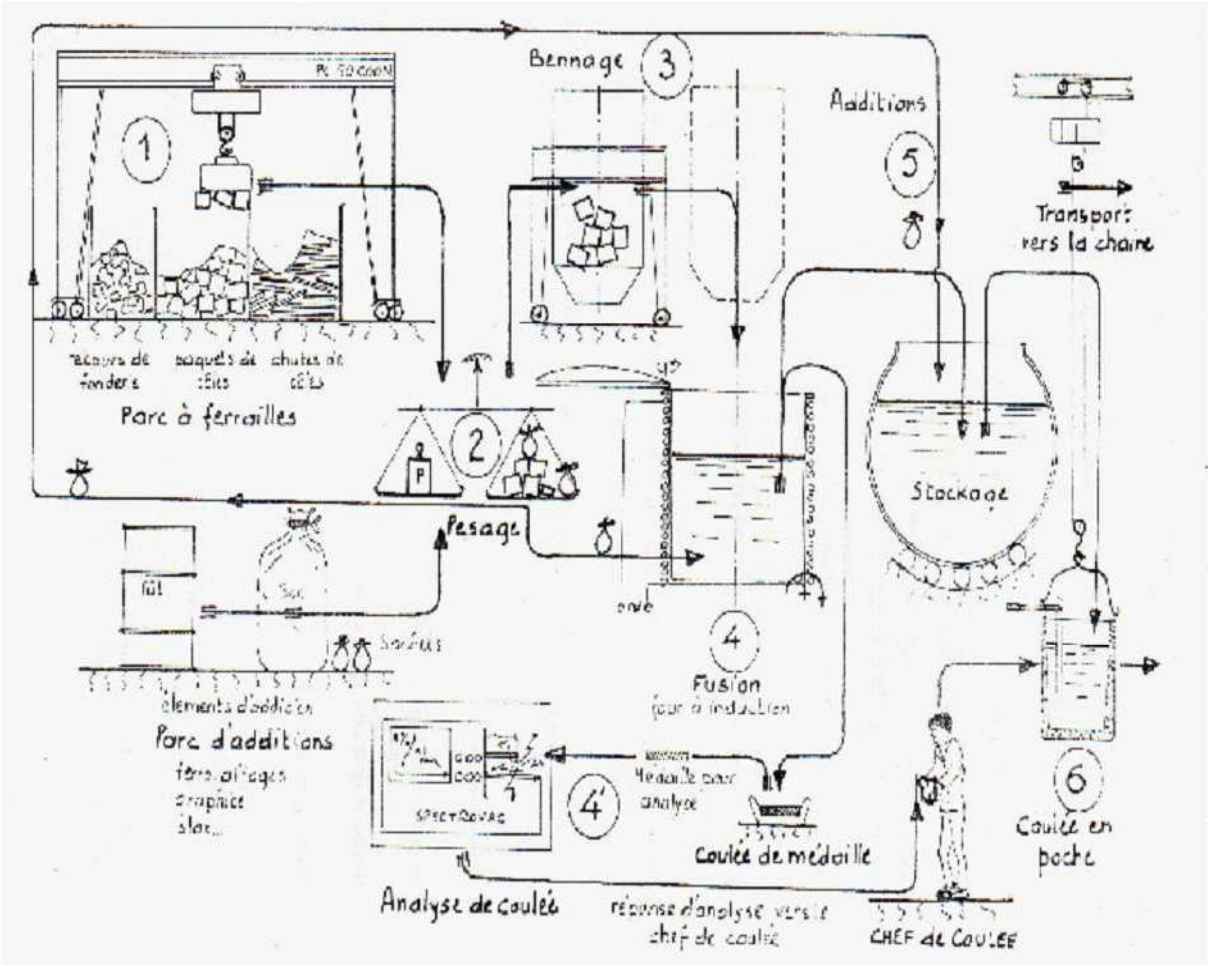


Figure 40 : Opérations d'élaboration de la fonte de moulage .[30]

1) Matière première de fusions**.**
2) Moulage et annexes (sablerie_ noyautage, finition).
Les flèches de la figure 1 indiquent les opérations successives du procédé de fabrication des pièces moulées.
L'élaboration de la fonte se fait dans le 1er secteur à l'aide des équipements suivants :
*Deux fours électriques à arc de fusion de caractéristiques techniques identiques.
- Capacité → 10 Tomes
- Puissance → 21 MVA
- Revêtement → Acide
- Production horaire moyenne → 6 tonnes/h
* Trois fours à l'induction de maintien sans noyau magnétique dont les caractéristiques sont les suivantes :
- Capacité → 14 tonnes
- Revêtement → Acide
- Puissance → 3 MVA

4-Elaboration :

L'élaboration d'une fonte (GS) de structure perlito-ferritique brute de coulée, exige certains paramètres particuliers parmi les quels on cite :
* Le choix d'une composition chimique adéquate au lit de fusion
* Une teneur en éléments pertilisants (manganèse, cuivre) convenable pour régler le rapport perlite -ferrite.
*Une inoculation dans la poche et dans le moule, ...etc.
Donc il est nécessaire de procéder avant tout à un choix judicieux des constituants de la charge.
Les teneurs de carbone et de silicium doivent être comprises pratiquement dans des intervalles de valeurs optimales. Le carbone est pris entre 3,50 - 3,80 % tandis que le silicium entre 2,40 et 2,80 %.
On utilisera dans ce cas des ferrailles d'acier, riblons d'acier d'emboutissage et une fonte neuve (Sorel). Cette fonte est destinée pour l'élaboration de la fonte (GS), elle à de faibles teneurs en S et P. Les retours de moulage comme les jets de coulées, les masselottes,... etc. Sont recyclés dans la charge en fonction de leur composition chimique.

5- Préparation de La Charge:

La préparation de la charge pour l'élaboration des fontes (G.S) doit être faite d'une manière soignée afin de pouvoir introduire les éléments graphitisants tels que le carbone, le silicium,… etc. Et les éléments sphéroidisants comme le magnésium ainsi que les éléments pelitisant en quantités suffisantes comme le cuivre et le manganèse.
II faut éviter d'introduction des éléments nuisibles dans la charge tels que le plomb, l'antimoine… etc.
La composition chimique et la proportion des constituants de la charge (retour de fonderie, aciers, fonte neuve) sont reportées sur les tableaux 5 et 6
- Les retours de fonderie se composent de masselottes, systèmes de coulée et des pièces rebutées en fonte (G.S), Les pièces rebutées de la fonte(G.S.A) apportent une grande quantité de manganèse.
-Les aciers utilisés sont des chutes d'emboutissage profonds, des tôles minces, des chutes d'aciers doux … etc. qui introduisant en plus du manganèse, d'autre éléments tels que : le cuivre, le nickel, le chrome qui sont respectivement alphagène et carburigéne.
- La fonte neuve (Sorel) ou fonte de première fusion apporte essentiellement forte teneur en carbone et de très faibles teneurs en éléments nuisibles tels que le phosphore et le soufre.

Elément	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Pb	$C_{éq}$
Retour	3,70	2,50	0,30	0,015	0,05	0,05							4,55
Acier	0,18	0,20	0,64	0,014	0,019	0,014	0,05	0,014	0,011	0,04	0,035	0,015	0,25
Fonte	4,53	0,5	0,08	0,006	0,027								5,58

Tableau 5 : Analyse chimique des constituants

Constituants	Teneurs(%)	Poids(Kg)
Ferraille	10	100
Retours	70	700
Fonte neuve (Sorel)	20	200

Tableau 6 : Quantités des constituants de la charge

6-Fusion de La Charge:

La disposition des constituants de la charge dans le four électrique é arc exige un ordre bien défini :
*Les tôles d'aciers de récupération sont placées au fond du four afin de protéger celui-ci des chocs de constituants plus lourds.
*Au centre du four on place des gueuses de fonte neuve.
*Les routeurs de fonderie.
*Au-dessus seront disposées des ferrailles légères.
Un choix judicieux des paramètres du régime électrique (intensité, tension et facteur de puissance) permet une fusion rapide et efficace.
La durée de fusion de l'essai A est 2 h, la température de fusion est T = 1470 °C.
Pour l'essai B la durée de fusion est 2 h 10 mn et la température de fusion est T = 1480 °C.
Les compositions chimiques obtenues après fusion sont représentées dans le tableau suivant :

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

Tableau 7 : Composition chimique des essais A et B après fusion.

7 –Maintient et réajustement :

Après décrassage, la fonte liquide est transférée dans une poche de 10 T du four à arc au four à induction. Ceci afin de procéder durant son maintien au réajustement de l'analyse chimique et de la température ainsi qu'à la première étape d'inoculation.
Tenant compte de l'affinité du carbone envers l'oxygène, les quantités de graphite sont ajoutées pour les essais A et B s'élèvent à 60 Kg et 50 Kg respectivement.
L'ajustement du Si est réalisé par l'addition du Ferro-silicium (80% de Si). Les quantités ajoutées sont de 50 et 45 kg pour les essais A et B respectivement.
Les températures enregistrées avant la coulée en poche sont de 1500 °C et 1510 °C pour les essais A ct B respectivement.
Le tableau 8 ci-dessous indique l'analyse des échantillons prélevés après l'homogénéisation du bain.

Elément / Essai	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Pb	$C_{éq}$
A	3,82	2,05	0,30	0,016	0,034	0,077	0,077	0,00	0,002	0,10	0,010	0,016	4,51
B	3,81	1,89	0,43	0,025	0,050	0,011	0,036	0,00	0,004	0,070	0,010	0,023	4,45

Tableau 8 : Composition chimique des bains après réajustement et homogénéisation

8-Traitement de Sphéroïdisation :

Le traitement consiste à additionner de Ferro-silicium-magnésium (Fe -Si-Mg). La méthode utilisée à l'U.F Rouïba est la méthode Sandwich. Elle s'effectue par une introduction de cet alliage au fond de la poche de coulée. On recouvre cet alliage par des tôles d'acier doux fig 38, de façon à retarder le contact avec la fonte liquide. Cela afin de réduire les pertes de magnésium sous l'action de la réaction exothermique. Car la température d'ébullition de magnésium est de 1090 °C et que son immersion brusque dans la fonte liquide provoque sa variation, donc sa teneur dans le bain diminue aussi rapidement que la température est élevée. La coulée doit s'effectuer au plus tard 20 mn après le traitement.

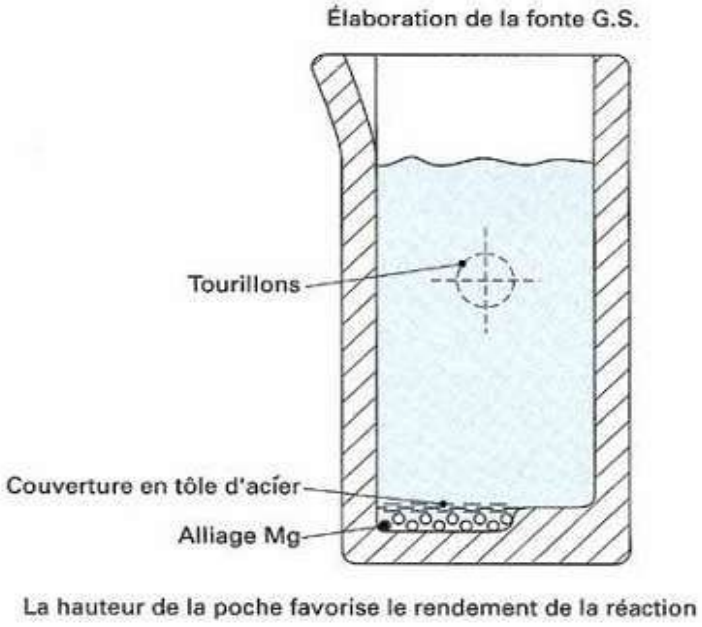


Figure 41 : Principe de traitement de sphéroïdisation

Pour une tonne de fonte, il faut ajouter 17 kg de Fe-Si-Mg et environ 8Kg de couverture (acier doux). La composition chimique Fe-Si-Mg est :

* 8 % Mg

* 46 % Si

* et le reste c'est du fer.

Pour les essais A et B la quantité de la fonte traitée est respectivement 500 et 1000 Kg
Les températures de traitement sont de 1500°C et 1510 °C respectivement.
La quantité de Fe-Si-Mg ajoutée pour l'essai A est de 9 kg ct pour l'essai B de 17 kg

Le tableau 9 suivant indique la composition chimique de la fonte après traitement :

Elément / Essai	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Pb	Céq
A	3,80	2,44	0,29	0,015	0,029	0,097	0,073	0,00	0,002	0,10	0,009	0,015	4,62
B	3,81	2,40	0,43	0,024	0,048	0,018	0,032	0,00	0,004	0,070	0,011	0,023	4,62

Tableau 9: Composition chimique des fontes A et B après traitement.

On présente ci-dessous la composition des deux fonts étudiées et élaborées à la fonderie de Rouïba (U.F.R).

Elément	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Cu%
GSC	3.45 à 3.80	2.50 à 3.00	≤ 1.00	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05
GSA	3.45 à 3.80	2.40 à 2.80	≤ 0.40	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05

Tableau 10 : Analyse chimique.

9 –Addition des Eléments Perlitisations :

Après le traitement de la fonte, celle-ci est versée dans des poches de coulées de capacité de 500 Kg.
Pour obtenir de la fonte (G.S) perlito-ferritique, on y introduit des additions de ferro - manganèse (Fe - Mn) et du cuivre.
Les quantités ajoutées sont les suivantes :
- Essai A subdivisé en 5 essais: A_1...A_5, avec une addition croissante d'un Kilogramme de cuivre pour chaque essai.
- Essai B > addition de 2,5 kg de Fe –Mn à 75 %.
Le Tableau 11 suivant donne les analyses de la fonte obtenue après l'addition de cuivre et du ferro-manganése.

Elément / Essai	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Pb	$C_{éq}$
A_1	3,64	2,45	0,27	0,015	0,029	0,097	0,073	0,00	0,002	0,45	0,009	0,015	4,46
A_2	3,64	2,45	0,27	0,015	0,029	0,097	0,073	0,00	0,002	0,57	0,009	0,015	4,46
A_3	3,64	2,45	0,27	0,015	0,029	0,097	0,073	0,00	0,002	0,64	0,009	0,015	4,46
A_4	3,64	2,45	0,27	0,015	0,029	0,097	0,073	0,00	0,002	0,68	0,009	0,015	4,46
A_5	3,64	2,45	0,27	0,015	0,029	0,097	0,073	0,00	0,002	0,83	0,009	0,015	4,46
B	3,70	2,41	0,60	0,024	0,047	0,18	0,034	0,00	0,004	0,06	0,011	0,023	4,52

Tableau 11: Compositions chimiques des différents bains de fontes après les additions.

10- Inoculation et Coulée :

L'inoculation qui est l'opération de précipitation du graphite est réalisée au moment de la coulée. Elle se fait é l'aide du ferro-silicium à 75% en poudre réparti dans les moules.
Pour caractériser la qualité de la fonte élaborée on a prélevé des éprouvettes (Keel -Blocks) selon les conditions indiquées au tableau 12 ci-dessous :

Essai	T°.de coulée (°C)	Mode de refroidissement
A_1	1399	Air libre
A_2	1384	//
A_3	1370	//
A_4	1356	//
A_5	1329	//
B	1380	//

Tableau12 : Prélèvement d'éprouvettes pour les essais réalisés.

Après la réalisation de l'essai de résilience, on garde une moitié de chaque éprouvette pour l'étude métallographique.
L'obtention de la surface d'examen métallographie nécessite un polissage puis une attaque chimique.

11-Métallographie :

11-1-Préparation des échantillons :

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

11-2- Le Polissage :

Les échantillons prélevés ont subi plusieurs opérations successives de polissage à l'aide de papier émeri de différentes tailles de grains décroissante de 120, 240, 400, 600, 1000 et 1200.
Le polissage fin consiste à polie l'échantillon sur un disque de feutre avec la suspension de la pate diamantée répartie à l'aide d'un diluant sur le disque qui joue aussi le rôle d'un refroidisseur.



Figure 42: représenté machine de polissage.

11-3 –L'attaque Chimique :

La révélation de la microstructure est réalisée par une attaque chimique qui met en évidence les différentes phases de la fonte étudiée. Pour cela les échantillons sont attaqués au Nital de 5% acide nitrique (HNO_3) et 95 % d'éthanol.
Les résultats des examens micrographiques des échantillons de tous les essais sont présentés dans le chapitre 3.

12-Propriétés Mécaniques :

Une des caractéristiques importantes des fontes G.S est la combinaison d'une résistance élevée et une très bonne ductilité.
Ceci est le résultat de la forme sphéroïdal du graphite. [5]
- Le graphite lamellaire affaiblit, en effet ces propriétés à cause des discontinuités créées dans la matrice provoquant une rupture par effet d'entaille.
- La microstructure de la matrice possède un rôle très important sur les propriétés mécaniques de la fonte.

- La structure ferritique a de bonnes propriétés de résistance, une haute capacité de déformation plastique, car la ferrite est ductile résiste aux chocs est facile à usiner, mais sa résistance a l'usure est assez faible. [11]
- La structure perlitique est caractérisée par une résistance à la traction élevée et son allongement relativement faible comparé aux structures férritiques.
- Les structures férrito-perlitiques se caractérisent par des propriétés intermédiaires des structures férritiques et perlitiques.
- Les compositions chimiques et les caractéristiques mécaniques des fontes élaborées par I'U.F.R sont présentées dans les tableaux ci dessous :

Nuance	C	Si	Mn	S	P	Mg	Cu	Ce
GSC 38-15	3,50 3,80	2,40 2,80	0,20 0,50	<0,020	<0,10	0,040	<0,20	4,30 4,70
GSA 56-5	3,50 3,80	2,40 2,80	0,60 0,90	<0,020	<0,10	0,040	<0,20	4,30 4,70

Tableau 13 : Les compositions chimiques des fontes élaborées par l'U.F.R.

Nuances	Résistance à la traction Rt da N/mm^2	Limite élastique Re daN/mm^2	Allongement A%	Résilience KCU daj/cm^2	Dureté Brinel HB	Microstructure
GSC 38-15	38	27	15	1,5	137-170	Ferritique A 90% mini
GSA 56-5	56	39	5	0,8	200-250	Sorbito-ferritique (martensite de revenu)

Tableau 14 : Les caractéristiques mécaniques des fontes élaborées par l'U.F.R.

On remarque que la structure perlitique est caractérisée par une résistance à la traction élevée, par contre l'allongement est d'autant plus important que la structure et ferritique.
Dans les fontes (G.S), la température de transition et la résilience sont influencées par plusieurs facteurs, tel que :
- La composition chimique de la matrice (Si, P, Mn, ...).
- Le nombre et la distribution des sphéroïdes de graphites.
- Les constituants de la matrice.

13-Résultats Intertation :

13-1-Morphologie du Graphite :

Par analyse quantitative et qualitative des micrographies des échantillons, la morphologie du graphite peut être mise en évidence par référence à la norme NF A 32-100. Les résultats de ces analyses sont résumés sur le tableau15.

Epaisseur en mm		2,5	3,5	4,5	6	10	15	20
GSC	**Forme du graphite**	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI
	Répartition	E	E	E	E	C	C	C
	Indice de dimension	8-7	8-7	7	7-6	6	5-6	5
GSA	**Forme du graphite**	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI
	Répartition	E	E	E	E	E	E	
	Indice de dimension	8-7	7	7-6	6	6	6-5	5

Tableau15: Morphologie du graphite.

Le graphite pour les fontes GSC et GSA est sphéroïdal (forme VI), de répartition E sur les faibles épaisseurs. On trouve également la taille des sphéroïdes peu dispersée.
Mais sur les grandes épaisseurs de 20 mm pour la GSA et de VI à 20 mm pour la GSC, on a la répartition C et la taille est dispersée, où le diamètre est de VI à 10 mm.
Les dimensions données sur le tableau 16 par mesure directe sur les micrographies. Les dimensions du graphite croient avec l'augmentation de l'épaisseur. **[15] [16]**

Epaisseur en mm		2,5	3,5	4,5	6	10	15	20
GSC	**Diamètre moyen du graphite (µm)**	3,08	3,39	3,42	3,93	4,10	4,62	4,72
GSA	**Diamètre moyen du graphite (µm)**	3,39	3,73	4,31	4,61	4,67	4,87	5,01

Tableau 16 : Variation du diamètre moyen du graphite en fonction de l'épaisseur.

Les figures 43, 44, 45, 46 montrent que la distribution de la taille du graphite a une forme de cloche : cela est dû au fait que la plus part des sphéroïdes ont une taille proche à la taille moyenne.
On a pour les deux fontes GSC et GSA une diminution de la densité de sphéroïdes qui varient inversement avec l'épaisseur (figures 43).

