République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia FARES de MÉDÉA
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Génie mécanique

Option : Ingénierie Des Matériaux et des surfaces

Thème

La différence entre le recuit de ferritisation et recuit de perlitisation (normalisation) d'une fonte grise

Présenté par :

SAIDOUNE Wahiba

Proposé et Dirigé par :

Dr. DJEGHDJOUGH Mohamed

Année Universitaire 2022-2023

Remerciements

Toute la gratitude et le merci à « Allah » le tout puissant pour nous avoir donné le courage et la force pour mener et terminer ce travail.

Nous remercions également nos parents pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

En achevant ce modeste travail nous tenons à remercier notre encadreur :

***« Dr Djeghdjegh Mohamed »** pour ses encouragements.*

*Sans oublier notre enseignante, **« Dr Habireche Mohamed »** pour tous ses conseils.*

*Nous tenons également à adresser nos plus vifs remerciements, à toute l'équipe d'unité de fonderie Poval de berrouaghia, spécialement : **« Mr M. Rabih »** et **« Mm Fouzia »** qui nous ont accompagnées avec beaucoup de patience et de professionnalisme.*

*Nous prions tous nos enseignants de génie mécanique qui ont assuré notre formation, de trouver ici l'expression de notre reconnaissance pour leur sérieux, la qualité de leurs cours et l'intérêt qu'ils nous témoignaient au cours de notre cursus universitaire à la faculté de technologie **« YAHIA FARES »** de Médéa.*

Toute nos gratitudes aux membres de jury qui nous ferons l'honneur de juger notre travail. A tous ceux et toutes celle qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet





Dédicace

Avant tout, je remercie ‘Dieu’
de m’avoir donné la force, le courage, et la volonté pour réaliser ce modeste travail ; que je dédie :

❖ À Mes chers parents qui m’ont tout donné, qui m’ont soutenue, et encouragée durant toute ma formation et éclairé mon chemin avec leurs bénédictions
Je leur souhaite une longue vie.

❖ À mes chers frères et chères sœurs.

❖ À mes amis du département de métallurgie & génie des matériaux.

❖ À toutes les personnes que j’aime.

❖ Et enfin à tous les professionneles de l’industrie du monde principalement ceux de la métallurgie.

❖ À vous...

Merci

ملخص

تعرض هذه الدراسة العمل الذي تم تنفيذه كجزء من مشروع نهاية الدراسة داخل شركة Boval الكائنة في Brouagia. كان الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو فهم الفرق بين التلدين بالحديد والتلدين (التطبيع) لحديد الزهر الرمادي. أخذنا عينات من شفة ميكانيكية مصنوعة في الشركة المضيفة.

أجرينا معالجة حرارية على العينات في ثلاث درجات حرارة مختلفة: 800 و 900 و °950. ولكل معاملة قمنا بتطبيق ثلاث طرق للتبريد: الهواء والهواء المضغوط والتبريد في الفرن.

ثم قمنا بمقارنة النتائج من أجل اختيار أفضل معالجة حرارية وأفضل وضع تبريد. وهكذا تقدم هذه الدراسة تحليلاً شاملاً للمعالجة الحرارية وأنواع التبريد.

الكلمات المفتاح :

الحديد الزهر الرمادي ، الحديد ، المعالجة الحرارية.

Résume :

Cette étude présente le travail réalisé dans le cadre du projet de fin d'étude au sein de l'entreprise Boval située à Brouagia. L'objectif principal de ce projet était de comprendre la différence entre le recuit de ferritisation et recuit de perlitisation (normalisation) d'une fonte grise. Nous avons pris des échantillons d'une flasque mécanique fabriquée dans l'entreprise hôte.

Nous avons effectué un traitement thermique sur les échantillons à trois températures différentes : 800°C, 900°C et 950°C.et pour chaque traitement nous avons appliqué trois méthodes de refroidissement : l'air et l'air comprimé et refroidissement dans le four.

Ensuite, nous avons comparé les résultats afin de choisir le meilleur traitement thermique et le meilleur mode de refroidissement. Ainsi, cette étude présente une analyse complète sur le traitement thermique et les types de refroidissement.

Mots-clés :

Fonte grise, ferritisation, perlitisation, traitement thermique.

Abstract

This study presents the work carried out within the framework of the project of fin study within the POVAL company located in BROUAGIA. The main objective of this project was to understand the difference between ferritization annealing and pearlitization annealing of a gray cast iron. We took some samples of mechanical flange manufactured in the host company.

We performed heart treatment on the samples at three different temperatures: 800°C, 900°C and 950°C, and for each treatment, we have applied three cooling methods: air, compressed air and cooling in the oven.

Finally, we compared the results in order to choose the best heat treatment and the best mode of cooling method. Therefore, this study provides a comprehensive analysis of heat treatment and cooling types.

Key words:

Gray cast iron, ferritization, pearlitization, heat treatment.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciement……..... I

Dédicace…….. II

Résumé……..... III

La liste des figures…….…. VI

La liste des tableaux……... V

Introduction générale……..…… 01

1.1 Définition de la fonte……. 3

1.2 Elaboration de la fonte …….. 3

1.2.1 Description du haut fourneau …… 3

1.2.2 Matières premières …… 5

1.2.3 Le minerai de fer ……... 5

1.2.4 Le coke ……. 5

1.2.5 Les fondants …….. 6

1.2.6 Flux des matières dans une usine métallurgique …….. 6

1.2.7 Agglomération ……..…… 7

1.2.8 La cokerie ……. 8

1.3 Introduction de la charge dans l'HF ……. 9

1.3. 1.Description physico-chimique du haut fourneau ……. 11

1.4. Les fontes du Haut Fourneau …….. 12

1.4.2 Composition chimique de la fonte …… 13

1.4. 3 Classification industrielle de la fonte ……... 14

1.4.4 Fontes grises …….. 14

1.4.5. Fonte grise à graphite lamellaire (GL) ……. 14

1.4.6 Fontes à graphite sphéroïdal (GS) ……. 15

1.4. 7 Fontes à graphite vermiculaire (GV) …… 15

1.4.8 Fontes blanches et fontes trempées ……... 15

1.4.8.1 Fontes blanches …….. 15

1.4.8.2 Fontes trempées ……. 16

1.4.9 Fontes malléables …….. 16

1.4.10 La fonte ductile à trempe bainitique (ADI) ……. 16

1.4.11. Fontes spéciales alliées …….. 16

1.5. Fontes grises à graphite sphéroïdal GS (Les fontes ductiles)…….. 16

1.5.1 Élaboration des fontes GS ……. 18
1.5.1.1 Fours à garnissage basique……. 18
1.5.1.2 Fours réverbères…….. 18
1.5.1.3 Fours électriques à induction (à creuset acide) …….. 18
1.5.1.4 Cubilot acide à vent froid…… 18
1.5.1.5 Cubilot basique à vent chaud…….. 18
1.5.2 Traitement par le magnésium …… 18
1.5.3 Définition des Fontes grises à graphite lamellaire (GL)…… 19
1.6 Les Fontes malléables……... 20
1.6.1 Élaboration des fontes malléables……. 20
1.6.1.1 Premier principe …… 20
1.6.1.2 Deuxième principe ……. 20
1.6.1.3 Un procédé de malléabilisation par décarburation de la fonte blanche …….. 21
1.6.1.4 Un procédé de malléabilisation par graphitisation ……. 21
1.7 Influence des éléments d'alliage sur les fontes……. 21
I.7.1 Les éléments normaux…… 21
1.7.1.1 Le carbone …….. 21
1.7.1.2 Le Silicium ……. 21
1.7.1.3 Influence du silicium sur la vitesse de refroidissement ……. 22
1.7.1.4 Influence du carbone et du silicium …….. 22
1.7.1.5 Le phosphore ……. 23
1.7.1.6 Le soufre …… 23
1.7.1.7 Le manganèse …… 23
1.8 Les éléments d'additions…….. 24
1.8.1 Le nickel …… 24
1.8.2 Le chrome …….. 24
1.8.3 Le molybdène …… 24
1.8.4 Le cuivre …… 25
1.8.5 Le Vanadium ……. 25
1.8.6 Le Titane ……... 25
1.8.7 L'Etain ……... 25
1.8.8 L'Aluminium ……. 26
1.8.9 Le Tellure …….. 26

1.9 Influence de la vitesse de refroidissement sur la microstructure et les1propriétés 27
mécanique microstructures des fontes…….
1.9.1 Décomposition de l'austénite……. 27
1.9.2 L'austénite ……. 28
1.9.3 La Cémentite ……. 29
1.9.4 La Perlite ……... 29
1.10 Comportement mécanique……... 30
1.10.1 Caractéristiques mécaniques des fontes grises lamellaires ……. 30
1.10.2 Facteurs exerçant une influence sur les caractéristiques mécaniques…….. 31
1.10.2.1 Composition chimique ……. 31
1.10.2.2 Microstructure …….. 31
1.10.2.3 Influence de l'épaisseur …….. 31
1.10.2.4 Caractéristiques mécaniques fondamentales …… 32
1.10.2.5 Résistance à la traction ……. 32
Normalisation……... 32
1.10.2.6. Dureté des fontes ……. 34
1.12. Facteurs influencent la corrosion…… 35
1.13 La corrosion des fontes…… 36
traitement thermique des fontes……...
1 .14 Introduction……. 39
1.15 Cycle d'un traitements thermiques …….. 39
1.16 Principes et effets des traitements thermiques…….. 40
1.16.1 Trempe…….. 40
1.16.2 Revenu……. 40
1.16.3 Recuit…… 41
1 .17 Buts et rôle des traitements thermiques…….. 41
2.1 Introduction…… 43
2.2 Echantillons d'études……. 43
2.3 Traitement thermique……. 44
2 .4 Caractérisation métallographique……. 45
2 .4.1 Polissage ……... 45
2.4.2 Finition ……... 46
2.4.3 Attaque chimique ……... 47

2.4.5 Microscopie optique ……... 47
2.5 Caractérisation mécanique ……... 48
2.5.1 Dureté (Rockwell) …….. 48
3.1 Introduction ……. 50
3.2 Avant traitement ……... 50
3.3 APRES TRAITEMENS à 800 ……. 50
3.3.1 Refroidissement dans le four ……. 50
3.3.2Refroidissement à l'air calme ……. 51
3.3.3Refroidissement à l'air comprimé …….. 51
3.4 APRES TRAITEMENS à 900 …….. 52
3.4.1 Refroidissement dans le four …… 52
3.4.2 Refroidissement à l'air calme …… 53
3.4.3 Refroidissement à l'air comprimé ……. 53
3.5 APRES TRAITEMENS à 950 ……. 54
3.5.1Refroidissement dans le four …….. 54
3.5.2 Refroidissement à l'air calme …… 55
3.5.3 Refroidissement à l'air comprimé ……. 56
3.6 La dureté ……... 56
3.6.1 Etat brut avant traitement thermique …… 56
3.6.2 Traitement thermique a 800 …….. 56
3.6.3 Traitement thermique à 900 …….. 57
3.6.4 Traitement thermique à 950……... 57

Listes des tableaux

Tableau 1.1 : Matières premières introduites dans le Haut Fourneau.	7
Tableau1.2 : Composition chimique des différents types de fonte d'HF.	12
Tableau 1.3 : Les propriétés mécaniques de la fonte GV.	15
Tableau1.4 : Classification d'après essai sur barreau coulé à part (Tableau de la norme NF A 32-101 de juin 1987)/	33
Tableau1. 5. Dureté Brinell d'échantillons, à l'état brut de coulée et traités (ferritique), en fonction du diamètre des barreaux coulés.	35
Tableau 1.6 : Facteurs de corrosion.	36
Tableau 3.1 : Composition chimique de la fonte étudiée.	43
Tableau4.1 : La dureté à l'état brut **.**	56
Tableau4.2 : La dureté de traitement thermique à 800.	56
Tableau4.3 : La dureté de traitement thermique à 900.	57
Tableau4.4 : La dureté de traitement thermique à 950.	57

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma d'ensemble (gauche) et une photographie (droite) d'un haut fourneau.	4
Figure1. 2 : Photographie d'une roche de minerai de fer (Hématite).	5
Figure1.3 : Photographie d'une roche de coke.	6
Figure 1.4 : Représentation schématique d'une usine d'agglomération.	8
Figure 1.5 : Schéma d'une cokerie.	9
Figure1.6 : Création et circulation de CO et CO_2 entre les couches de coke et de minerai.	10
Figure 1.7 : Micrographie de la fonte à graphite sphéroïdal avec matrice ferritique	18
Figure 1.8 : Fonte grise lamellaire sans attaque	20
Figure I.9 : Influence du Si sur la vitesse de refroidissement	23
Figure 1.10 : Structure d'une fonte GS à matrice ferritique	27
Figure 1.11 : Influence de quelques éléments sur la dureté de la	27
Figure 1. 12 : Diagramme d'équilibre métastable Fe - Fe_3C	28
Figure1.13 : Structure d'une fonte GS à matrice austénitique	29
Figure 1.14 : Répartition de la perlite dans les fontes grises	30
Figure 2.1: Le cycle thermique	40
Figure 3.1 : Flasque mécanique	43
Figure 3.2 : échantillon d'étude	43
Figure 3.3 : four de traitements thermiques.	44
Figure 4.4 : Différents échantillons dans notre étude.	45
Figure 3.5 : Polisseuse.	46
Figure 3.6 : Polisseuse mono plateau pour la finition.	46
Figure 3.7 : Nitale pour attaque chimique.	47
Figure 3.8 : Photo du microscope	47
Figure 3.9: Rockwell.	48
Figure 4.1 : Micrographie optique état brut (a)×100 (b)×200	50
Figure 4.2 : Micrographie optique Traitement thermique à 800, refroidissement four :(a) ×100 (b)×200	51
Figure 4.3 : Micrographie optique Traitement thermique à 800, refroidissement à l'air calme ; (a)×100 (b)×200	51

Figure 4.4 : Micrographie optique Traitement thermique à 800, refroidissement à l'air comprimé, (a)×100 (b) ×200	52
Figure 4.5 : Micrographie optique Traitement thermique à 900, refroidissement au four: (a)×100 (b) ×200	53
Figure 4.6 : Micrographie optique Traitement thermique à 900, refroidissement à l'air calme, (a)×100 (b) ×200	53
Figure 4.7 : Micrographie optique Traitement thermique à 900, refroidissement à l'air comprime, (a)×100 (b) ×200	54
Figure 4.8 : Micrographie optique Traitement thermique à 950, refroidissement au four, (a)×100 (b)×200	55
Figure 4.9 : Micrographie optique Traitement thermique à 950, refroidissement à l'air calme, (a)×100 (b) ×200	55
Figure 4.10 : Micrographie optique Traitement thermique à 950, refroidissement à l'air comprimé, (a)×100 (b) ×200	56

Introduction générale

Introduction générale :

La fonte grise est un matériau largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles en raison de sa bonne résistance à l'usure, de sa facilité de coulée et de son coût relativement faible. Cependant, malgré ses avantages, la fonte grise peut présenter certaines limitations en termes de résistance mécanique et de propriétés magnétiques. Pour surmonter ces limitations, le traitement de ferritisation a émergé comme une méthode prometteuse pour améliorer les propriétés de ce matériau.