13-2-Interprétation :
Les dimensions du graphite (sphéroïdales) croient avec l'épaisseur, ce l'est dû à la vitesse de refroidissement. Etant donné que la croissance des germes du graphite est contrôlée essentiellement par la diffusion du carbone, les grains seront plus grands que la durée de transformation est élevée.
Sur les échantillons de petites épaisseurs, on a remarqué que le nombre des grains est plus élevé que sur les grandes épaisseurs.

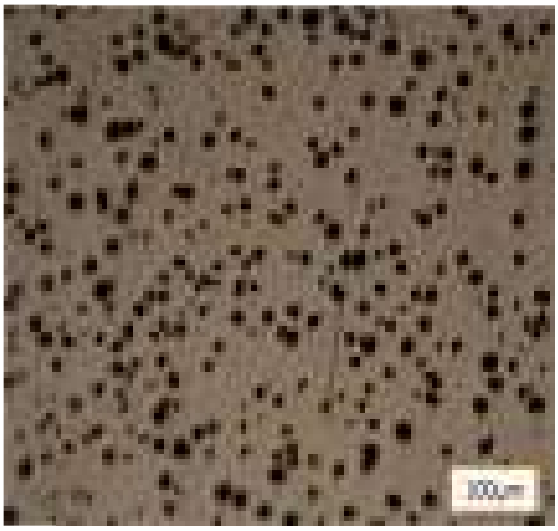


Figure 43 : Fonte GSC, épaisseur 2.5mm Brut de coulée.

Forme VI, répartition E, dimension 8-7.

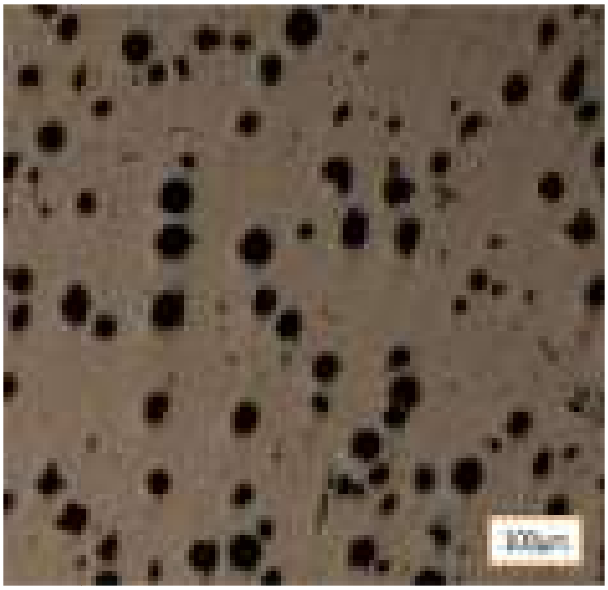


Figure 44 : Fonte GSC, épaisseur 6 mm Brut de coulée.

Forme VI, répartition E, dimension 7-6.

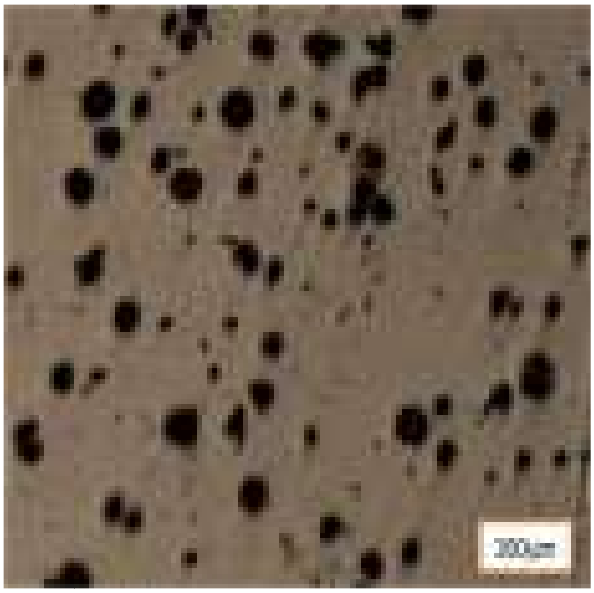


Figure 45 : Fonte GSC, épaisseur 20 mm Brut de coulée.

Forme VI, répartition c, dimension 5.

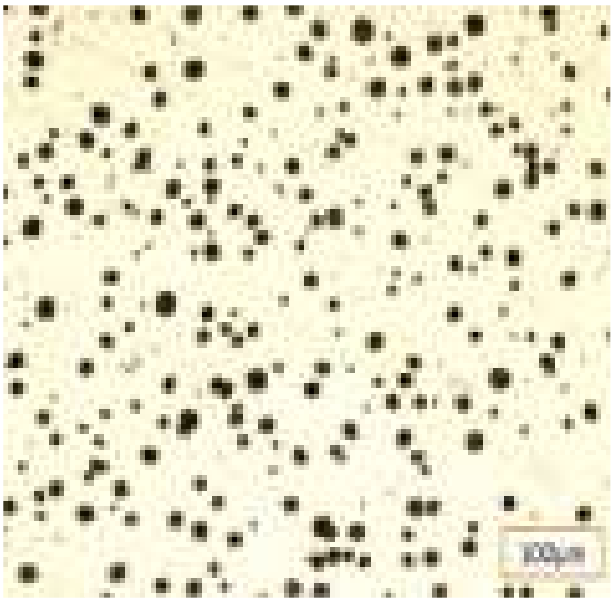


Figure 46 : Fonte GSA, épaisseur 2.5mm Brut de coulée.

Forme VI, répartition E, dimension 8-7.

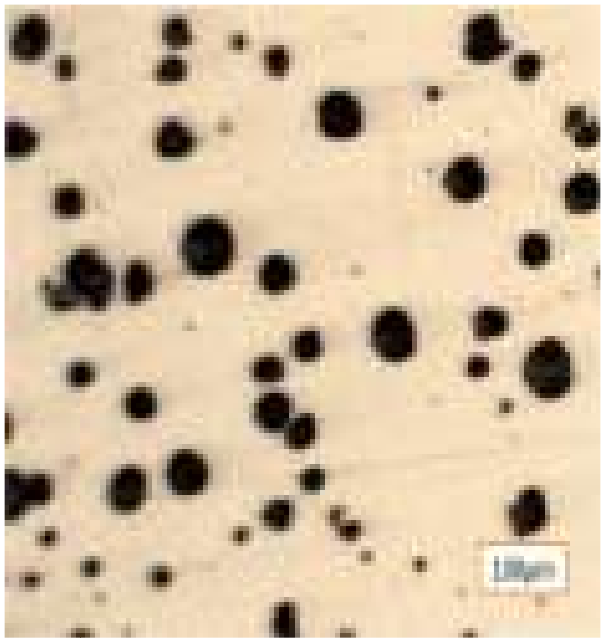


Figure 47 : Fonte GSA, épaisseur 6 mm Brut de coulée. Forme VI, répartition E, dimension 6.

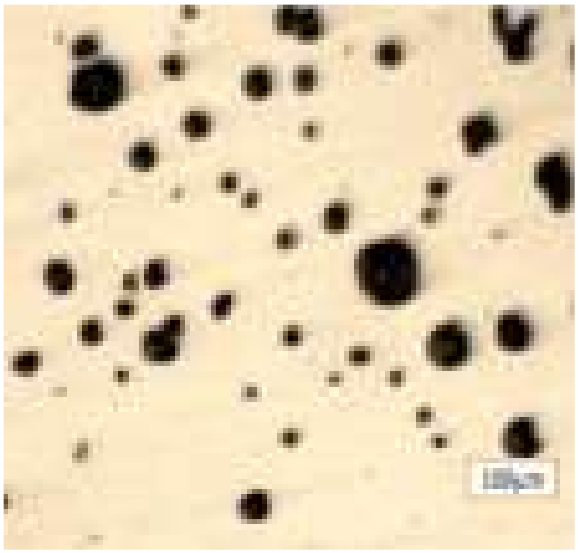


Figure 48 : Fonte GSA, épaisseur 20 mm Brut de coulée. Forme VI, répartition C, dimension5.

13-3-Analyse de Matrice :

La matrice des deux fontes est ferrito-perlitique, de prédominance perlitique, mais sur les différentes épaisseurs, il y a augmentation du taux de ferrite accompagné d'une diminution en perlite (fig. 43). Pour la fonte GSA, épaisseur 2.5 mm, on remarque la présence des carbures qui disparaissent pour les autres épaisseurs.
La diminution du taux de perlite et la disparition des carbures est dû au fait qu`une vitesse de

refroidissement faible favorise la cristallisation du carbone sous forme de graphite (germination puis croissance par diffusion), d'ou l`appauvrissement de la matrice de plus en plus en carbone et sera au plus tard le siège de la transformation de l'austénite à la ferrite.
It est noter que cette ferrite est sous forme d'auréoles entourant les sphéroïdes du graphite dans les fontes GSC et GSA. [15] [16]
Donc augmentation du taux de ferrite avec la diminution de la vitesse de refroidissement, sur les petites épaisseurs, on a plus de germes qui prennent naissance dans le liquide, mais sous l'effet de la vitesse de refroidissement, la croissance sera stoppée après une durée proportionnelle à l'épaisseur. Le carbone se cristallisera beaucoup plus sous forme de cémentite en lamelles alternées avec la ferrite pour donner de la perlite.

L'évolution des phases de la matrice (perlite et ferrite) et le graphite sont résumés sur les figures 49 à 50 sous forme d'histogrammes, pourcentages de chaque phase en fonction de l'épaisseur.

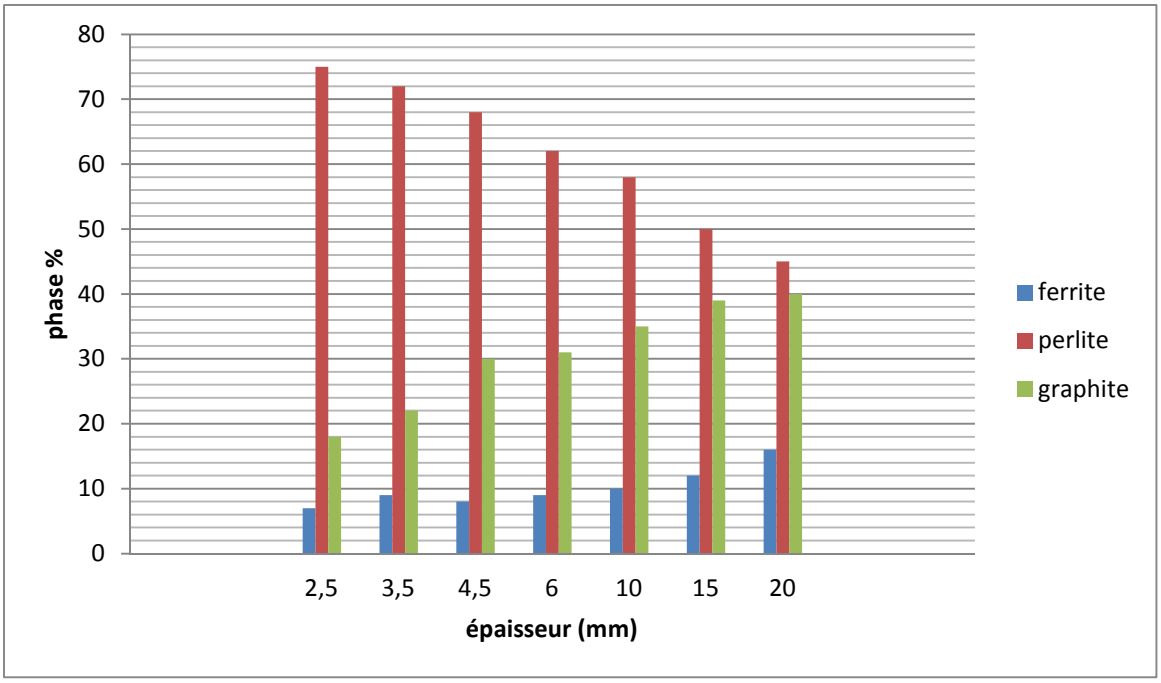


Figure 49 : Distribution des phases en fonction de l'épaisseur (GSA).

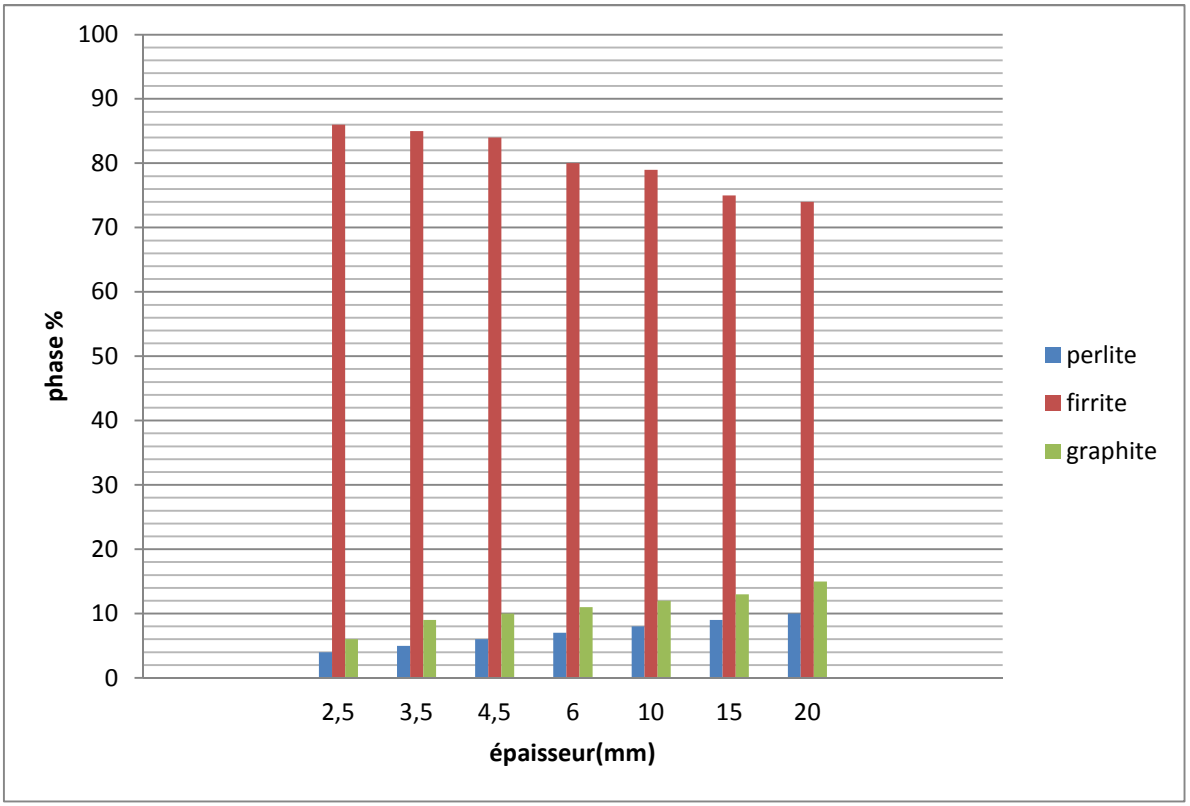


Figure 50 : Distribution des phases en fonction de l'épaisseur(GSC)

13-4-Influence de L'épaisseur Sur Les Propriétés Mécaniques et Structurale de Fonte GSC et GSA à L`état Brut de Coulées :

On peut encadrer les fabrications d'un atelier de fonderie utilisant une fonte de composition pratiquement constante. Il suffit de déterminer judicieusement la même loi de refroidissement pour les pièces de massivité maximale et minimale obtenues dans l'atelier de fonderie.
On peut prévoir, par précision suffisante: les duretés extrêmes obtenues sur l'ensemble des pièces, les résistances à la traction, les pourcentages de phases, etc.., par l'utilisation des refroidisseurs.
Cette simple étude consiste à déterminer l'évolution des caractéristiques mécaniques et structurales en fonction de la vitesse de refroidissement qui varie avec l'épaisseur.
Pour le suivi de cette étude, 0n a conçu un type d'éprouvette dite en escalier. (Fig52)

13-5- Influence de L'épaisseur Sur La Dureté :

L'allure des courbes donnant les variations de la dureté HB en fonction de l'épaisseur montrent qu'à l'état brut de coulée cette dureté diminue avec l'augmentation de l'épaisseur qui se traduit par la diminution de la vitesse de refroidissement et à la diminution du taux de perlite.
La dureté des fontes, comme la résilience est aussi fonction de la composition chimique. Pour une même épaisseur, on a la dureté HB qui croît comme suit : HGSC et HGSA, La fonte GSA présente la dureté la plus grande. .

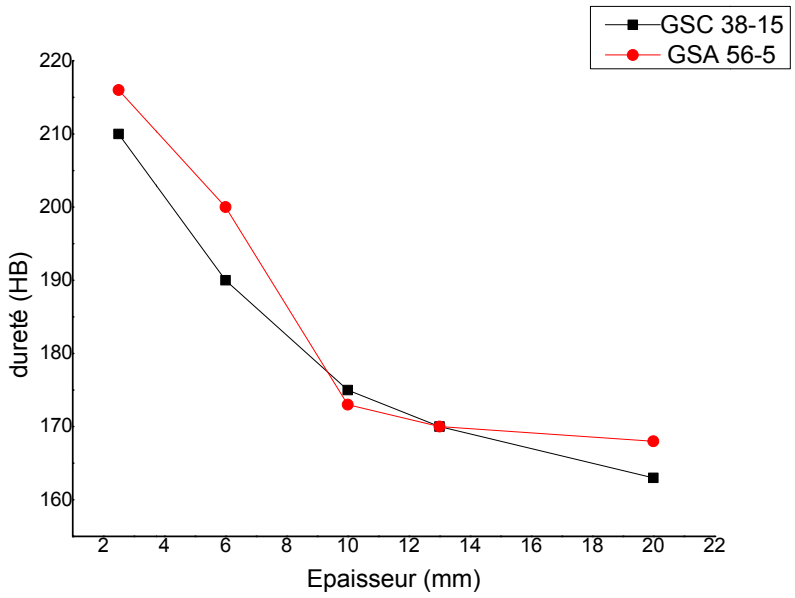
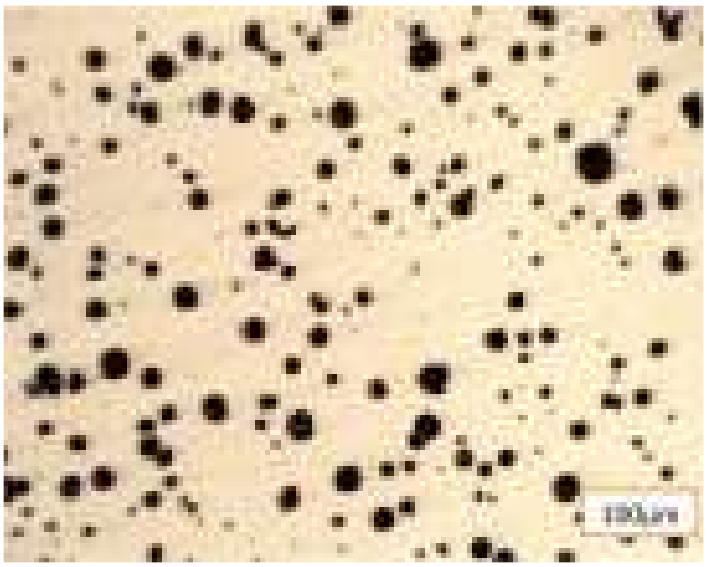


Figure 51 : Variation de la dureté en fonction de 1'épaisseur (GSC 38-15 et GSA 56-5).



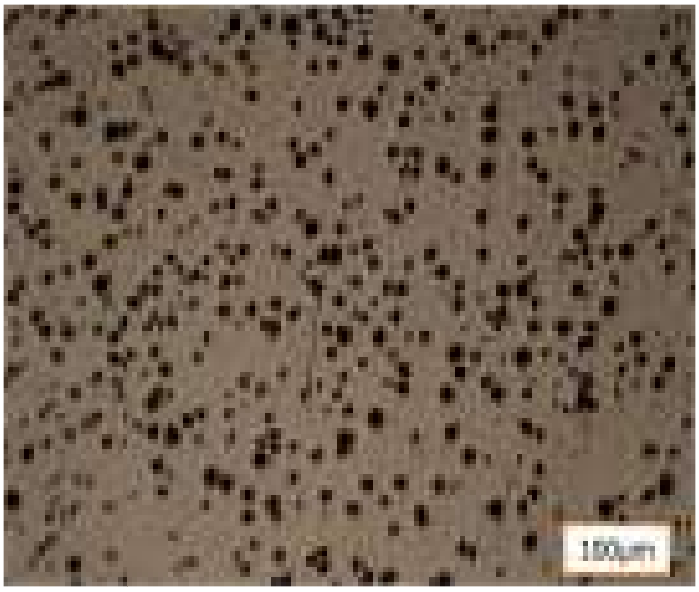
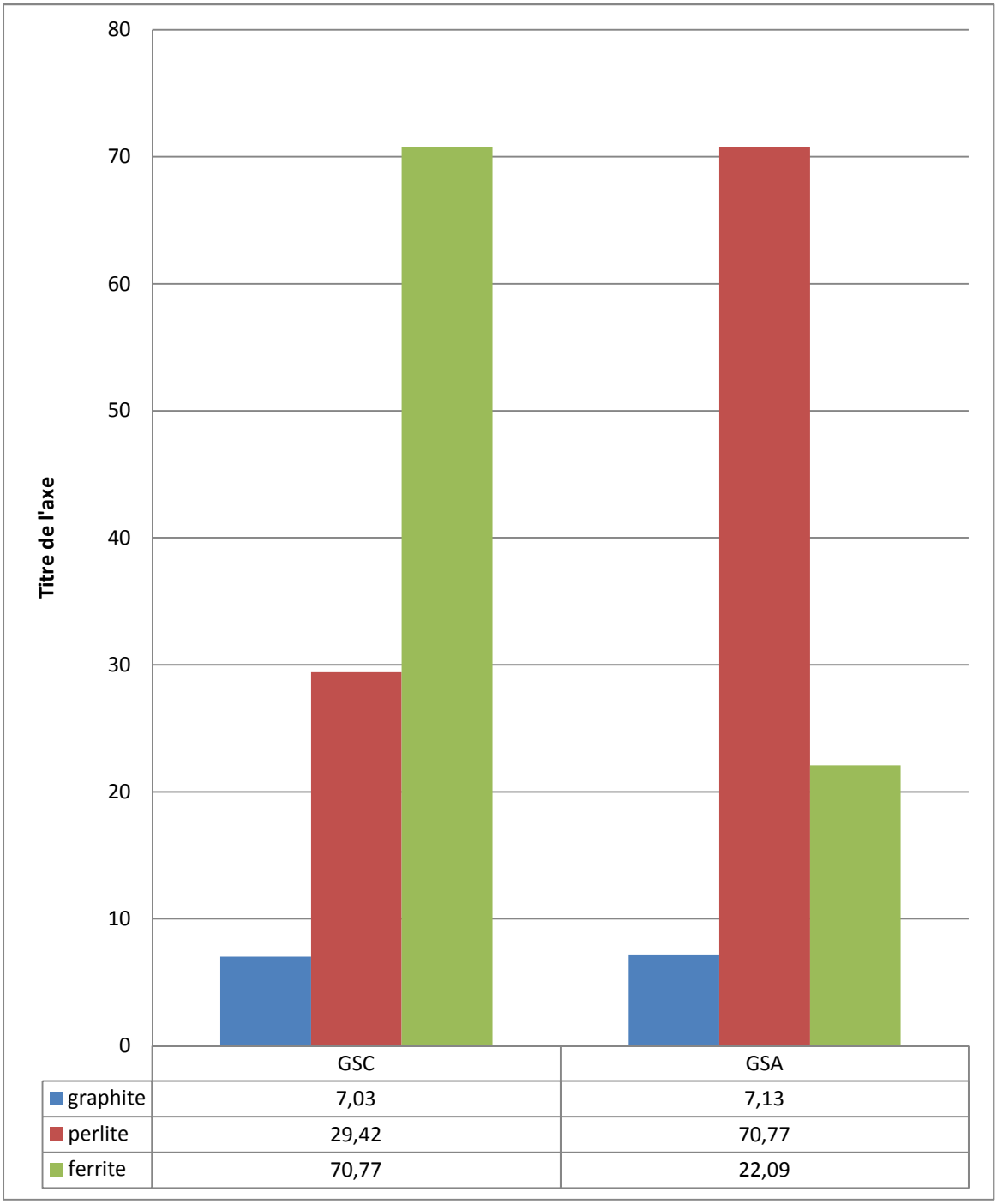


Figure 52 : Micrographie sur l'état brut de coulée de fonte GSA et GSC.



	GSC	GSA
graphite	7,03	7,13
perlite	29,42	70,77
ferrite	70,77	22,09

Figure 53 : Répartition des taux des phases des deux formes GSC et GSA.

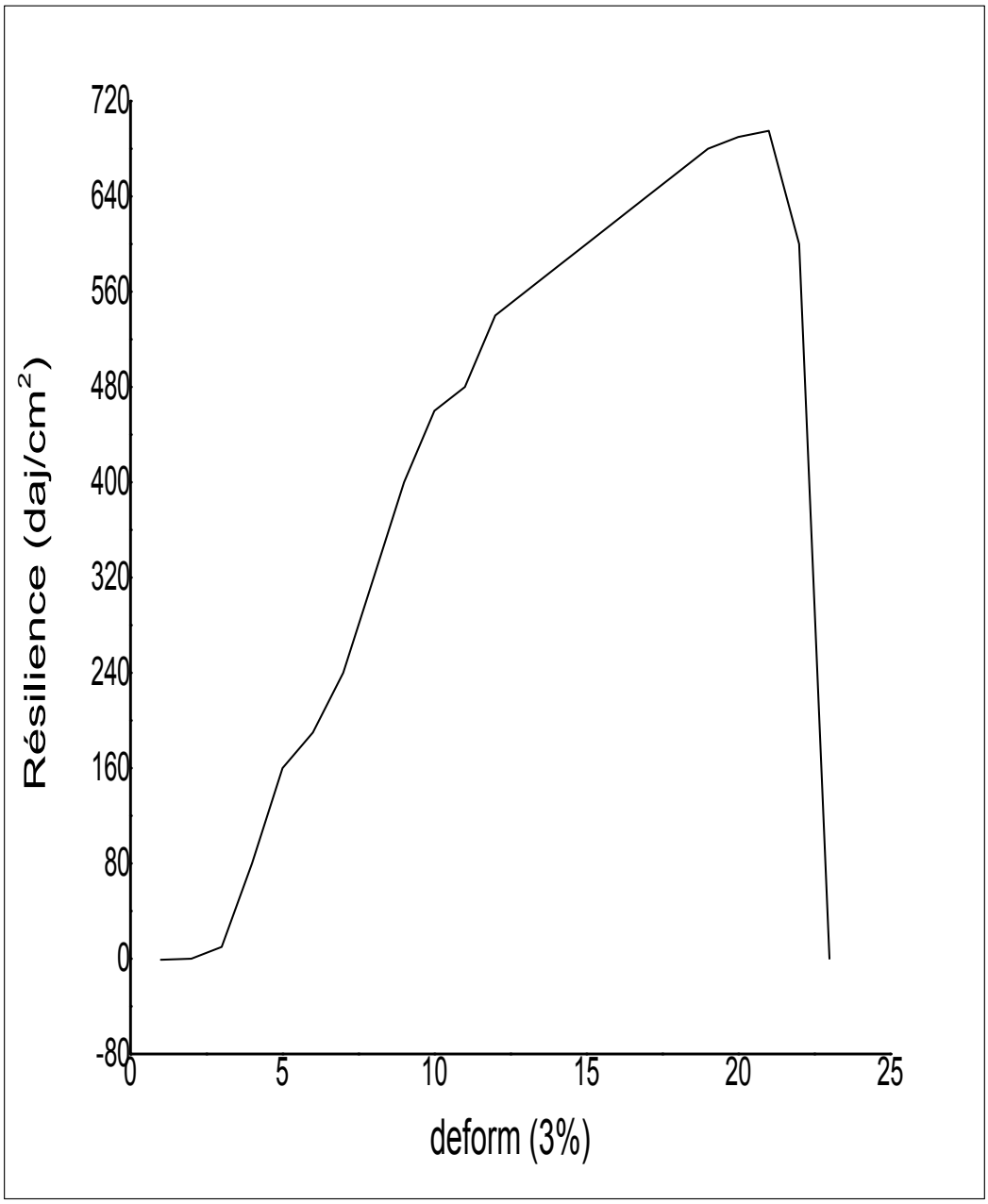


Figure 54: courbe de traction conventionnelle de la fonte GSA à l'état brut de coulée.

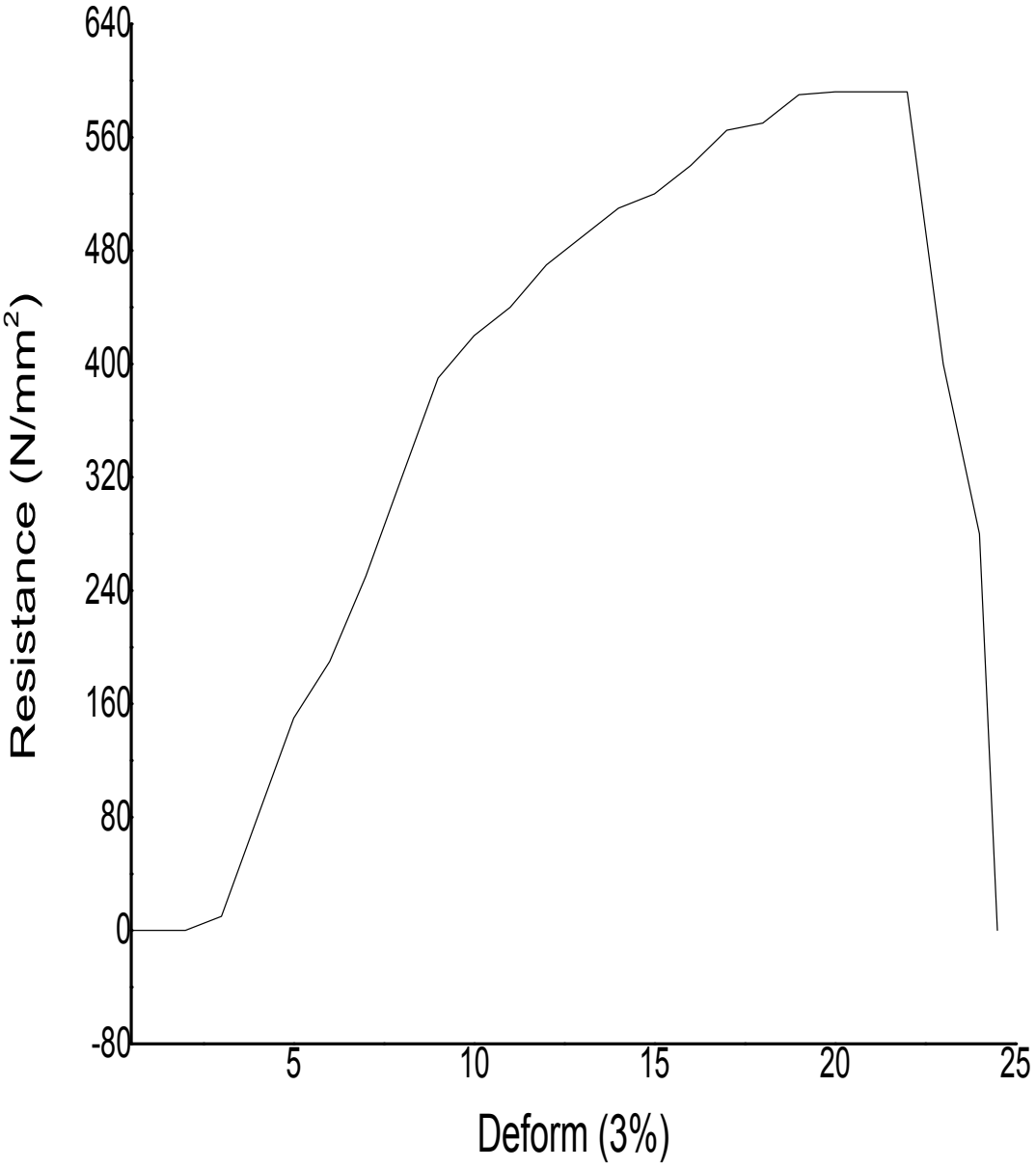


Figure 55 : courbe de traction conventionnelle de la fonte GSC à l'état brut de coulée.

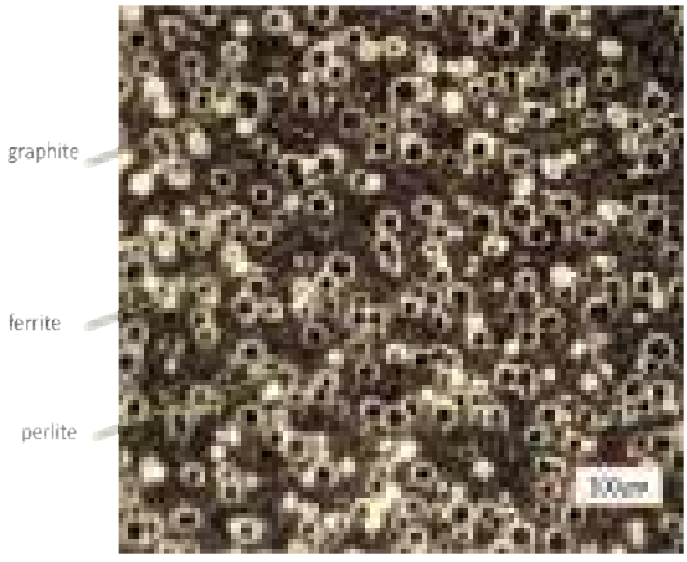
13-6-Analyse Qualitative et Quantitative des Fontes GSC et GSA :

Par analyse quantitative des micrographies de chaque épaisseurs, le graphite des fontes GSC et GSA est sphéroïdal. On a trouvé également la taille des sphéroïdes peu dispersées. Mais pour les grandes épaisseurs de 20mm pour la GSA et de 10mm à 20mm d`épaisseur pour la GSC, on à remarqué que la taille des nodules de graphite est dispersée, ou le diamètre varie de

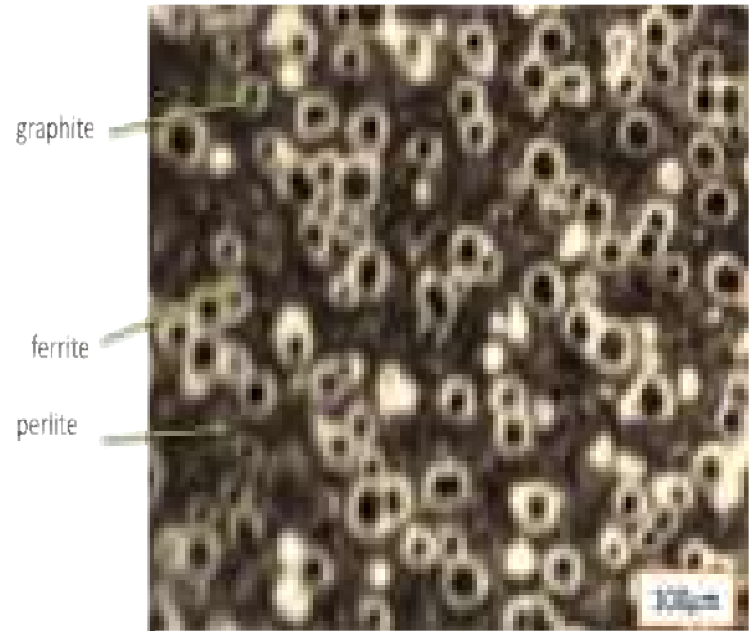
l4µm jusqu'à 16,7µm.
Le diamètre moyen est calculé à partir d'un ensemble de diamètres (α_i) correspondant à un ensemble de sphéroïde (i). Les figures 54à57 montrent que la distribution de la taille du graphite pour les deux fontes a une forme de cloche; ce la est dû au fait que la plupart des sphéroïdes ont une taille proche de la taille moyenne.
On a pour les deux fontes GSC et GSA une diminution de la densité de sphéroïdes qui varie inversement suivant l'épaisseur. (Figures 55 à 56).

Epaisseur en (mm)		2.5	3.5	4.5	6	10	15	20
GSC	**Diamètre moyen réel (µm)**	10.8	11.9	12.0	13.8	14.4	16.2	16.7
GSA	**Diamètre moyen réel (µm)**	11.6	13.1	15.4	16.2	16.4	17.1	17.6

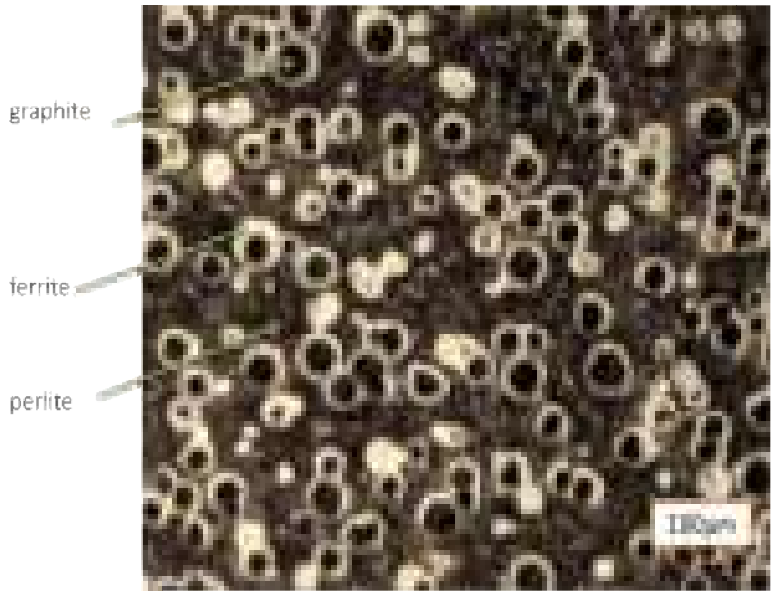
Tableau 17 : variation du diamètre moyenne en fonction de l'épaisseur



a)Epaisseur de 2.5 mm.

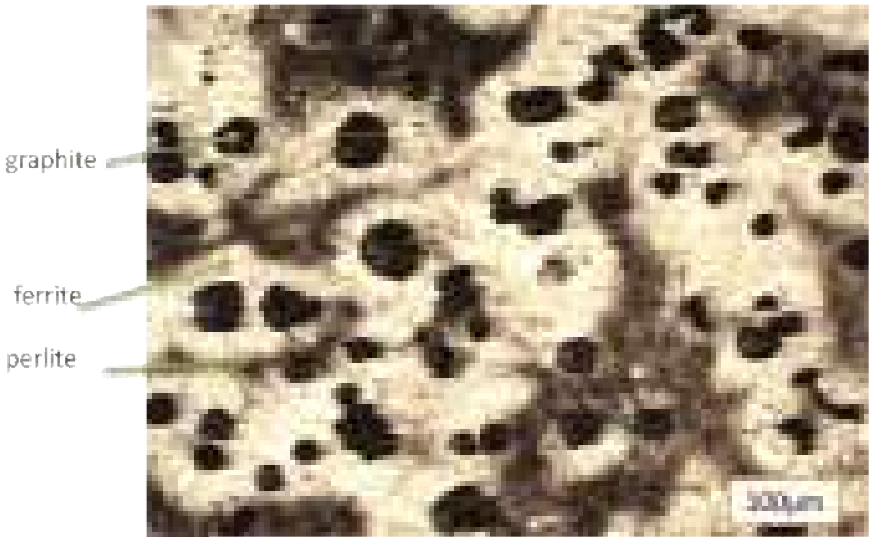


b)Epaisseur de 6 mm

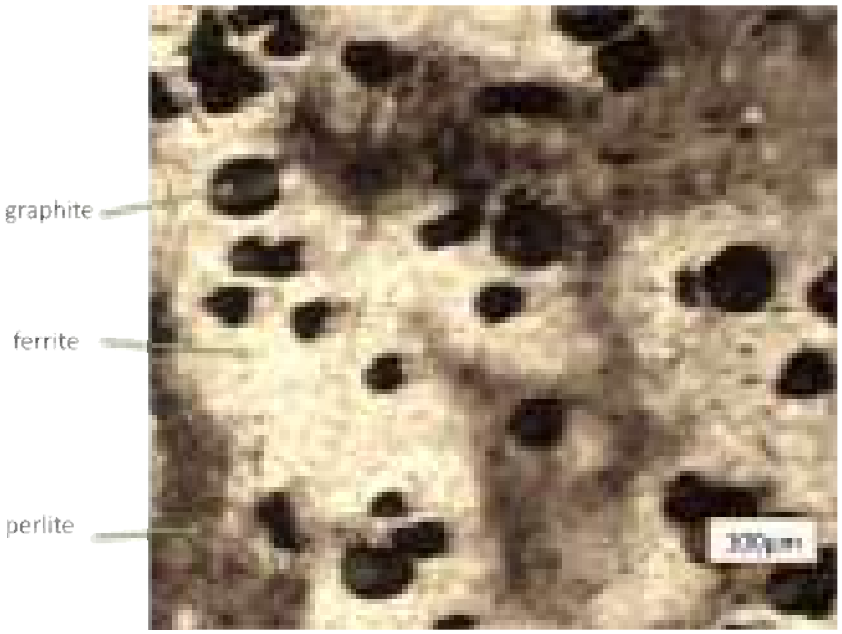


c) Epaisseur de 20 mm.