La ferritisation de la fonte grise consiste en la transformation de la matrice graphite-perlite avec ou sans cémentite libre en une matrice ferritique (ferrite + graphite) plus homogène et compacte. Ce processus permet de réduire la fragilité de la fonte grise, d'améliorer sa résistance mécanique et de modifier ses propriétés magnétiques. La ferritisation peut être réalisée par diverses méthodes, notamment le traitement thermique, le traitement de surchauffe et l'addition d'éléments d'alliage.

L'objectif de cette étude est d'étudier en détail le traitement de ferritisation appliqué à la fonte grise, en mettant l'accent sur les différentes techniques et paramètres qui influencent le processus. L'optimisation de ces paramètres permettra d'obtenir des propriétés améliorées de la fonte grise, ce qui élargira ses applications potentielles dans divers domaines industriels.

La présente recherche s'appuie sur une base de connaissances existante concernant la ferritisation de la fonte grise, mais vise à combler certaines lacunes et à apporter de nouvelles perspectives. Les travaux antérieurs ont principalement porté sur l'effet du traitement thermique sur la ferritisation, mais des aspects tels que l'ajout d'éléments d'alliage spécifiques et l'utilisation de techniques de traitement de surchauffe méritent une attention particulière.

La méthodologie de recherche comprendra la sélection d'échantillons représentatifs de fonte grise, la caractérisation initiale des échantillons, l'application des différentes méthodes de traitement de ferritisation et la caractérisation approfondie des échantillons traités. Des techniques de caractérisation telles que la microscopie optique, les essais mécaniques seront utilisés pour évaluer les propriétés structurales, mécaniques et magnétiques des échantillons.

Les résultats de cette recherche fourniront une meilleure compréhension des mécanismes de ferritisation de la fonte grise et permettront d'optimiser les paramètres de traitement pour obtenir les meilleures propriétés possibles. Ces connaissances approfondies ouvriront

également la voie à de nouvelles applications de la fonte grise dans des domaines tels que l'industrie automobile, l'aéronautique et la construction.

En conclusion, cette étude se concentre sur l'étude du traitement de ferritisation appliqué à la fonte grise, avec pour objectif d'améliorer les propriétés mécaniques de ce matériau. Les résultats obtenus contribueront à l'optimisation des procédés de fabrication de la fonte grise et permettront d'explorer de nouvelles opportunités d'application dans divers secteurs industriels.

Le premier chapitre est consacré à deux parte. Le premier parte une étude bibliographique des fontes, et la seconde parte est consacré à traitement thermique des fontes.

La seconde chapitre consacré techniques expérimentales.

Le troisième chapitre consacré résultats et discussions.

Chapitre 1

RECHERCHE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUES SUR LES FONTES

1.1 Définition :

Le terme fonte fait référence aux alliages fer-carbone-silicium, contenant plus de 2.14% de carbone, et habituellement de 1.2 à 3.5% de silicium et d'autres éléments tels que, le manganèse, phosphore et soufre. La fonte est fondue dans des cubilots ou fours à induction. Sa composition et sa vitesse de refroidissement détermineront la nuance grise ou blanche de solidification [1].

1. 2 Elaboration de la fonte :

L'agrégat principal utilisé pour l'élaboration de la fonte est le haut fourneau, dans lequel se déroule le processus métallurgique de réduction, fusion, ainsi que la carburation du fer.

Le but principal du haut fourneau est d'extraire le métal (fer) de son minerai et sa séparation de la gangue.

Les matières premières utilisées pour l'élaboration de la fonte sont :

- Le minerai de fer
- Le coke.
- Les fondants (addition).

1.2.1 Description du haut fourneau :

Le haut fourneau est considéré comme l'un des réacteurs industriels les plus complexes. Sa principale fonction est la production de la fonte, alliage de fer saturé en carbone. Ses dimensions varient entre 1 et 14 m de diamètre au creuset et peuvent atteindre jusqu'à 90 m de hauteur, en fonction de la production recherchée qui peut aller jusqu'à 9000 tonnes par jour (Burt eaux, 1994) pour les fourneaux les plus productifs. On compte à peu près 1500 hauts fourneaux dans le monde [2].

Le haut fourneau est un réacteur à contre-courant dans lequel les matières premières (coke, minerai de fer et aggloméré) introduites solides en haut du fourneau réagissent et échangent de la chaleur avec les gaz réducteurs ascendants. Ceux-ci proviennent de l'oxydation partielle du charbon et de l'air chaud injectés au niveau des tuyères et de la gazéification du coke. Au centre du four, les oxydes de fer et le fer fondent et forment la fonte par réaction avec le carbone du coke. Fonte et laitier (oxydes minéraux fondus) sont extraits alternativement par le bas du four [2].