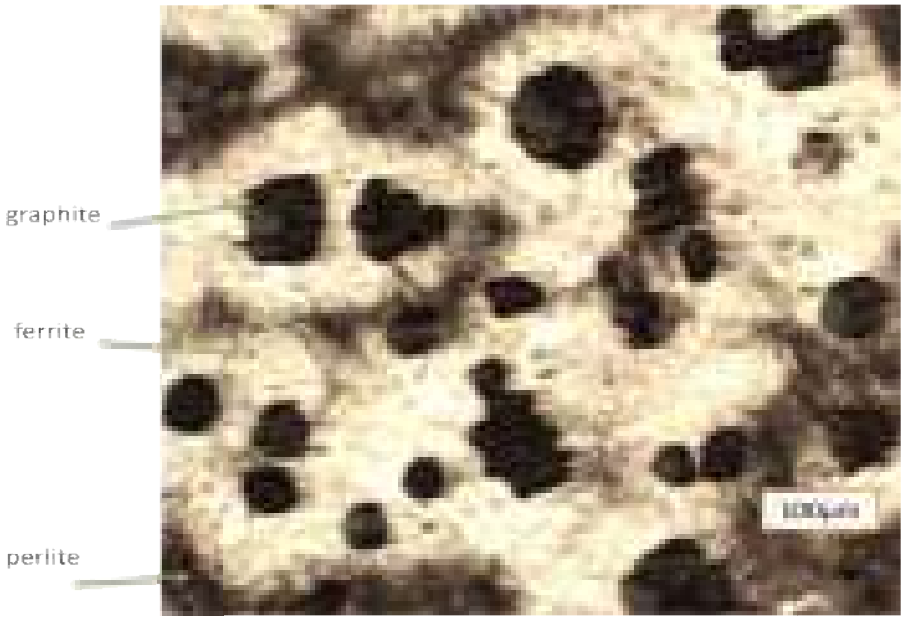
Figure 56 : micrographie d'une fonte GSA à l'état brut de coulée à différentes épaisseurs (a, b, c) (attaqué au Nital).



a)Epaisseur de 2.5 mm.



b) Epaisseur de 6 mm



c)Epaisseur de 20mm

Figure 57 : micrographie d'une fonte GSC à l'état brut de coulée à différentes épaisseurs (a, b, c) (attaqué au Nital).

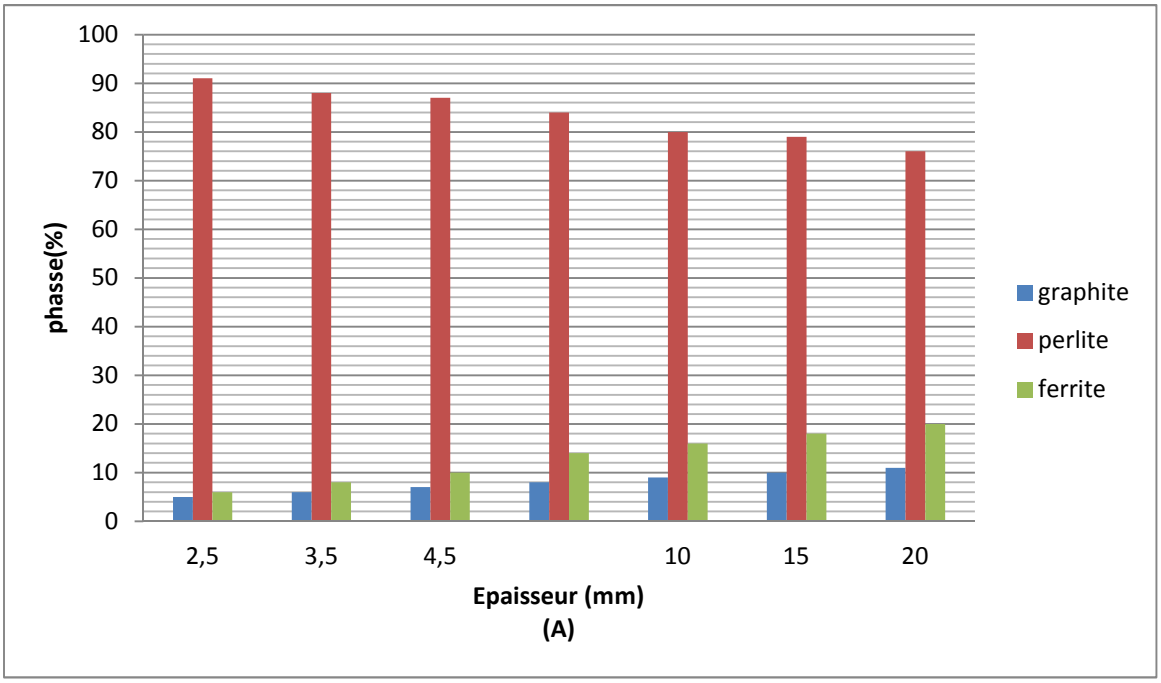
13-7- Analyse Micrographique de La Matrice des Fontes GSC et GSA :

La matrice des deux fontes est ferrite-perlitique. De prédominance perlitique, il y a augmentation du taux de ferrite avec l'augmentation de l`épaisseur. (Figure 58).
La diminution du taux de perlite et la disparition des carbures est peut être expliquée par la diminution de la vitesse de refroidissement qui favorise la cristallisation du carbone sous forme de graphite (germination puis croissance par diffusion).d`ou l`appauvrissement de la matrice de plus en plus en carbone et plus tard le siège de la transformation l`austénite à la ferrite.
Il est à noter que cette ferrite est sous forme d`auréoles entourant les sphéroïdes du graphite dans les fontes GSC et GSA. Sur la faible épaisseur, on a plus de germes qui prennent naissance dans le liquide, mais sous l'effet de la vitesse de refroidissement, la croissance sera stoppée après une durée proportionnelle à l'épaisseur .Le carbone se cristallisera beaucoup plus sous forme de cémentite en lamelles alternées à la ferrite pour donner de la perlite.

13-8-L' influence de L`épaisseur Sur La Résilience et La Dureté :

Sur les graphes (figure 59 -60) donnant les variations de la résilience en fonction de l'épaisseur, on constate que la résilience varie inversement avec la vitesse refroidissement, mais dans les mêmes sons que la dureté.
Pour les fontes CSC et GSA, augmentation de la résilience diminution de la dureté peuvent être traduites par la diminution de la perlite qui est une phase dure dans la matrice de ces fontes d'une part et l'augmentation du taux de la ferrite et du graphite d`autre part.
La dureté varie inversement avec vitesse de refroidissement, pour les grandes épaisseurs qui se traduit par plus faible dureté à cause de la grande proportion de ferrite formée.
Les caractéristiques mécaniques et structurales sont liées non seulement à la composition chimique mais aussi à la vitesse de refroidissement des pièces et à l'épaisseur des parois des moules.

Pour une composition chimique donnée correspond une grande variation des caractéristiques en de l`épaisseur à l`état brut de coulée. Pour remédier à ce problème d`ordre métallurgique, il faut placer sur les parois, minces des moules, des refroidisseurs afin d'obtenir une meilleur uniformité de la cinétique de refroidissement de pièces.



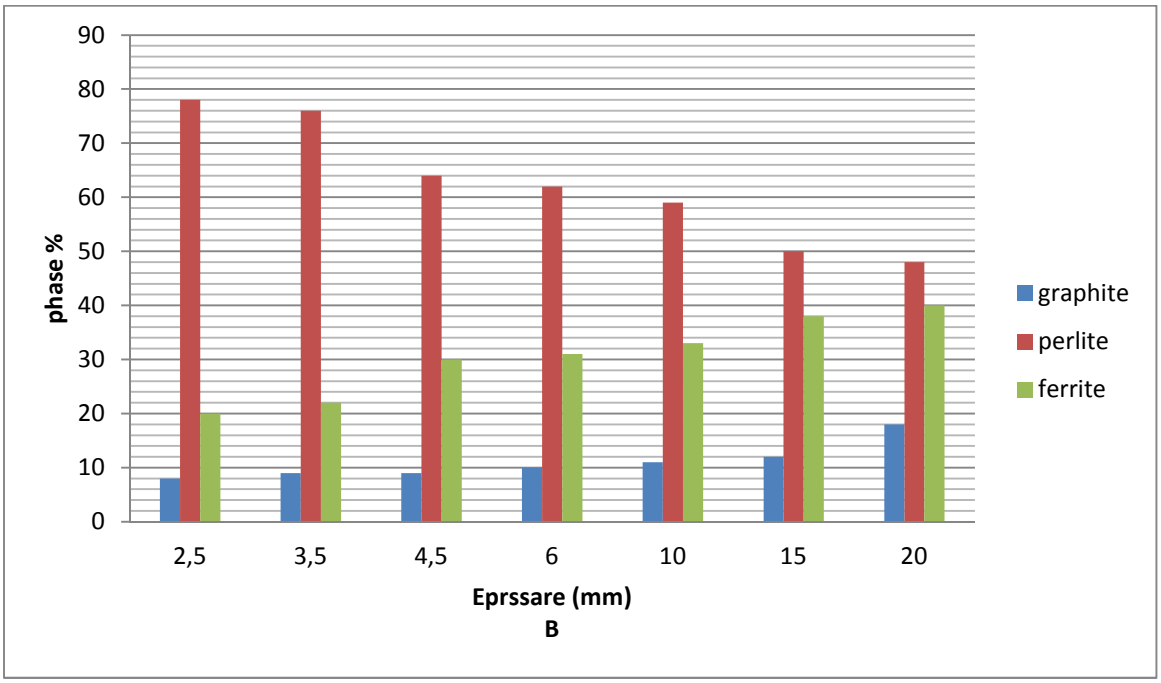


Figure 58 : Distribution des phases en fonction de l'épaisseur A) fonte GSC,

B) fonte GSA.

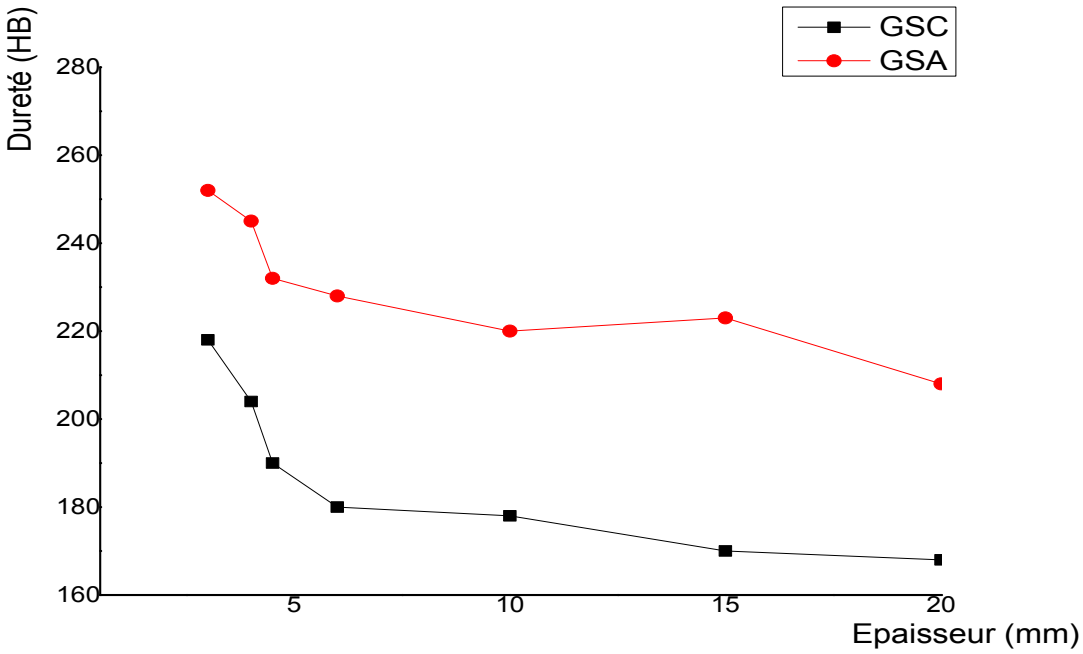


Figure 59: variation de la dureté en fonction de 1'épaisseur.

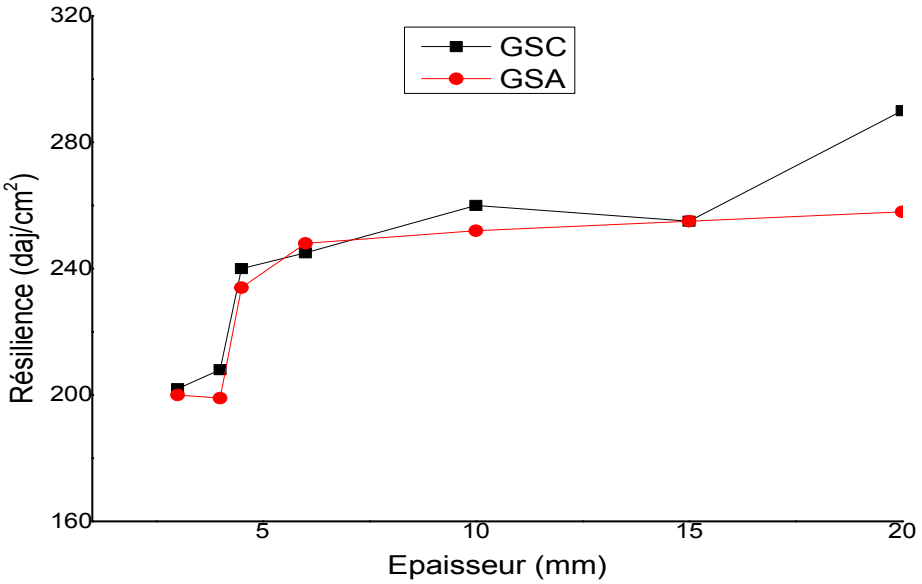


Figure 60 : variations de la résilience en fonction de l'épaisseur.

13-9-Recuit de Feritisation :

Deux cycles de recuit de ferritisation ont été utilises.
*une ferritisation directe.
*une ferritisation in directe.

A/ Ferrtisation Directe :

Un four de laboratoire à été utilise dont la température maximale est de 1200°c.
L'optimisation d'un recuit de ferritisation directe (figure 61) consiste à maintenir les échantillons à une température θ, dans le domaine de la bande triphasée.
Cette température à été déterminée après un maintien à la température θ_i pendant un temps qui varie d'une heure jusqu'a à dix heures, on procède à un refroidissement dans le four jusqu'a une température inferieure à $A_{i\ MAX}$ Puis a l'air libre.

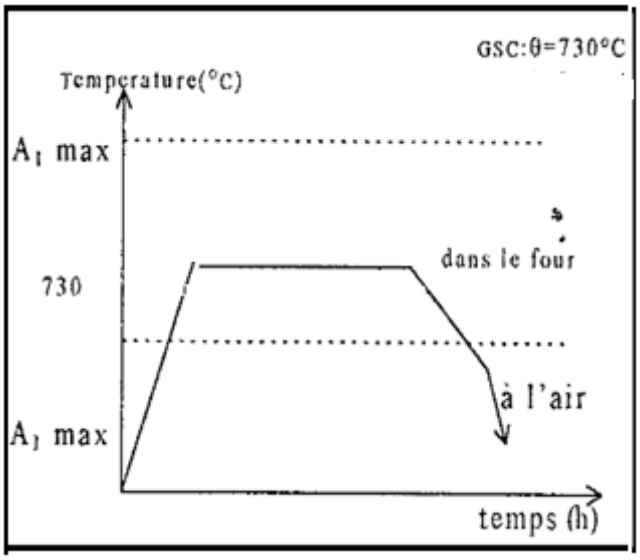


Figure 61 : Cycle de ferritisation directe de fonte GSC.

b/ Ferrítisation Indirect :

L'optimisation d'un recuit de ferritisation indirect consiste à maintenir les échantillons à une température θ_i inferieure pendant un temps qui varie d'une heure jusqu'à dix heures. On procède ensuite à un refroidissement à 1`air libre. Figure(62).

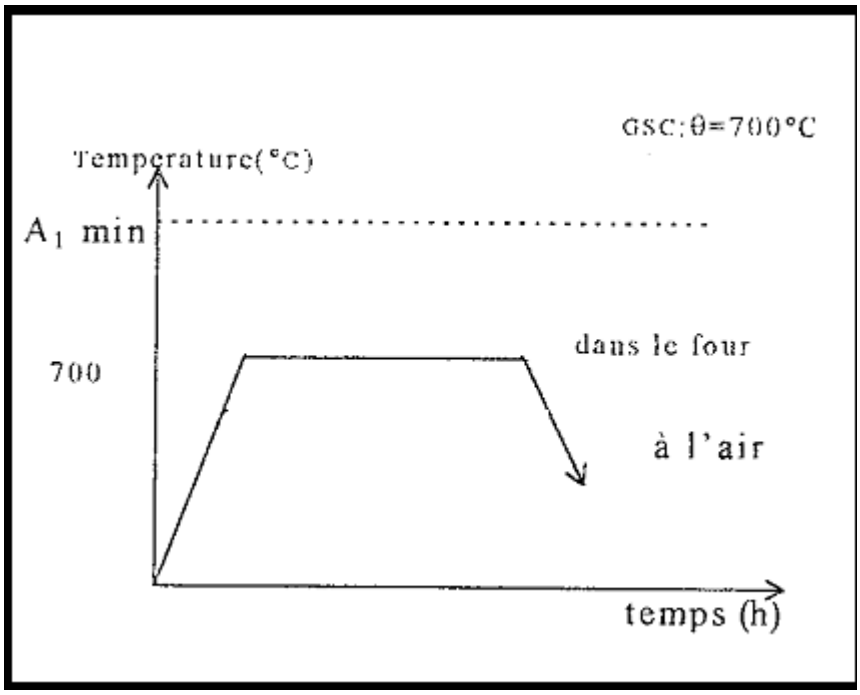


Figure 62 : Cycle de ferritisation indirecte de fonte GSC .

13-9-1-La Fonte GSC :

a/Ferritisation Directe :

Un maintien de quatre heures dans le domaine de la bande triphasée à une température de 730°C, est largement suffisant pour la décomposition totale de la perlite. (Figure 65).
Les résultants de 1`analyse structural quantitative et les mesurés de dureté HB qui sent présents sur les figures (66) confirment la durée de maintien avec précision.

b/ Ferritisation Indirecte :

Un maintien de deux heures dans le domaine de la bande triphasée à une température de 700°C, est largement suffisant pour l'obtention d'une matrice ferritique.
Les résultats de l'analyse quantitative et les mesures de dureté HB qui sont présentés sur les figures(76) confirment la durée de séjours à la température de 700°C avec précision.

13-9-2-Choix de Traitement de Ferritisation Optimal Pour La Fonte GSC :

Le cycle optimai choisi étant la ferritisation indirecte car elle présente une temprature de maintien de 700°C que est inférieur à celle ce la ferritisation directe (730°C) avce une durée de maintien plus faible .deux heures pour la ferritisation indirecte et troi heures pour la ferritisation directe

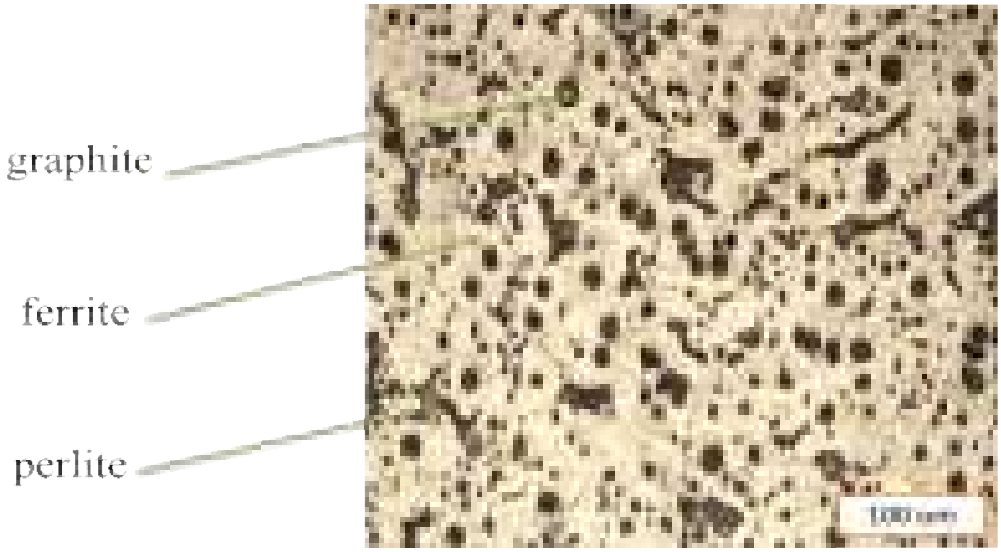


Figure 63 : micrographie sur la ferritisation indirecte de la fonte GSC.