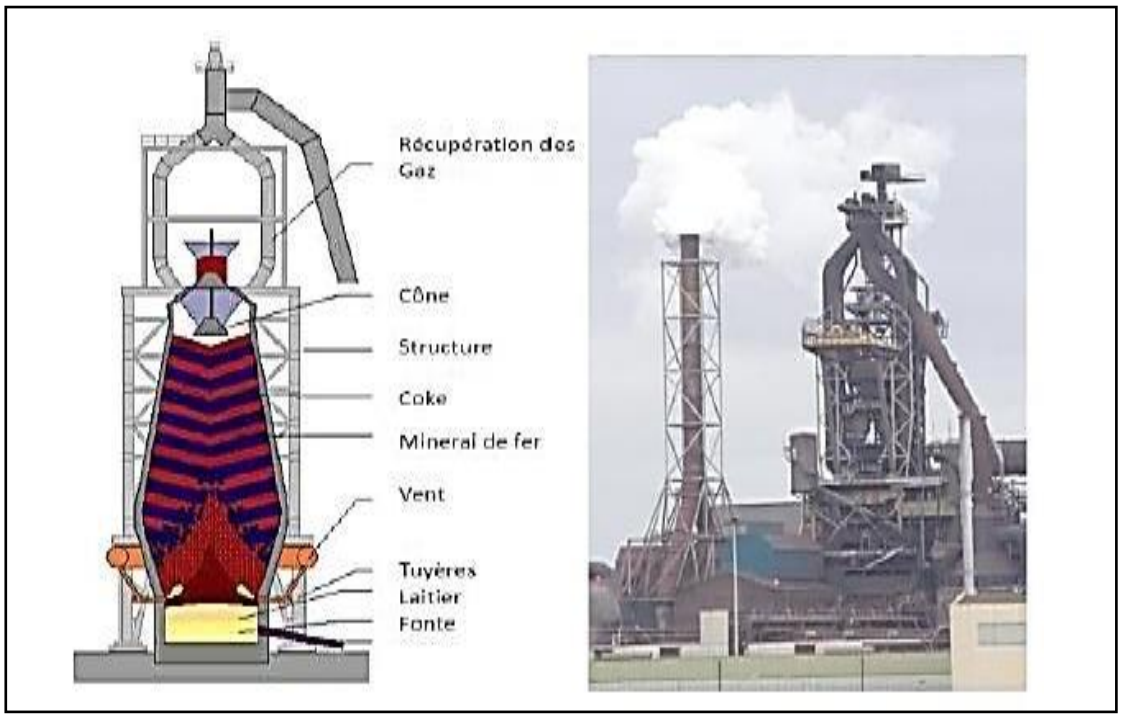


Figure 1.1 : Schéma d'ensemble (gauche) et une photographie (droite) d'un haut fourneau.

On identifie cinq zones principales dans le haut fourneau.

- Le gueulard : Partie haute du four, par où sont chargés les solides et évacués les gaz.

- La cuve : Partie qui a la forme d'un cône évasé vers le bas. Cette forme géométrique favorise l'écoulement de la charge solide et dans une certaine mesure contribue à la réduction de la charge (en faisant converger les gaz, lors de leur ascension, sur un volume rétrécissant) dès son introduction dans le fourneau.

- Le ventre : Partie intermédiaire entre la cuve et les étalages. L'état des matières (solides ou liquides) et les phénomènes physicochimiques diffèrent grandement à ce niveau selon la position radiale.

- Les étalages : Région où les oxydes de fer non encore complètement réduits entrent en fusion (représentée par la zone de fusion dans le schéma). Contrairement à la cuve, cette zone à la forme d'un tronc de cône inversé. Cette forme favorise la régularisation de la descente de la charge et son acheminement vers la zone des tuyères et aussi la distribution du gaz vers la partie supérieure en améliorant l'efficacité de réduction.

- Le creuset : Zone où s'accumulent les liquides (fonte et laitier) avant d'être extraits (trou de Coulée).

1.2.2 Matières premières :

Les matières premières destinées pour l'élaboration de la fonte sont :

- Le minerai de Fer.
- Le coke.
- Et les fondants.

1.2.3 Le minerai de fer :

Ce sont des roches contenant le fer en quantité importante et économiquement peuvent être traités en procédé métallurgique. Selon la forme de combinaisons chimique on distingue plusieurs types de minerais de fer :

- La magnétite ($Fe_3 04$), sa couleur varie du gris foncé au noir.
- L'hématite rouge ($Fe_2 03$), sa couleur varie du rouge foncé au gris foncé.
- L'hématite brune ($Fe_2 03.H_2 0$), sa couleur varie du noir au jaune.
- Fer spathique ou sidérose (FeC03), sa couleur varie du jaune pâle au gris [4].



Figure1. 2 : Photographie d'une roche de minerai de fer (Hématite).

1.2.4 Le coke :

Généralement plus de 90% des fontes sont produites avec du coke. Le coke est obtenu par cokéfaction de la houille. Selon les variétés de la houille utilisée, le coke est constitué de :

Carbone	**Cendre**	**$H_2 0$**	**Soufre**	**éléments volatils**
78 -83%	8 - 11%	2 - 6%	0,8- 1,2%	2 - 3%

Le rôle du coke dans le haut fourneau est :

- Fournir de la chaleur nécessaire pour la marche du processus du haut fourneau.
- Réduction du fer et des oligo-éléments de leurs liaisons dans le minerai et en même temps la carburation du fer.
- Ameublir la charge dans le haut fourneau afin d'avoir une bonne perméabilité aux gaz, grâce à sa grande résistance à l'écrasement [3].

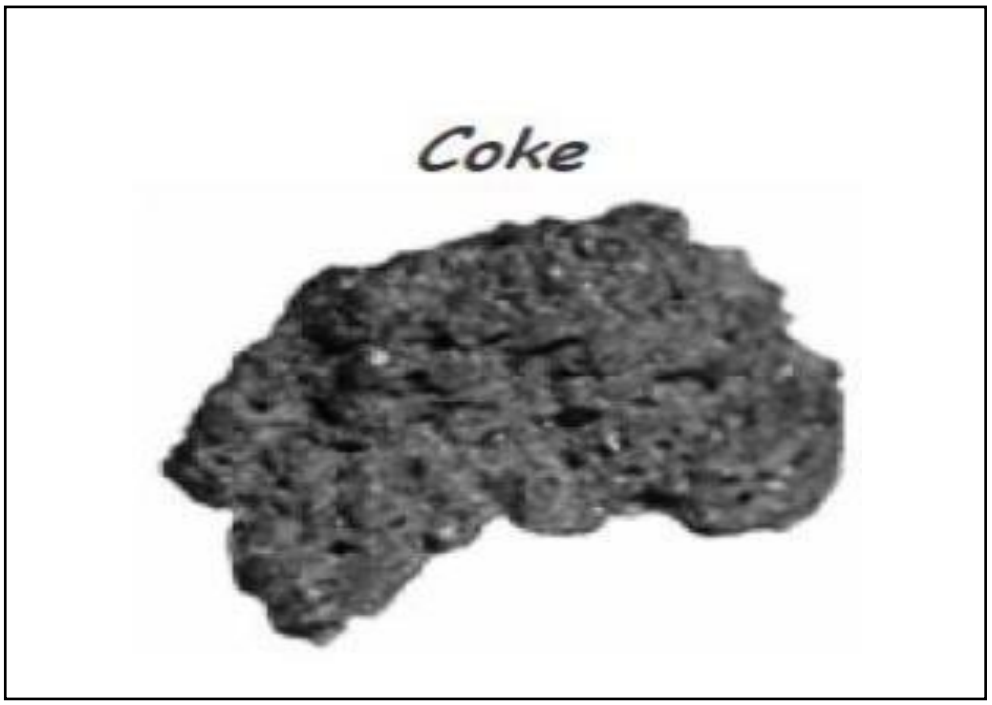


Figure1.3 : Photographie d'une roche de coke.

1.2.5 Les fondants :

Les fondants sont utilisés dans la charge du haut fourneau pour réduire la température de fusion de la gangue, pour la scarification de la soudure du coke et enfin pour l'obtention du laitier fluide ayant une bonne capacité d'absorption du soufre et du phosphore, ces deux derniers éléments sont indésirables dans la composition de la fonte.

Comme fondants, on utilise le plus souvent le calcaire $CaCO_3$ et très rarement la dolomite $MgCO_{3x}Ca\ CO_3$ [3].

1.2.6 Flux des matières dans une usine métallurgique :

Selon le tableau 1, la charge avant d'être introduite dans le haut-fourneau subit une préparation préalable.