13-10-Recuit de Perlitisation :

D'après l'étude bibliographique et la détermination de la bande triphasée, nous avons choisi une température de A_{1MAX} + 50 à. 100°C. pour éviter le grossissement et homogénéiser le grain austénitique. Le cycle choisi est le même pour la fonte GSA et GSC qui consiste à un maintien à 550°C avec des durées variables (1/2h, lh, 2h, 3h et 4h, suivi d`un refroidissement a Lair libre (figure64).

***Fonte GSA :**

- L'observation micrographique de la fonte GSA à l'état brut de coulée a montré que tous les échantillons étaient perlitiques à 76%. La perlite à 100% s'obtiens très rapidement 'après 30 minutes seulement. Figure(65)
Pour 30minutes de maintien on obtient un: dureté de 325 HB et à partir d`une heure, la dureté se stabilise et ne dépasse pas 330 HB (Figure 66).

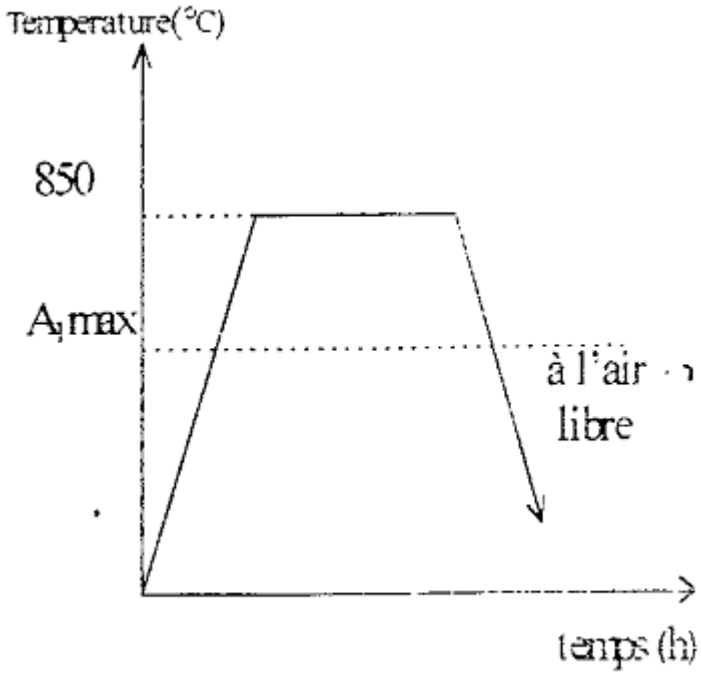


Figure 64 : cycle de traitement de perllitisation des fontes GSC et GSA.

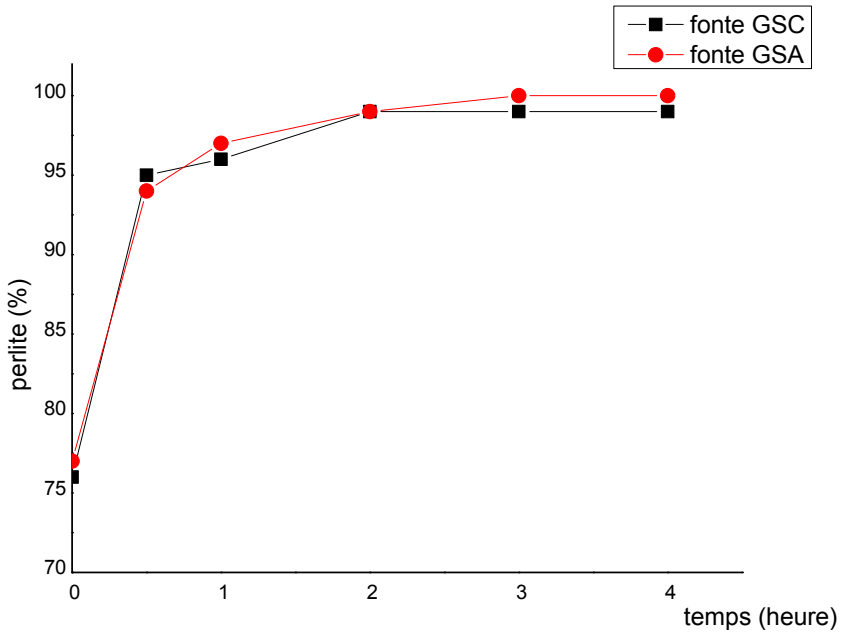


Figure 65 : variation du taux de perlite en fonction de la durée de maintien ou cours de la perlitisation .

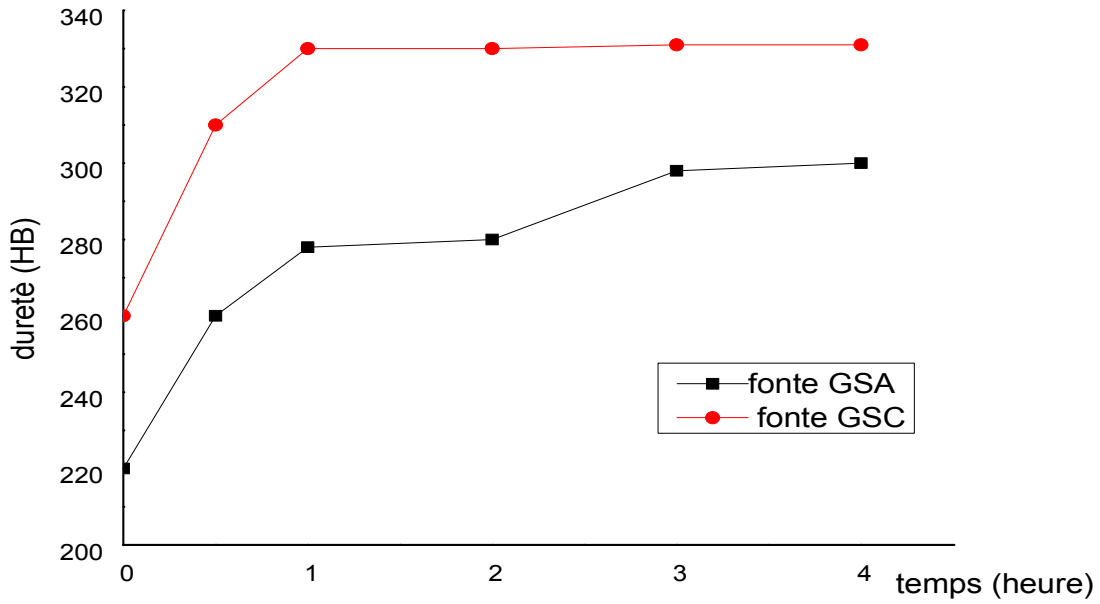


Figure 66 : variation de la durée HB en fonction de durée de maintien au cours de la perlitisation .

Les duretés 295 HB et 302 HB correspondent respectivement aux maintiens d'une heure et de deux heures, au de là de ces maintiens, la dureté se stabilise et reste constante (Figure 66).

13-11- Caractéristiques Mécaniques des Fontes (GSC et GSA) Optimisées :

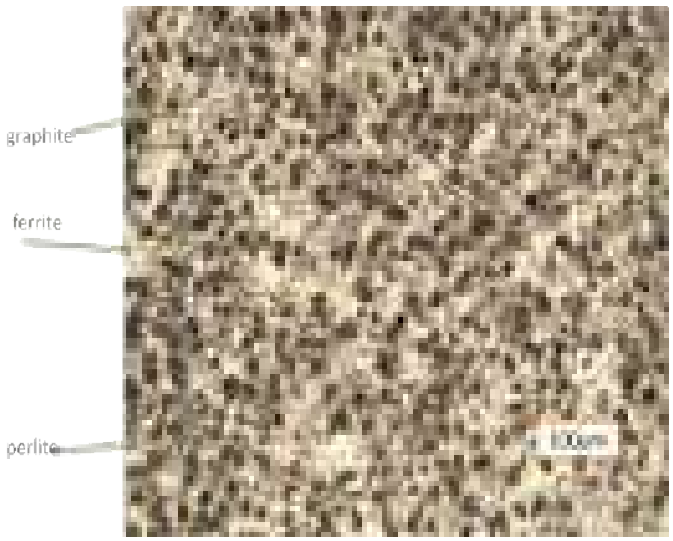
Apres l'optimisation des paramètres de recuit de ferritisation et de perlitisation, nous nous sommes intéressés aux propriétés mécaniques.
Les résultats obtenus après l'essai de traction et l`essai de résilience. Sur des éprouvettes traitées thermiquement. Sont regroupés dans les tableaux 18 à 19.

	R_e[N/mm^2]	R_m[N/mm^2]	A%	Z	daJ/cm^2	HB
GSA	366,22	504,88	14	20,20	1,80	175
GSC	368,33	479,02	18,03	26,50	1,57	170

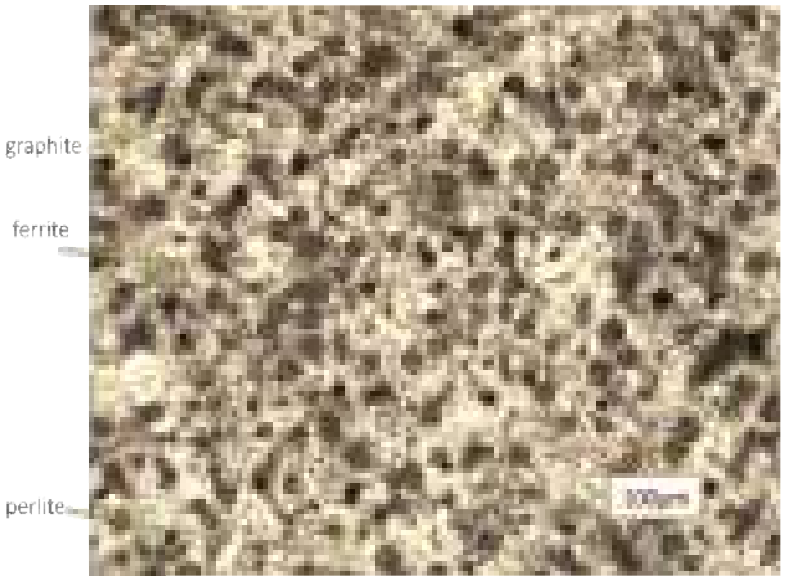
Tableau 18 : Caractéristiques mécaniques des deux fonte après le recuit de ferritisation optimisé.

	R_e[N/mm^2]	R_m[N/mm^2]	A%	Z	daJ/cm^2	HB
GSA	667,22	906,11	3,09	4,10	0,75	331
GSC	555,55	894,44	4,50	5,70	0,69	296

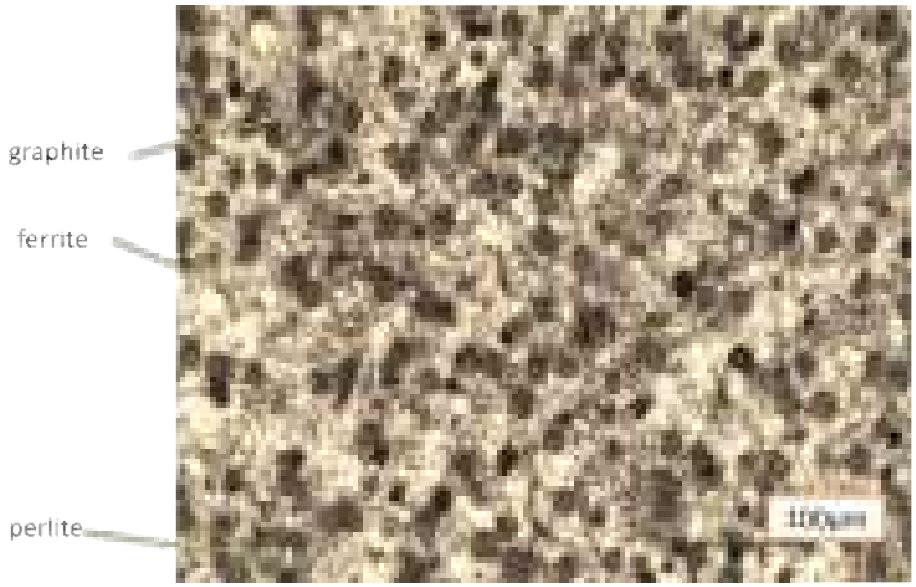
Tableau 19 : Caractéristiques mécaniques des fontes GSC et GSA après le recuit de perlitisation optimisé.



a)Epaisseur de 2.5 mm

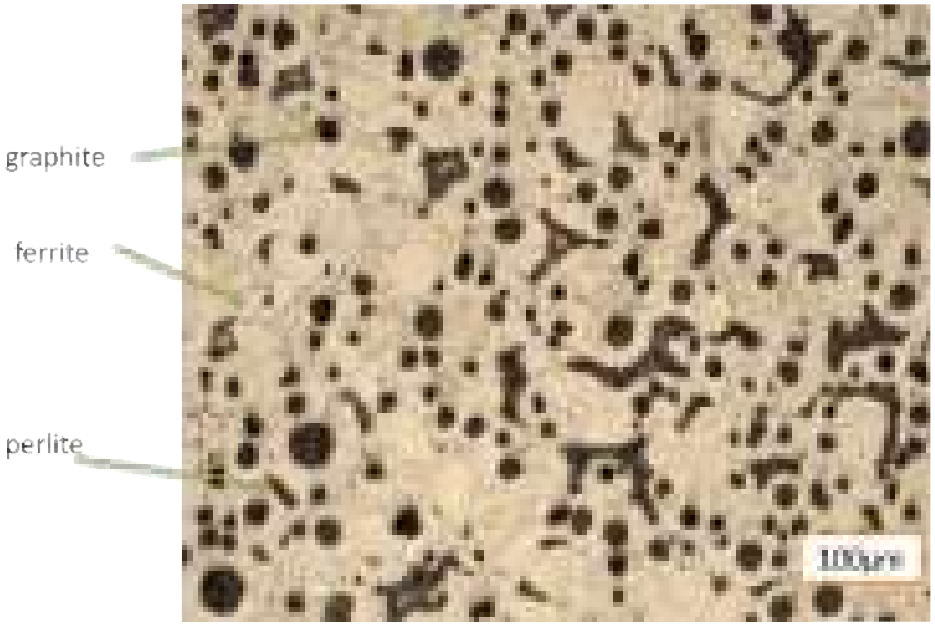


b) Epaisseur de 6 mm

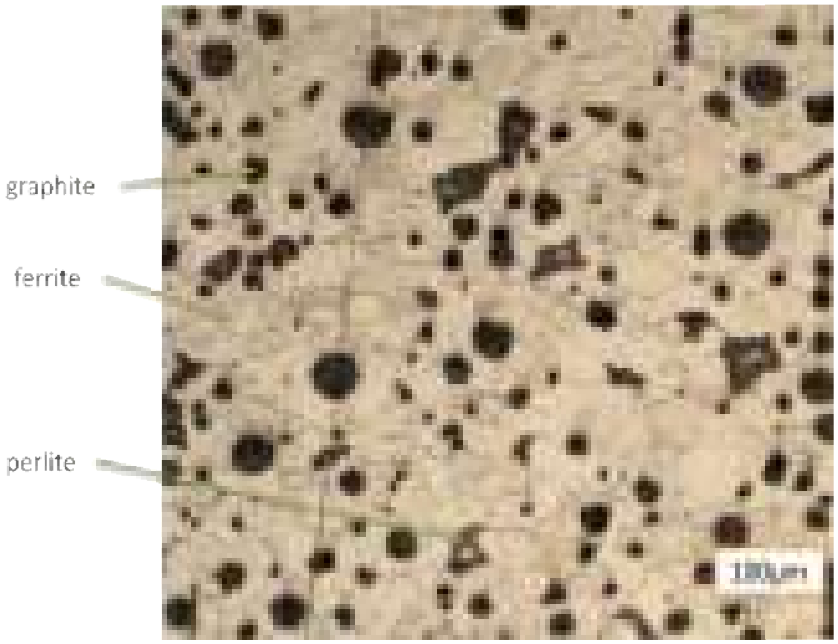


c)Epaisseur de 20 mm

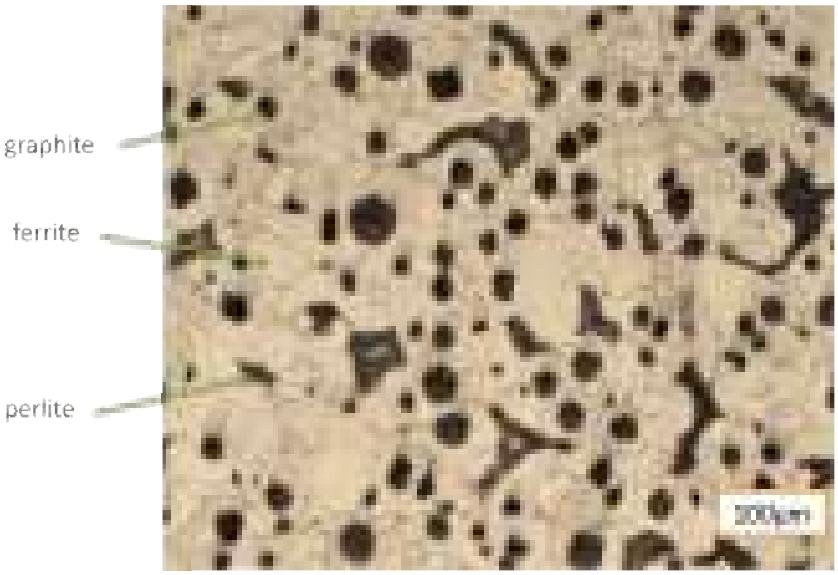
Figure 67 : micrographie d'une fonte GSA à apres tt à différentes épaisseurs (a, b, c) (attaqué au Nital).



a)Epaisseur de 2 .5 mm



b)Epaisseur de 6 mm



c)Epaisseur de 20 mm

Figure 68 : micrographie d'une fonte GSA à après tt à différentes épaisseurs (a, b, c) (attaqué au Nital).

Conclusion générale

Dans le cadre de la mise au point de matériaux de substitution aux aciers forges habituellement utilises dans le secteur automobile Algérien, ainsi que l`élaboration d`une seule nuance de fonte qui donne un apport économique pour toute fonderie, nous avons effectué une étude sur les fontes GSC et GSA élaborées à l`Unité de Fonderie de Rouïba afin de déterminer la qualité avant et après application de divers types de traitements thermiques.

En effet. La caractérisation du point de vue ductilité des bruts de coulée a montré que la fonte GSC et la GSA étaient des fontes grises sphéroïdales: la structure de la GSA alliée au manganèse était ferrito-perlitique avec prédominance perlitique. Par contre. Celle de la GSC était aussi ferrito-perlitique mais avec prédominance ferritique.

Elle contient plus de cuivre et moins de silicium par rapport aux fontes GSC et GSA.

Les caractéristiques mécaniques du point de vue ductilité à l'état brut de coulée de la fonte GSC sont nettement meilleurs que celle de fonte GSA.

D'une manière générale. Les caractéristiques mécaniques et structurales sont liées non seulement à la composition chimique. Mais aussi à la vitesse de refroidissement des pièces ainsi qu'à l`épaisseur des parois des moules.

Sachant bien que la température A_{1max} - ε correspond au début de la température de la zone Ⅲ et la température A_{1min} correspond à la fin de la transformation de la zone I. Les températures limites de la bande triphasée pour les deux fontes GSC et GSA sont:

Pour la GSC A_{1min}=715 °C ; A_{1max} =765 °C ; ΔT=50 °C.

Pour la GSA A_{1min}=725 °C ; A_{1max} =760 °C ; ΔT=35 °C.

En dehors de la métallographie et de la mesure de dureté HB, l'étude de la variation des diamètres moyens des sphéroïdes de graphite aux différentes températures comprises entre 820°C à 640°C, nous a permis également de confirmer qu'il est possible de mettre en évidence l`intervalle de la bande triphasée pour les fontes GSC et GSA.

La graphitisation est assez remarquable aux températures légèrement inférieures à A_{1min} et particulièrement entre A_{1min} et A_{1max} qui se traduit respectivement par les deux réactions :

Perlite → α+ graphite et γ→α + graphite.

L'intervalle de température et la position de la bande triphasée dépendent de la présence des éléments de substitution.

La connaissance de ce domaine permet de déterminer la température idéale d'un recuit de ferritisation ou de perlitisation.

Conclusion générale

Nous avons également évalué les traitements thermiques de recuit de ferritisation et de perlitisation une fois la bande triphasée était mise en évidence.

Pour les fontes GSC et GSA, on à choisi la ferritisation indirecte qui est basée sur la décomposition de la cementite perlitique en ferrite et en graphite.

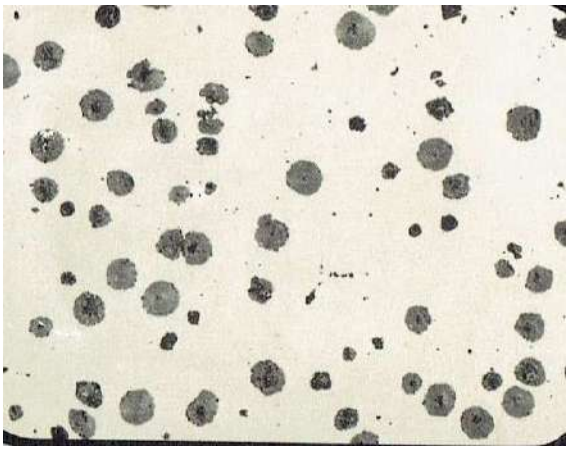
Le maintien dure plus longtemps pour la fonte GSA car elle Contient plus de manganèse d'où plus de perlite à l'état brut de coulée par rapport à la fonte GSC.

La perlitisation à nécessite un maintien plus long pour la fonte GSC car sa matrice de départ contient moins de perlite que la fonte GSA. Donc l`enrichissement de l`austénite en carbone, pour qu'elle atteigne la teneur de l'eutectoïde nécessite un apport plus important de carbone issu des sphéroïdes de graphite.

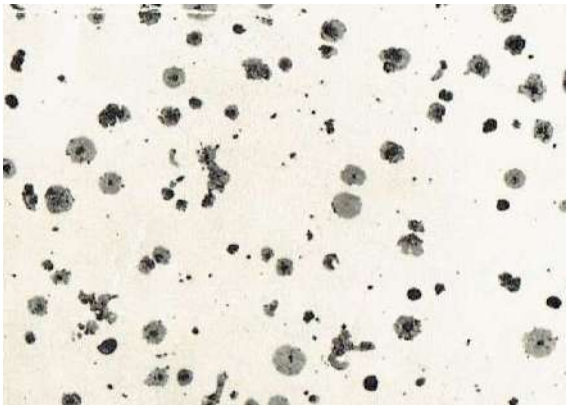
On a pu aussi démontrer l`importance de ces traitements thermiques sur la qualité de propriétés mécaniques telles que la résilience K, l'allongement A% et la charge à la rupture R.

Cette étude permet de connaître les meilleurs conditions de traitement thermique pour des fontes à structure austénito-bainitique.

Abréviation



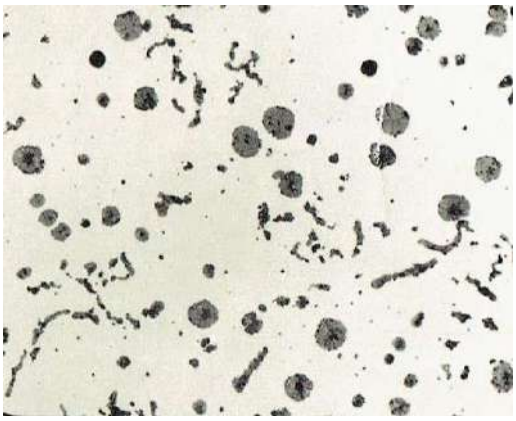
> 90 % sphéroïdes



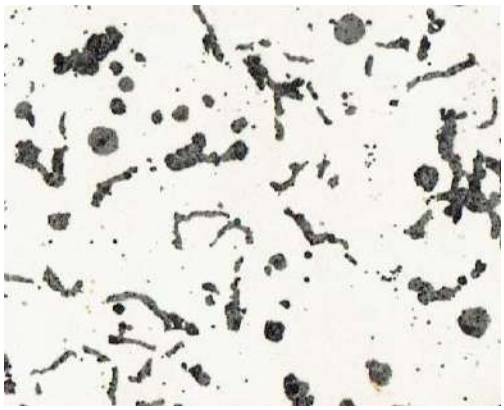
85 % sphéroïdes



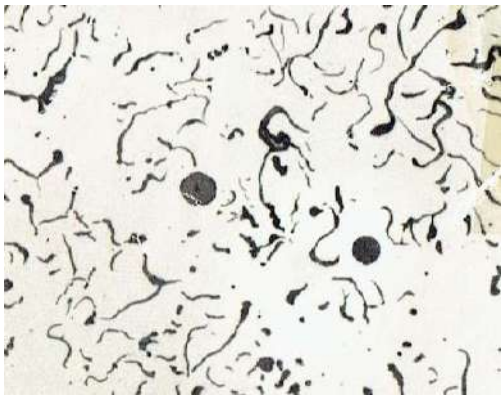
75 % sphéroïdes



55 % sphéroïdes

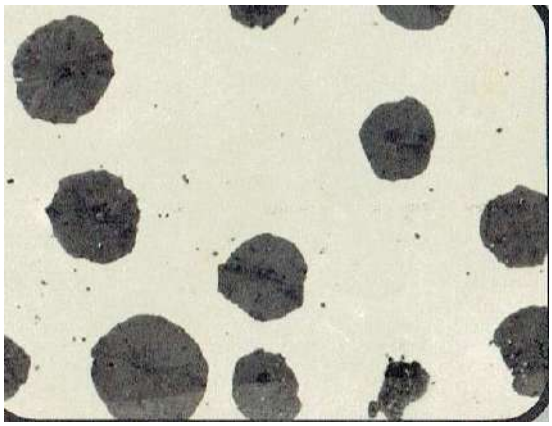


30 % sphéroïdes

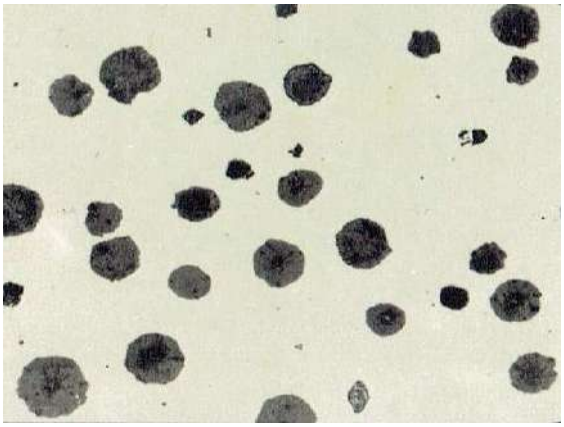


< 10 % sphéroïdes

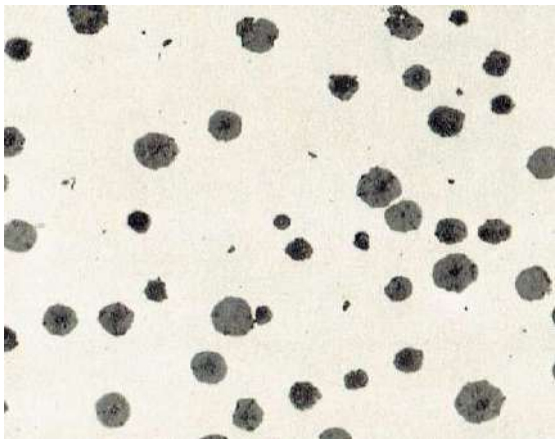
%approximatif de la sphéroïdisation du graphite dans la fonte FGS grossi = 100.



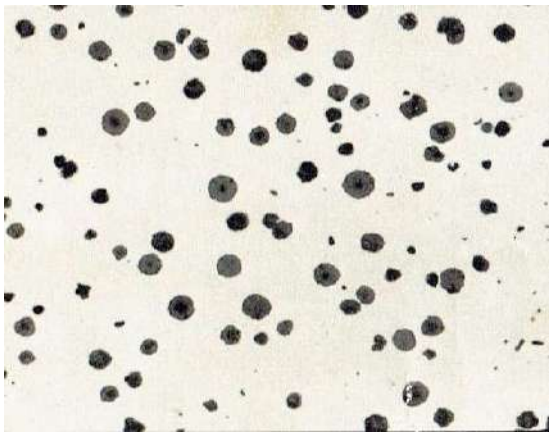
100*) **20**)**



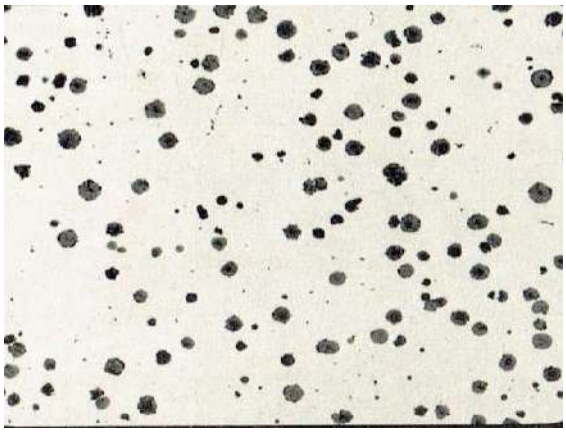
55*) **50**)**



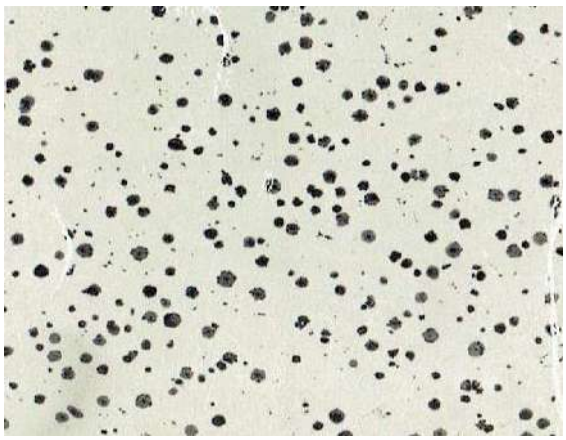
35*) **100**)**



25*) **200**)**

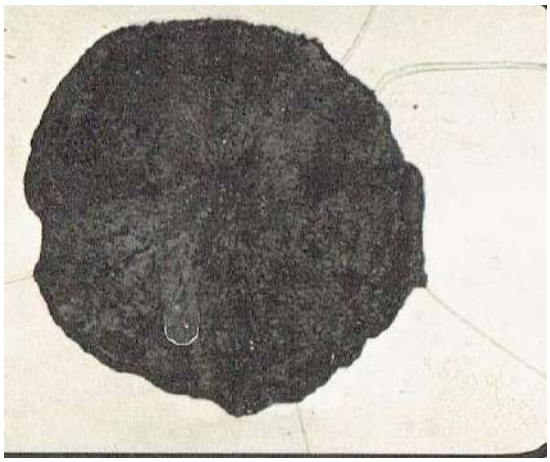


18*) **300**)**

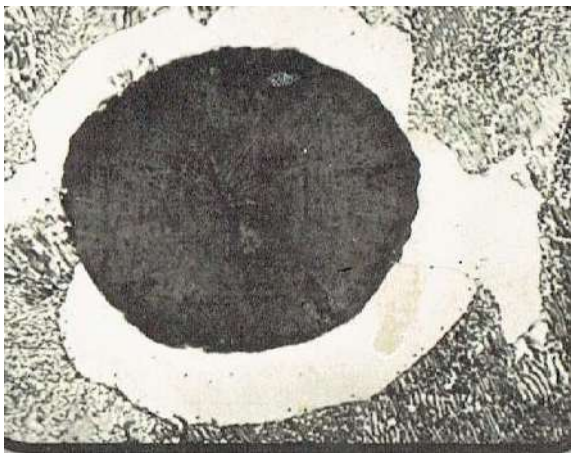


10*) **600**)**

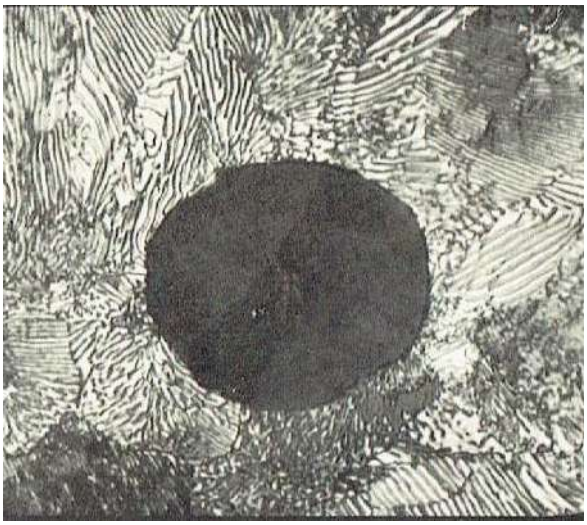
Diamètre de nodules en µm **grossi = 100**