Tableau 1.1 : Matières premières introduites dans le Haut Fourneau

Minerai de fer	Coke	Fondant
Concassage Broyage Calibrage Enrichissement Agglomération	Concassage Enrichissement Cokéfaction Séparation Calibrage	Broyage Calibrage Séparation

1.2.7 Agglomération :

Le minerai de fer brut présente rarement les caractéristiques nécessaires (teneur en fer, granulométrie, réductibilité, tenue mécanique) à son introduction directe dans le haut fourneau. Le minerai est donc préalablement transformé en un produit mieux adapté (principalement des boulettes ou aggloméré).

La fonction principale d'une usine d'agglomération est donc de transformer et de préparer la charge minérale avant le haut fourneau.

Elle assure l'amélioration de la nature physique, chimique et/ou minéralogique des matières premières pour pouvoir diminuer la mise au mille, augmenter la qualité de la fonte produite et améliorer la productivité. Son Principe est de porter le minerai, sous forme de microboulettes, à haute température (1200°C) pour, d'une part, en éliminer les matièresvolatiles et, d'autre part, provoquer une fusion partielle de la charge qui conduit à une agglomération des particules. Cette charge plus ou moins poreuse est formée, qui est ensuite cassée et criblée à chaud pour produire les blocs d'agglomérés envoyés au Haut fourneau [4].

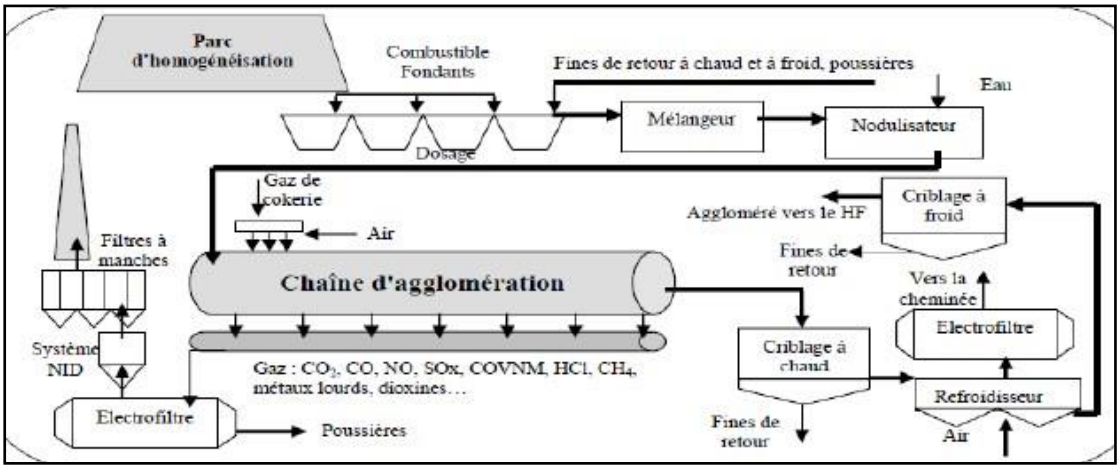


Figure 1.4 : Représentation schématique d'une usine d'agglomération.

1.2.8 La cokerie :

Cette unité a pour fonction la transformation du charbon naturel en coke, matériau carboné mieux adapté au fonctionnement du haut fourneau.

Plus précisément, les avantages de ce procédé sont de :

- réduire le taux de matières volatiles du charbon,
- fritter les grains de charbon, lors du passage par la phase plastique de façon à obtenir une résistance mécanique du coke suffisante.
- avoir une granulométrie du produit adaptée au haut fourneau (diamètre de moins de (80 mm), qui assure une bonne perméabilité.
- récupérer les hydrocarbures sous forme de gaz et de goudrons, pour être valorisés.

La cokéfaction est essentiellement une pyrolyse, c'est-à-dire une cuisson en l'absence d'oxygène. Elle consiste à chauffer le charbon à haute température, à l'abri d'air, puis « Éteindre » le coke produit en versant de l'eau pour le refroidir et éviter qu'il ne brûle au défournement [4].

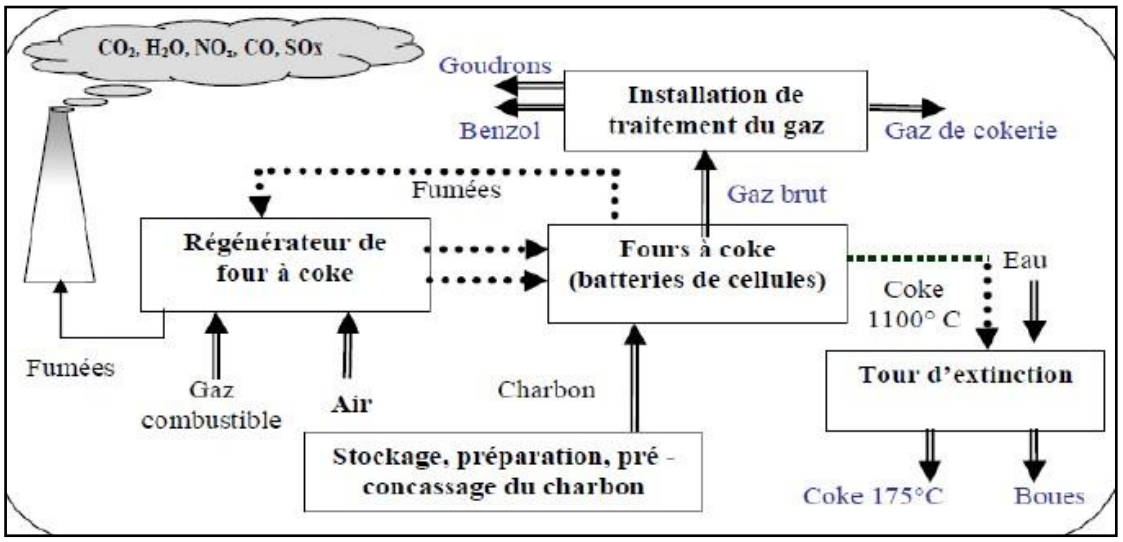


Figure 1.5 : Schéma d'une cokerie.

1.3 Introduction de la charge dans l'HF :

- **Charge introduite :**

Minerais de fer et addition	2160 kg/t de fonte
Fondant (calcaire)	470 kg/t de fonte
Coke	960 kg/t de fonte
Rend chaud (humide)	3 125 kg/t de fonte

- **Produits obtenus :**

Fonte	1000 kg
Laitier	905 kg/t de fonte
Poussière de gaz	130 kg/t de fonte
Gaz de Gueulard (humide)	4680 kg/t de fonte
Total	6715 kg

C'est par le gueulard que la charge est introduite à l'aide d'un skip (monte-charge). Les proportions duminerai de fer, fondants et du coke sont définit au préalable suivant le type de fonte à élaborer.

Le minerai de fer et les fondants sont introduits de telle façon à former des couches qui seront séparées par des couches de coke. Il s'établit un courant descendant des matières d'abord

solides, puis pâteuses et enfin liquide qui traversent le haut fourneau en quelques heures (la durée dépend du volume et de la hauteur du haut-fourneau).

L'air chaud provenant des cowpers (régénérateurs de chaleur chauffés par le gaz de gueulard) est soufflé par les tuyères, ainsi l'oxygène contenu dans l'air chaud participe à la combustion du coke en le transformant en oxyde de carbone (CO), il en résulte un courant gazeux ascendant qui traverse aussi le haut fourneau en quelques secondes**.**

Le courant gazeux possède deux fonctions :

- Transmettre la chaleur obtenue près des tuyères (1800°C) à la charge. Donc la charge descendantes chauffe jusqu'à une température de 1500°C à son arrivée au creuset.
- La deuxième fonction est la réduction des différents oxydes.

La réaction fondamentale de réduction lors du processus métallurgique dans le haut-fourneau est la réduction du fer. L'agent réducteur est le carbone et son oxyde (CO), mais le carbone est plus énergique que le CO. Donc leur rôle est d'éliminer l'oxygène des différents oxydes [5].

La réduction dépend essentiellement de l'affinité chimique de l'élément à réduire par rapport à l'oxygène. Plus l'affinité chimique (solidité chimique) de l'élément avec O_2 est plus grande, plus il est difficile à le réduire des ces oxydes.

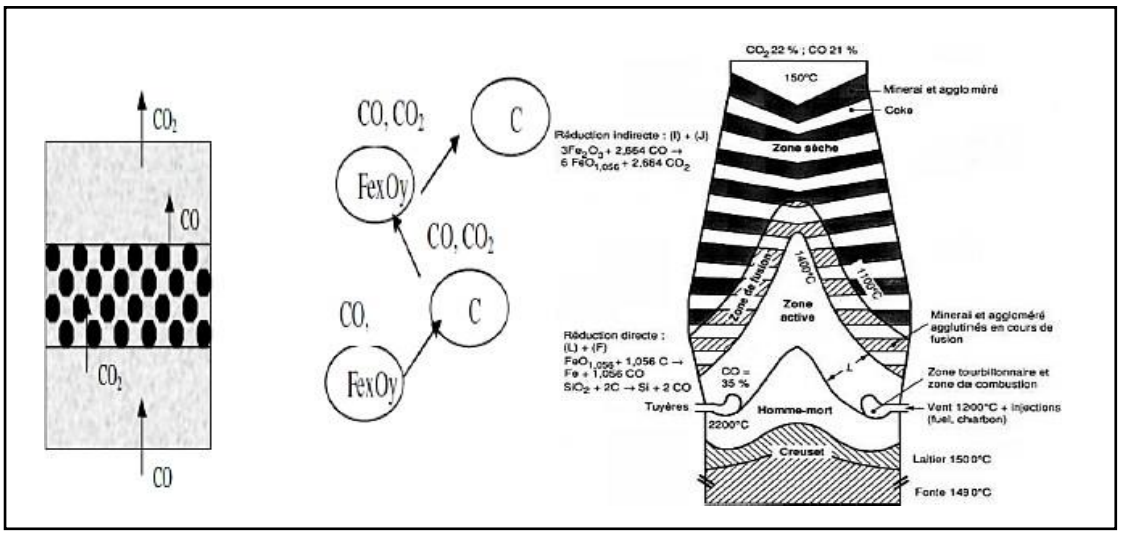


Figure1.6 : Création et circulation de CO et CO_2 entre les couches de coke et de minerai.

Il existe deux types de réduction :

- La réduction directe, celle qui se passe avec le carbone pour former CO.

- La réduction indirecte avec CO et H_2 pour former CO_2 et H_2O vapeur.

1.3.1 Description physico-chimique du haut fourneau :

Dans ce qui suit, on ne donnera qu'une description brève des réactions les plus importantes.

En reprenant la même division des zones du haut fourneau que sur la figure 4, on peut passer en revue les principales réactions chimiques selon les zones.

La zone sèche (ou cuve) est le siège de la réduction des oxydes de fer par CO et accessoirement H_2. Au niveau de la partie supérieure de cette zone, l'hématite est réduite en magnétite qui est ensuite réduite en wüstite.

- T > 320°C

  ⟹ $3\ Fe_2O_3 + CO \leftrightarrow 2\ Fe_3O_4 + CO_2$ (R1)

- 620°C < T < 950°C

  ⟹ $Fe_3O_4 + CO \leftrightarrow 3\ FeO + CO_2$ (R2)

- 950°C < T< 1100°C

  ⟹ $FeO + CO \leftrightarrow Fe + CO_2$ (R3)

Dans la partie supérieure de la cuve, aux températures inférieures à 950°C, où il n'y a pas de régénération de CO_2, la réduction se fait par un gaz CO/CO_2, dont le pouvoir réducteur diminue au fur et à mesure que le gaz s'élève dans la cuve.

La réduction de FeO se poursuit jusqu'à l'équilibre avec le gaz à une température d'environ 950°C. La zone dans laquelle il n'y a plus de réduction de FeO est appelée zone de réserve chimique. Elle est contenue dans une zone plus large définie par une température constante (950°C), appelée zone de réserve thermique.

⟹ $CO_2 + C \leftrightarrow 2CO$ (R4)

C'est une réaction réversible, qui a lieu dans le sens direct aux hautes températures, très endothermique qui détermine et limite la température de la zone de réserve thermique. Dans la zone de fusion, se forme le laitier par fusion de la gangue et des additions de fondants (chaux…). Cette zone est aussi siège de la fusion du fer et du FeO non réduit.

Dans la zone active : la wüstite restante est réduite en fer, tandis que la fonte se carbure en carbone :

⟹ $FeO + C \rightarrow Fe + CO$ (R5)

⟹ $Fe + C \rightarrow$ Fonte (R6)

Au niveau des tuyères, le CO est généré par combustion du coke par l'oxygène selon la réaction :

$C + ½ O_2 \rightarrow CO$ (R7)

En parallèle avec :

$C + O_2 \rightarrow CO_2$ (R8)

Enfin au niveau du creuset, la fonte et le laitier se séparent par décantation, la fonte s'affine et continue de s'enrichir en carbone jusqu'à saturation (~ 4,7% en masse).

En réalité, du fait des gradients radiaux il n'y a pas de frontière nette entre ces différentes zones. L'intérêt de cette décomposition est purement conceptuel. Elle permet de séparer de grandes zones en fonction des phénomènes qui y prédominent. Ainsi le haut fourneau est souvent subdivisé en deux grandes zones : zone dite de préparation (du haut jusqu'à la fin de la zone de réserve chimique) et zone d'élaboration (partie basse). La figure 2 montre cette subdivision et les principales réactions [6].

1.4. Les fontes du Haut Fourneau :

Les fontes obtenues dans le H-F sont destinées pour l'affinage de l'acier dans les différents fours et convertisseurs ainsi que pour le moulage des pièces mécaniques (fonderie). Elles se distinguent l'une de l'autre par leurs compositions chimiques.

Le tableau 1.2 nous indique les différents types de fontes obtenues dans le H-F avec leur composition chimique.

Tableau1.2 : Composition chimique des différents types de fonte d'HF.