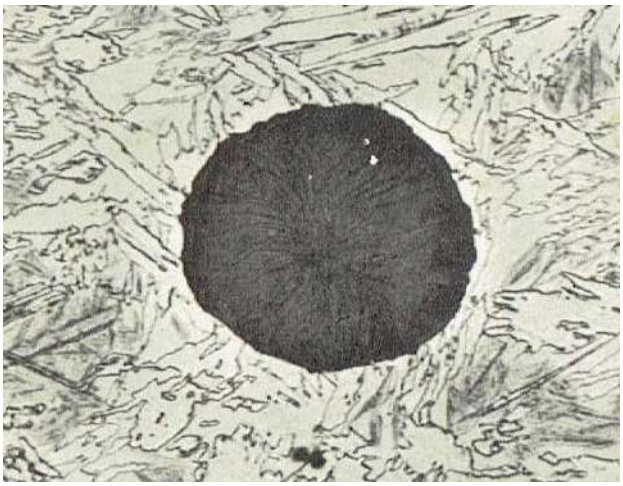
Ferrite



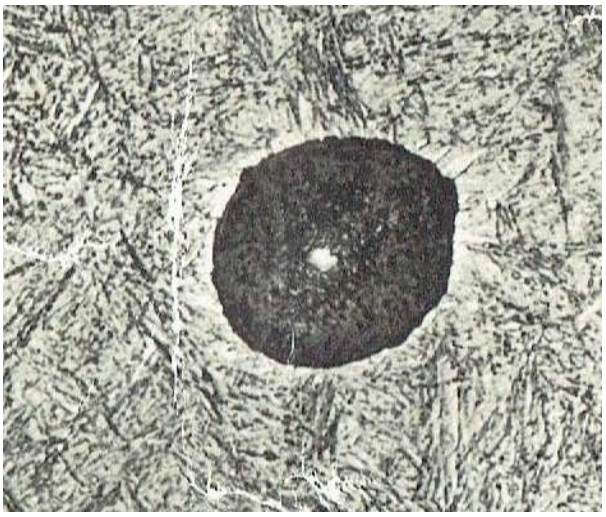
Ferrite-Perlite



Perlite

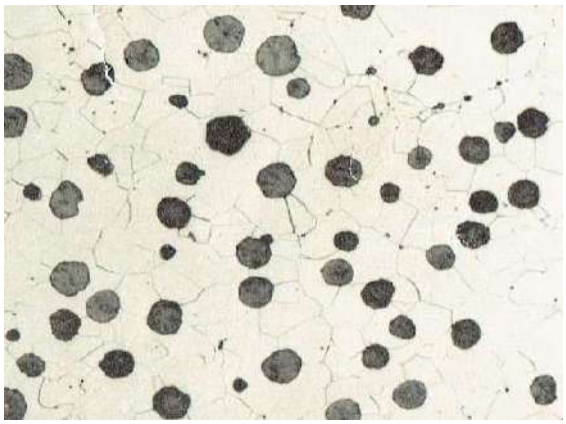


Bainite

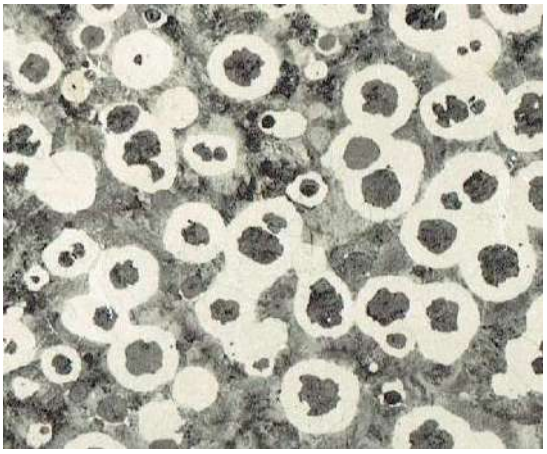


Martensite

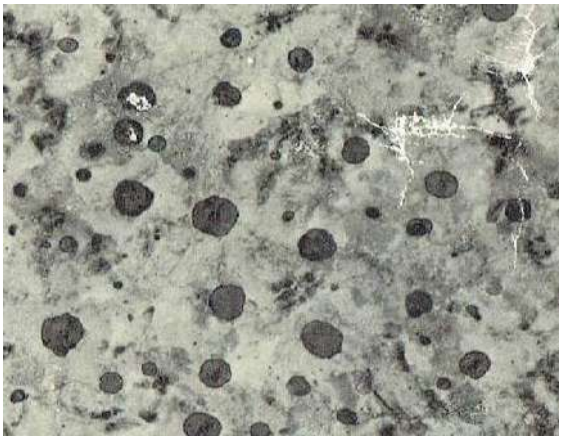
Grossi = 100



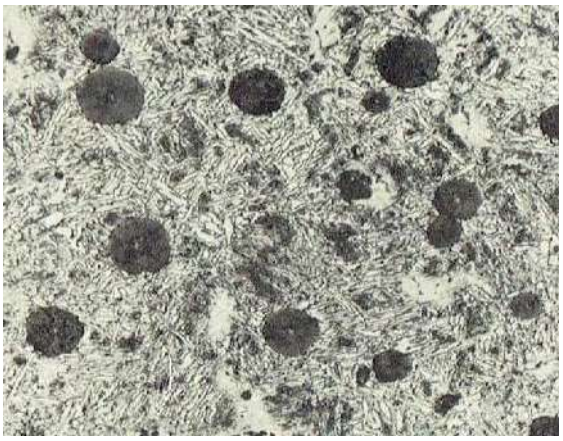
Ferrite



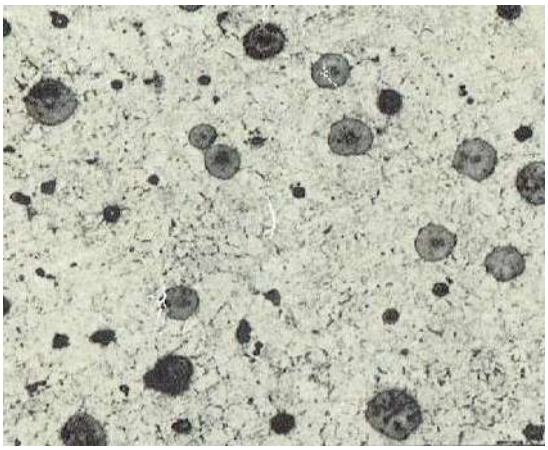
Ferrite-Perlite



Perlite

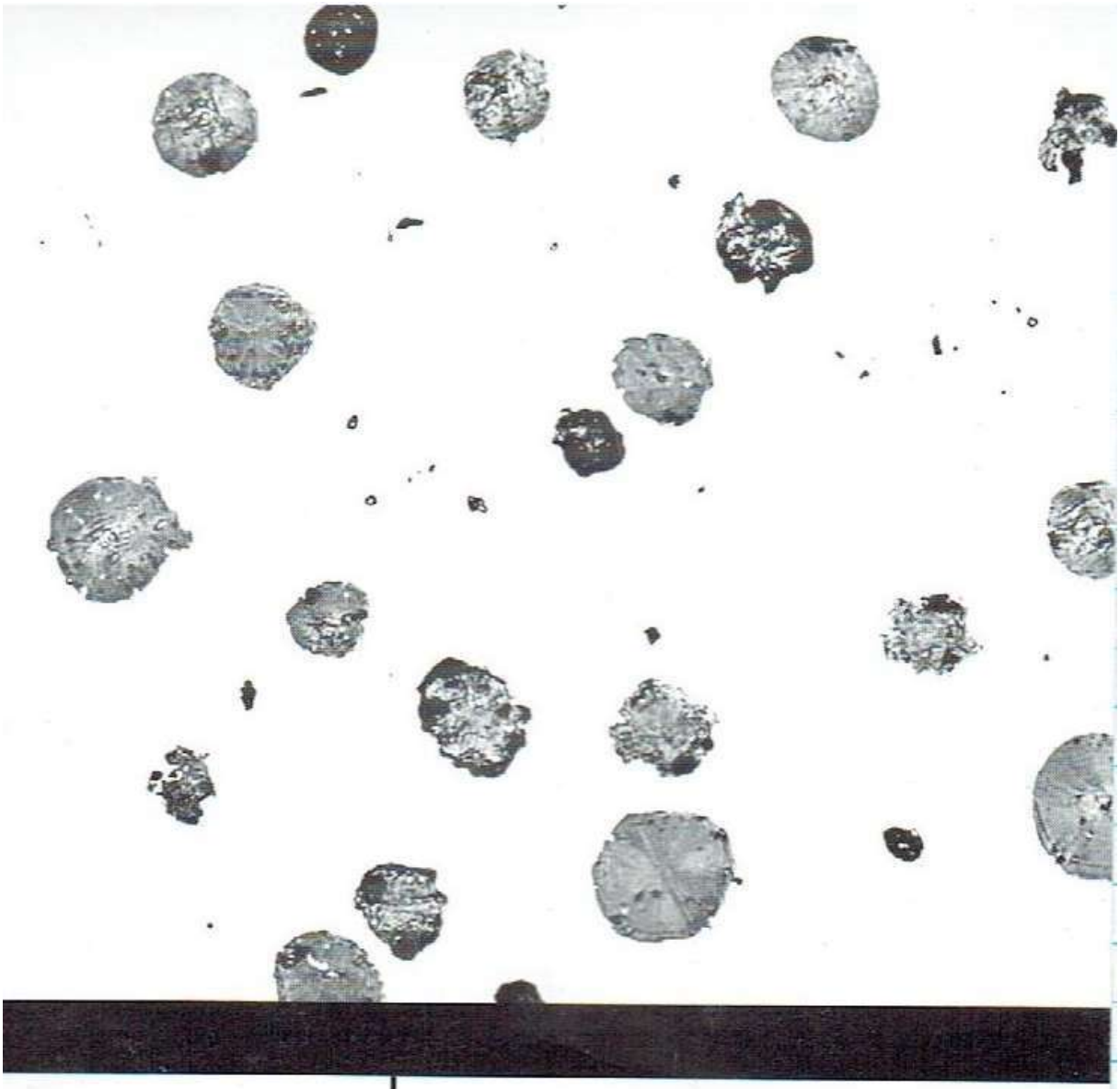


Bainite



Martensite

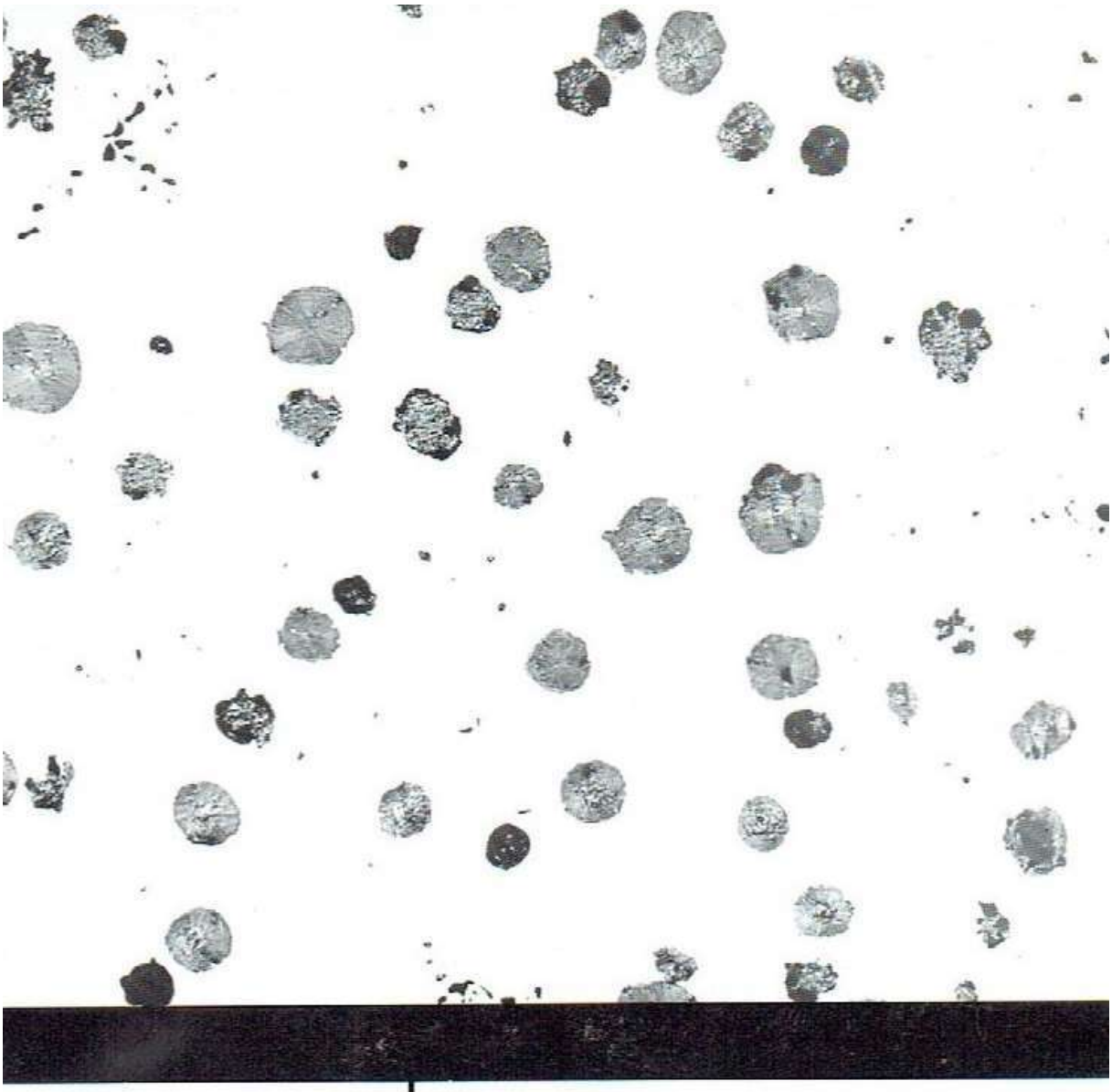
Différent structure de la matrice des fontes GS Grossi = 100