Matière	**Composition chimique en pourcent poids**				
	C %	Si %	Mn %	P %	S %
Type de fonte	/	/	/	/	/
Font pauvre en Mn	± 4	Jusqu'à 1	<1	0.08-0.12	Jusqu'à 0.05
Font riche en Mn	± 4	Jusqu'à 1	2-3	0.08-0.12	Jusqu'à 0.05

Fonte thomas	3.2-3.6	0.3-0.6	0.5-1.5	1.7-2.2	0.05-0.15
Fonte Bessemer	3.8	1 - 2.5	1-3	0.07-0.1	Jusqu'à 0.04
Fonte de fonderie	3.5-4.2	2 - 2.5	0.07-0.1	0.08-0.12	0.02
Fonte hématite	3.5-4.2	2-2.5	0.7-1.5	0.08-0.12	Jusqu'à 0.04
Fonte manganèse	6-8	<1	3-8	0.2-0.3	0.02
Fonte silicium	1.2-1.6	9-15	0.5-0.7	0.12-0.16	Jusqu'à 0.04

La fonte liquide comporte des inclusions variées. Quelques-unes sont souvent introduites volontairement. Outre leurs caractères alphagènes ou gammagènes et leurs actions sur la trempabilité, valables pour les alliages ferreux, les éléments introduits dans les fontes sont caractérisés par leurs actions :

- Graphitisantes (Si, C, Al, Cu, Ni, Zr...) qui se traduisent par la création de germes servant deSupport de croissance pour le graphite.
- Antigraphitisantes (Cr, Mo, Mn, S, V, W, B...) [7].

1.4.2 Composition chimique de la fonte :

Une fonte est un alliage métallique dont l'élément essentiel est le fer, et dont la teneur en carbone est 2 à 6,67 %. L'excès de carbone provoque la formation de phases qui donnent à la fonte une structure composite.

En dehors du fer et du carbone, quatre autres éléments entrent principalement dans la composition des fontes non alliées :

- **Le silicium** (1 à 3 %) ;
- **Le manganèse** (0,1 à 1 %) ;
- **Le soufre** (jusqu'à 0,15 %) ;
- **Le phosphore** (jusqu'à 1,3 %).

Le silicium, en particulier, est un élément indispensable au fondeur pour régler le comportement Métallurgique et la structure des fontes.

Toute fonte industrielle contient aussi, parfois volontairement ajoutés, des éléments à L'état de traces utiles, nocives ou négligeables eu égard à la qualité recherchée.

Les propriétés peuvent en outre être améliorées ou ajustées en vue de certaines applications Grâce à des éléments d'alliage dont l'action présente, malgré l'abondance du carbone, de profondes analogies avec le cas des aciers ; les principaux sont les Suivants :

- le nickel (jusqu'à 35 %) ;
- le chrome (jusqu'à 30 %) ;
- le molybdène (jusqu'à 3 %) ;
- le cuivre, l'étain, le vanadium, l'aluminium, …

Ces mêmes éléments se retrouvent d'ailleurs souvent à l'état de traces, comme impuretés. Parfois utiles des fontes non alliées [8].

1.4. 3 Classification industrielle de la fonte :

Selon les considérations métallurgiques évoquées ci-avant, on classe les fontes ou les produits moulés en fonte en six grandes familles.

1.4.4 Fontes grises :

Cette famille de fonte est caractérisée par son carbone sous forme de graphite. La structure graphitique du carbone est obtenue par un refroidissement très lent de la fonte, d'autres éléments d'addition permettent la mise en forme structurelle du graphite (magnésium pour précipiter sous forme de nodules par exemple) [9].

1.4.5. Fonte grise à graphite lamellaire (GL) :

Lorsque la composition de la fonte liquide et sa vitesse de refroidissement sont appropriées, le carbone précipite au cours de la solidification sous la forme de lamelles de graphite séparées. Les feuillets de graphite croissent par leur tranche au sein du liquide et donnent ainsi naissance à la forme en lamelles caractéristique de ces fontes. Les caractéristiques de ces fontes dépendent de la dimension moyenne, du nombre et de la répartition des lamelles

de graphite, ainsi que de la dureté relative du métal de la matrice. Ces facteurs sont arrangés principalement par les teneurs en carbone et en silicium du métal et par la vitesse de refroidissement de la pièce moulée [9].

1.4.6 Fontes à graphite sphéroïdal (GS) :

Les fontes à graphite sphéroïdal sont, après les fontes grises, celles qui sont le plus souvent demandées. Ces fontes, dites aussi ductiles, ont été désignées parfois sous le nom de fontes nodulaire ou de fonte GS, les fontes à graphite sphéroïdale présentent un rare ensemble de caractéristique, du fait que le graphite est présent sous formes de sphéroïdes ou sphérules. Cette forme sphéroïdale est obtenue par addition d'une quantité très faible, mais bien définie, de magnésium à une fonte liquide. Comme les fontes malléables, les fontes à graphite sphéroïdal présentent une relation contrainte-déformation linéaire, d'une limite d'élasticité étendue et une bonne capacité de déformation. La figure montre une structure de fonte GS [9].

1.4. 7 Fontes à graphite vermiculaire (GV) :

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

Tableau 1.3 : Les propriétés mécaniques de la fonte GV [9]

Propriétés mécaniques	Font à graphite vermiculaire
Résistance mécanique (Rm en MPa)	450
Module d'élasticité (E en GPa	145
Elongation	1.5
Conductivité thermique (W/mK)	37
Dureté (BHN 10 /3000	217-241

I.4.8 Fontes blanches et fontes trempées :

I.4.8.1 Fontes blanches :

Les fontes blanches sont caractérisées par l'absence complète du graphite car le carbone, en excès - par rapport à sa solubilité maximale dans l'austénite - est combiné

I.4.8.2 Fontes trempées :

On appelle « fontes trempées » des fontes coulées au contact d'éléments refroidissants constituant le moule en tout ou partie ; ainsi les couches corticales solidifiées dans ces conditions sont en fonte blanche - effet de « trempe primaire » avec solidification dans le système métastable - tandis que le coeur et d'autres parties de la même pièce se solidifient en fonte grise ou GS [10].

I.4.9 Fontes malléables :

Les fontes malléables sont des fontes qui acquièrent une résistance et une capacité de déformation par des traitements thermiques appropriés [11].

Un recuit de graphitisation pour la transformation de la cémentite en graphite nodulaire (malléable à cœur noir).

1. Un recuit de décarburation dans le but d'éliminer le carbone de la couche superficielle (malléable à cœur blanc) [12].

1.4.10 La fonte ductile à trempe bainitique (ADI) :

Il s'agit d'une famille de fontes GS obtenue par traitement thermique à deux niveaux (austénitisation + trempe bainitique) ;

1.4.11 Fontes spéciales alliées :

La métallurgie des fontes permet d'améliorer leurs propriétés en vue d'applications définies et selon les mêmes principes que la métallurgie des aciers : apport d'éléments d'alliage, traitements thermiques. Ainsi, malgré les spécificités des fontes, on retrouve le même type de classification :

- les fontes peu alliées ou modérément alliées.
- les fontes grises, GS ou blanches fortement alliées [12].

1.5 Fontes grises à graphite sphéroïdal GS (Les fontes ductiles) :

Dans les fontes à graphite sphéroïdal la teneur en carbone est de 3,5 à 4%, appelées aussi fontes ductiles. Ces fontes sont obtenues par l'addition d'éléments spéciaux, le plus souvent à base de magnésium dans le bain de la fonte liquide (dans une poche de traitement sandwich), qui transforme le graphite en sphères ou bien nodules [132311²]. Les fontes à graphite sphéroïdal sont des alliages fer-carbone-silicium, appelées aussi fonte ductile, dans lesquelles le carbone graphitique se présente directement, après coulée et refroidissement dans le moule

sous forme de petits sphéroïdes compacts assez régulièrement répartis dans une matrice d'acier [14].