25

Nombre de odules par mm^2

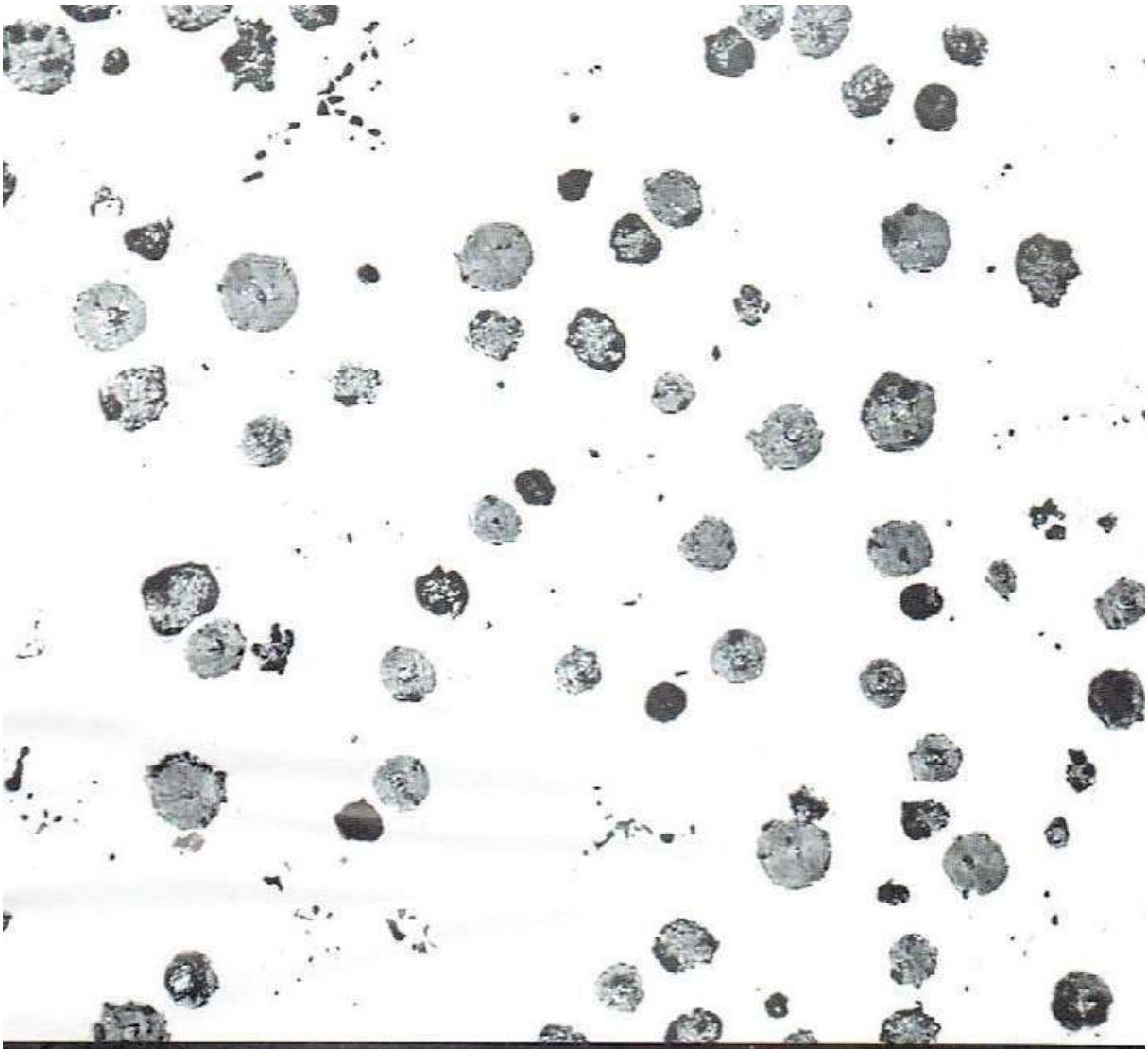
Grossissement x 100



50

Nombre de nodules par mm^2

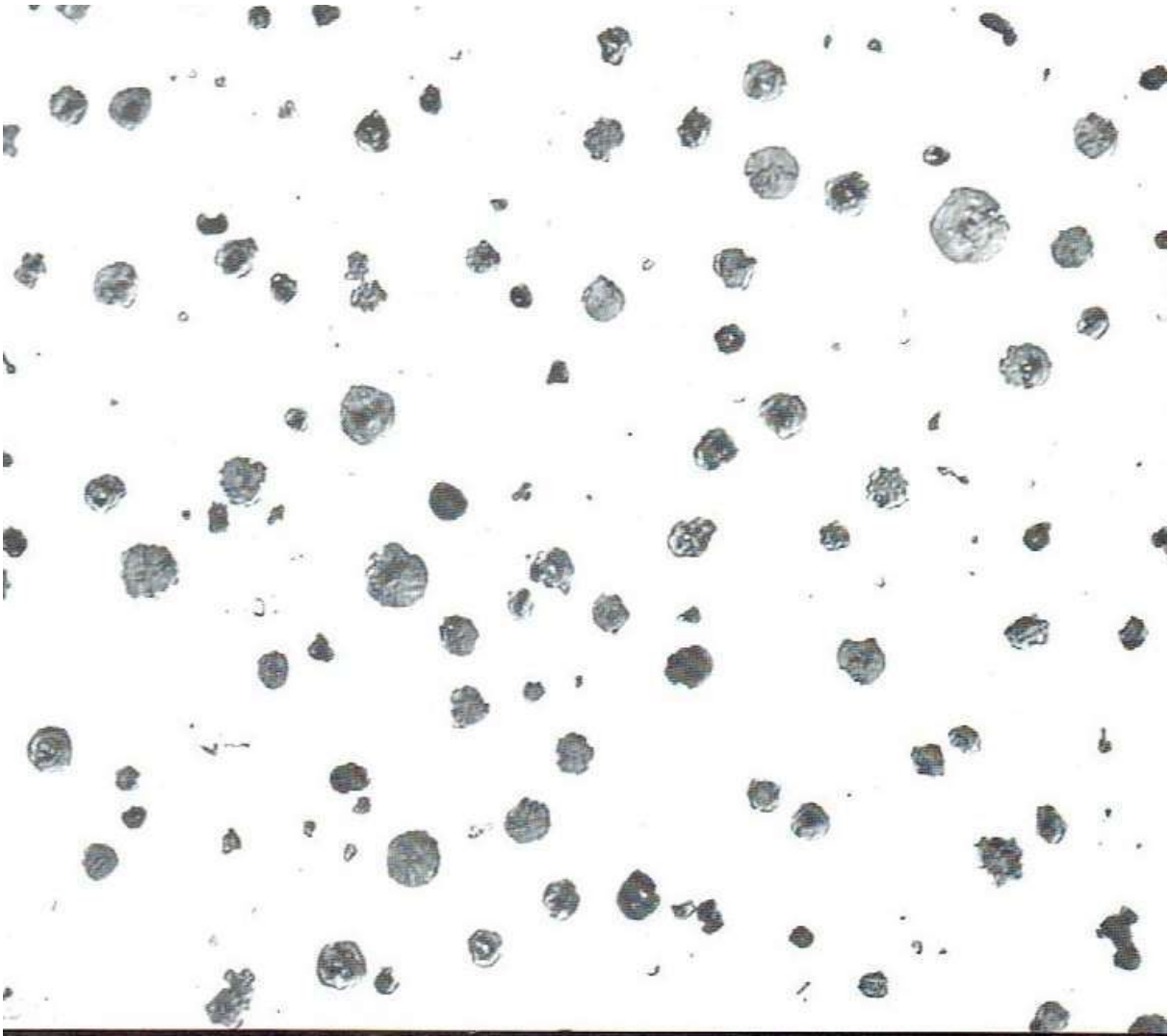
Grossissement x 100



75

Nombre de nodules par mm^2

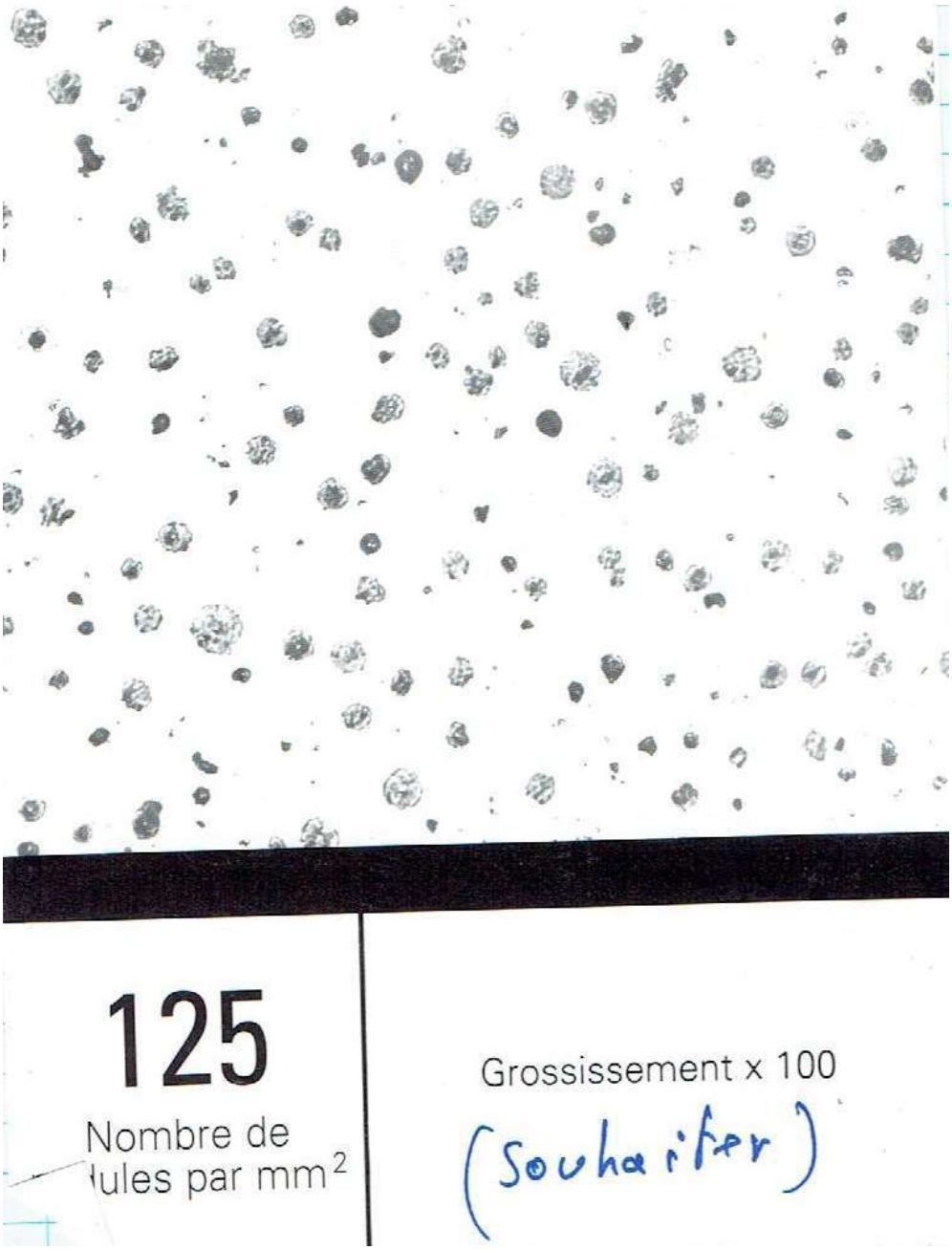
Grossissement x 100



100

Nombre de nodules par mm^2

Grossissement x 100


125
Nombre de
ules par mm2
Grossissement x 100
(Souhaiter)



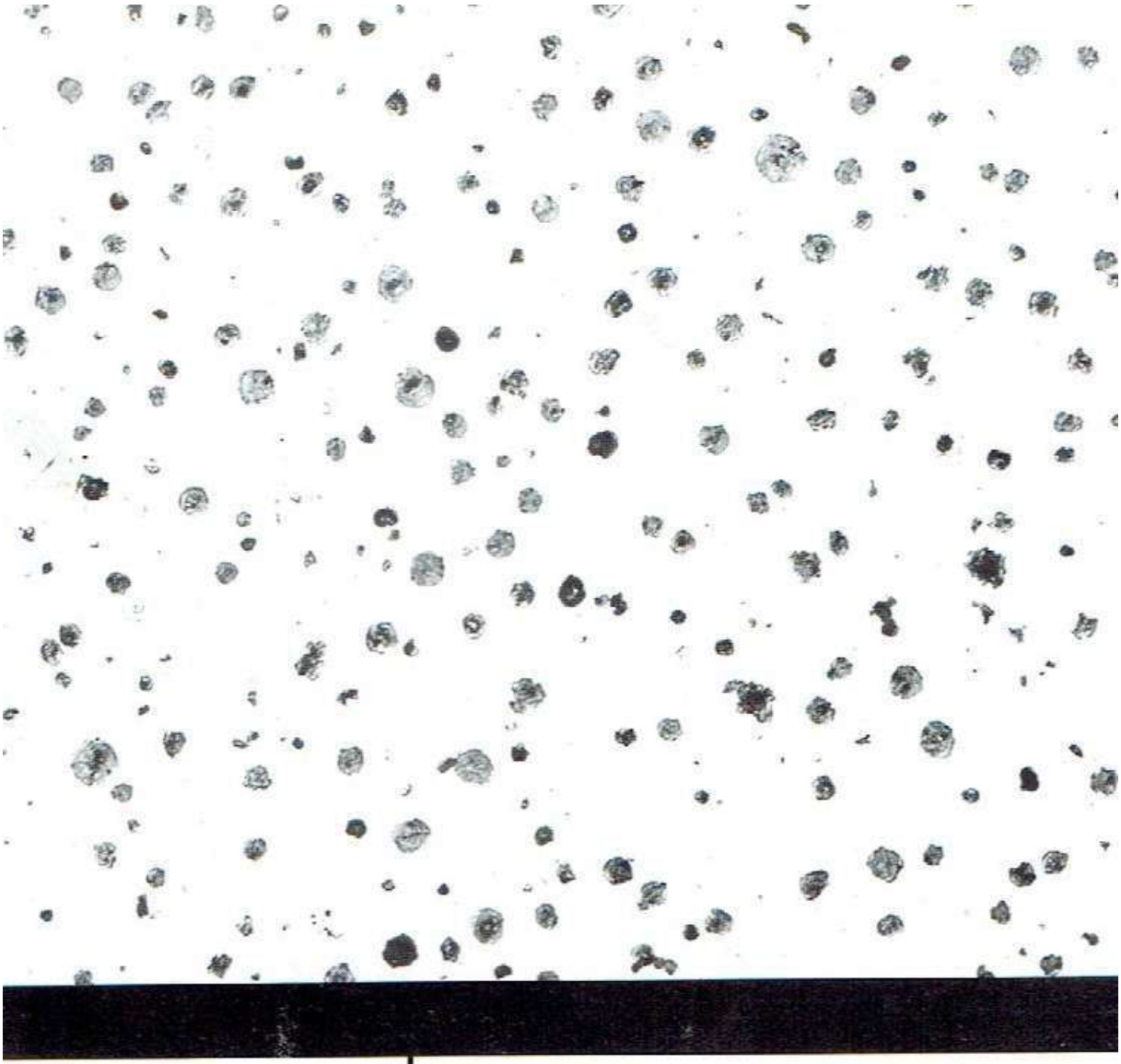
150

Nombre de nodules par mm^2

FGS idéale à usiner

Grossissement x 100

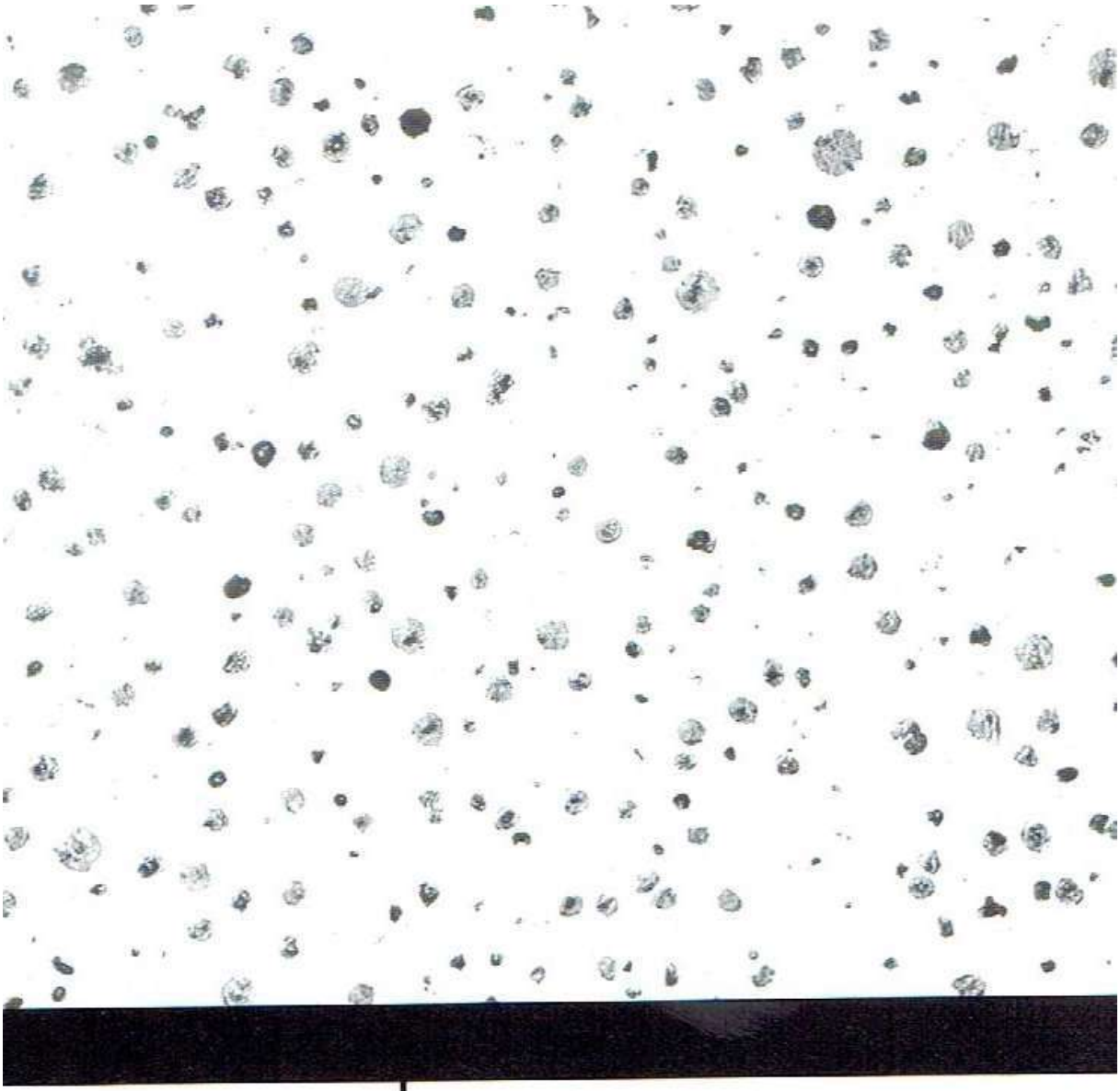
(souhaité)



175

Nombre de nodules par mm^2

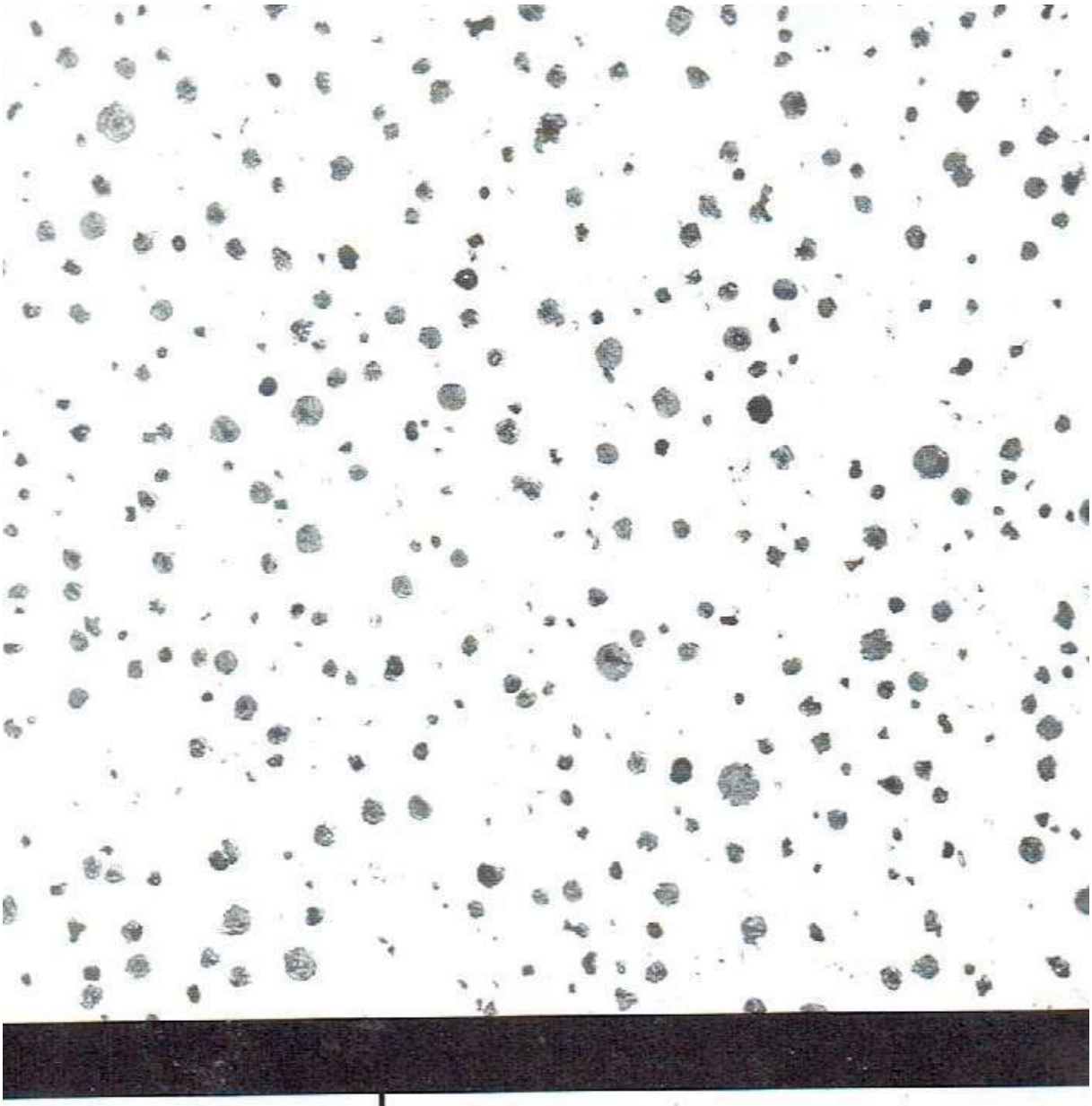
Grossissement x 100



200

Nombre de nodules par mm^2

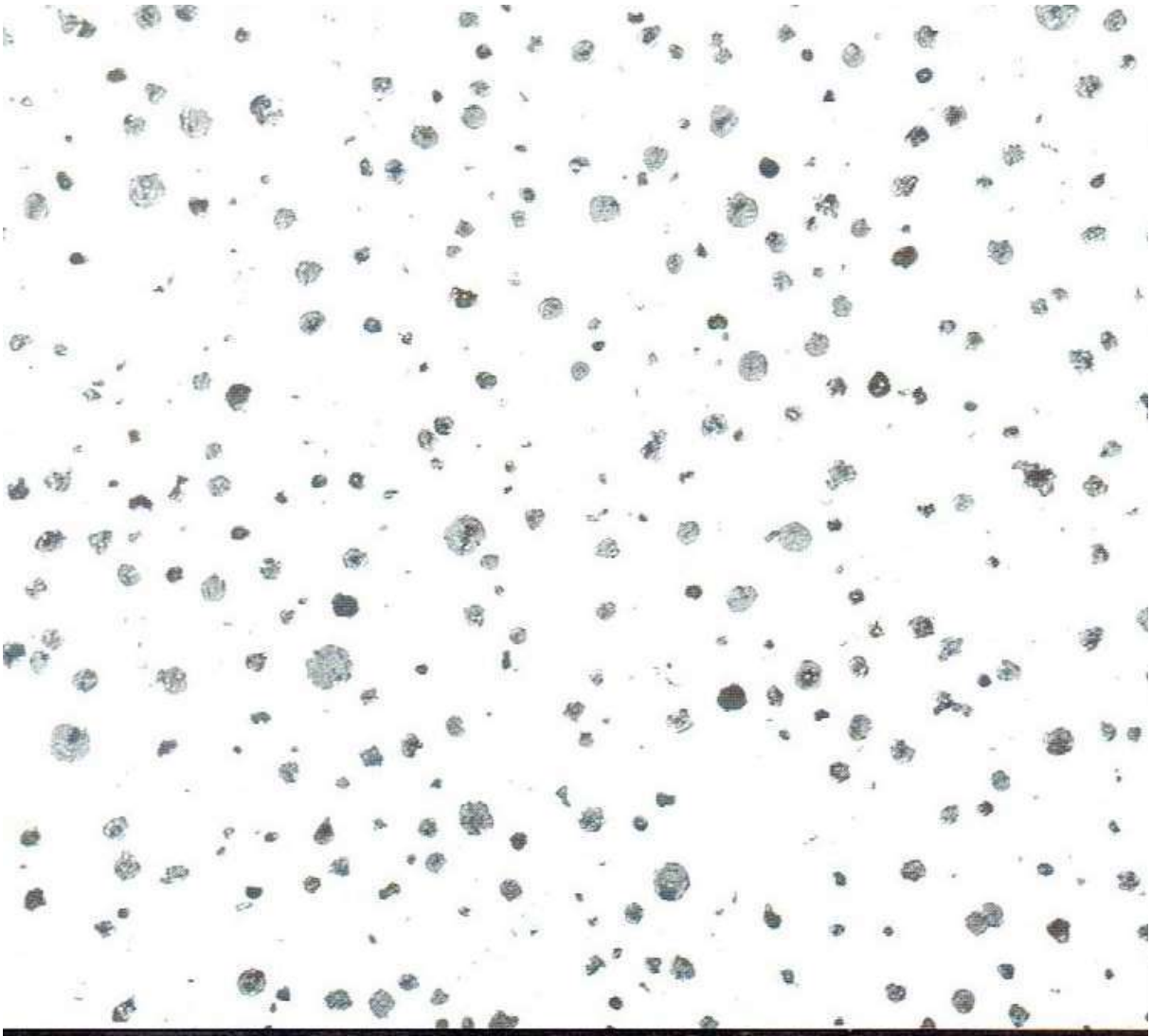
Grossissement x 100



250

Nombre de
odules par mm^2

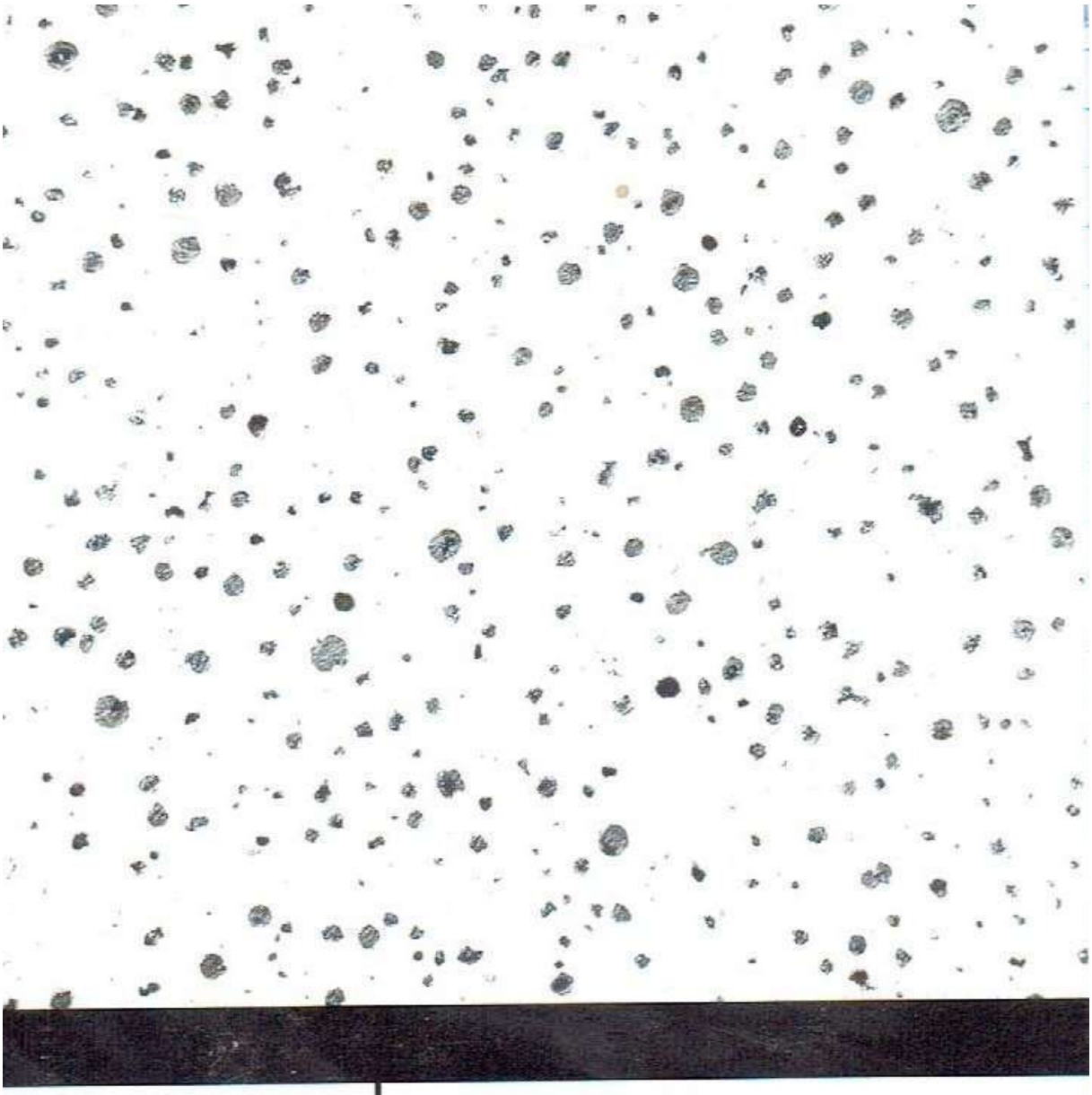
Grossissement x 100



225

Nombre de
nodules par mm^2

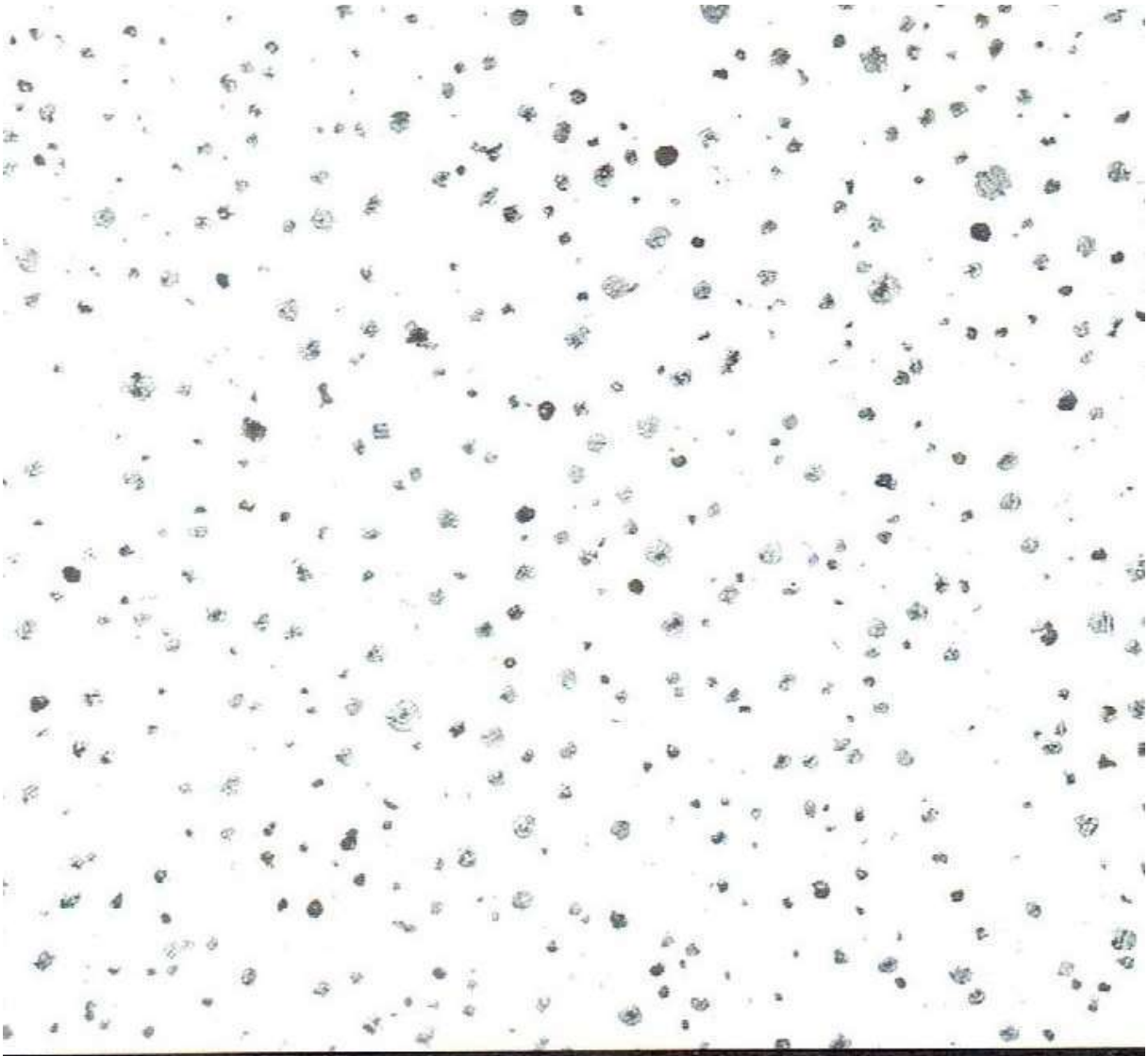
Grossissement x 100



275

Nombre de
odules par mm²

Grossissement x 100



300

Nombre de nodules par mm^2

Grossissement x 100