La composition chimique de la fonte à graphite sphéroïdal non alliée correspond généralement à des pourcentages compris dans les plages suivantes :

- C totale varie de 3.4 à 4.0 % ;
- Si varie de 2.0 à 3.0 % ;
- Mn varie de 0.10 à 0.80 % ;
- P < 0.10 % ;
- S < 0.02 % (le plus bas possible, après désulfuration si nécessaire) ;
- Mg varie de 0.02 à 0.10 % ;

Le pourcentage de certains éléments dits nocifs (Bi, Sb, Pb, Ti) ne doit pas dépasse certaines valeurs généralement très basses. Pour certaines applications, la teneur en silicium peut être comprise entre 1 et 1.5 %. Dans la recherche de l'obtention d'une structure ferritique sans avoir recours aux traitements thermiques, il peut être nécessaire de maintenir le pourcentage en manganèse à une valeur inférieure à 0.15% et de veiller à ce que les teneurs en certains éléments ne dépassent pas une valeur déterminée (0.07% pour le chrome, 0.02% pour l'étain, 0.50 % pour le cuivre).

Certains éléments d'alliage peuvent être ajoutés, en quantité modérée, a la composition de base en vue d'améliorer la tenue de la pièce à la chaleur (Cr, Mo.), à l'usure (Ni, Cr), à la corrosion (Cu) ou encore de réduire la sensibilité à l'épaisseur (Ni). En quantités élevées, la présence d'éléments d'alliage entraine la formation de structures particulières

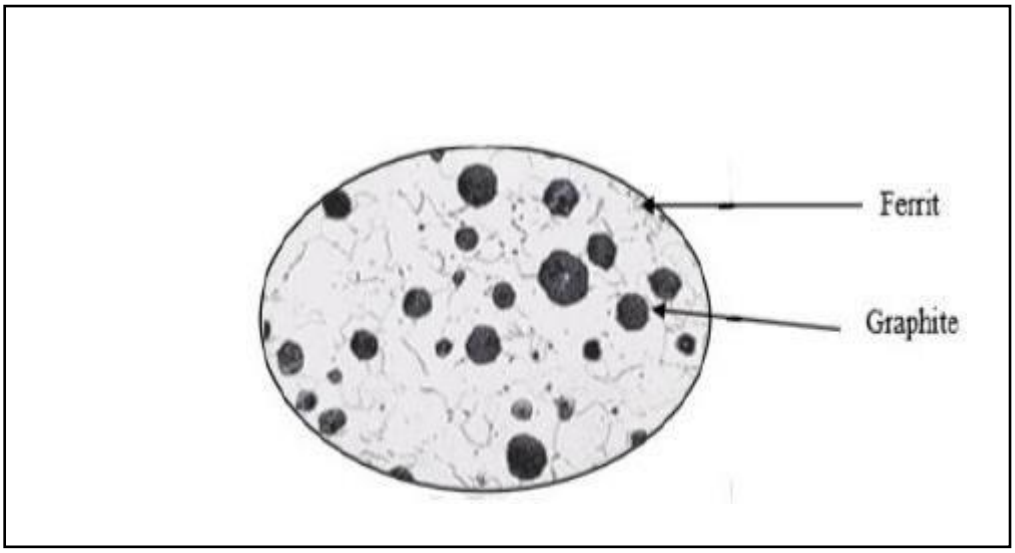


Figure 1.7 : Micrographie de la fonte à graphite sphéroïdal avec matrice ferritique [12].

1.5.1 Élaboration des fontes GS :

La fonte de base destinée à la transformation en fonte G.S. peut être élaborée dans l'un des quelques fours généralement utilisés en fonderie. Les fours les plus rencontrés sont :

1.5.1.1 Fours à garnissage basique :

Capacités entre 1,5 et 4,5 tonnes ; puissance entre 600 et 1100 KW/t. [15].

1.5.1.2 Fours réverbères :

Chauffés au mazout ou au gaz ; ils servent surtout dans les fonderies fabricant de très grosses pièces. [15].

1.5.1.3 Fours électriques à induction (à creuset acide) :

Ils sont fiables et plus souples, la température du bain peut être constante et supérieure à 1520°C, le métal obtenu est homogène, les capacités et les puissance**s** courantes sont : de 1,5 à 5 tonnes et 300 KW/t pour les fours 50Hz, et de 0.1 à 2 tonnes et 700KW/t pour ceux à (150/500Hz) [15].

1.5.1.4 Cubilot acide à vent froid :

Il donne un métal sulfure (0,08 à 1,12% S) de composition peu constante à une température inférieure +1520° (1550°C avec le vent chaud). Il est souvent en duplex avec un four électrique (induction ou réverbère) [15].

1.5.1.5 Cubilot basique à vent chaud :

Il est amortissable pour les grandes productions (au moins 30T par jour), le métal obtenu est moyennement sulfuré (80% < 0,08), la température peut être élevée (>1510°C), la charge est entièrement en acier [15].

1.5.2 Traitement par le magnésium :

En pratique, le graphite prend la forme sphéroïdale, dans une fonte à teneur en soufre initiale limitée (S < 0,06 %), en présence d'une teneur en magnésium finale allant de 0,03 à 0,06 %. L'introduction du magnésium se heurte à deux difficultés : c'est un métal léger et oxydable, qui tend à flotter et à brûler à la surface de la fonte et dont la température d'ébullition est basse (1103OC), d'où une réaction brutale [16].

La quantité d'alliage sphéroidisants au Mg, nécessaire, peut être estimée à l'aide de la réaction suivante :

Q : quantité en Kg d'alliage en Mg ;

M : masse en kg de la fonte à traiter ;

%S : pourcentage de soufre de la fonte avant traitement ;

%G : pourcentage de magnésium résiduel souhaité dans la fonte GS ;

T : temps (en minutes) de maintien entre le traitement au Mg et la coulée du premier moule ;

T : température en degrés (°C) de la fonte à traiter ;

%Mg : pourcentage de magnésium dans l'alliage sphéroidisant utilisé pour le traitement ;

% R : le rendement de Mg en pourcentage ;

1.5.3 Définition des Fontes grises à graphite lamellaire (GL) :

Dans les fontes lamellaires, la majeure partie du carbone se trouve sous forme de graphite lamellaire. Sa morphologie joue un rôle essentiel sur la résistance à la traction. Le graphite est un constituant qui diminue la résistance mécanique, et sa présence correspond à des vides (interstices) dans la matrice, il favorise les fissures du fait de leur morphologie lamellaire.

La composition chimique et la microstructure sont les facteurs principaux agissant sur l'usinabilité et le degré de finition des fontes. Les plus utilisées sont les fontes hypoeutectique de 2.4 à 3,8 %C, au-delà les propriétés mécaniques deviennent de plus en plus faibles. Ces alliages sont peut-être plus connus sous le nom de fontes « ordinaires » car ce sont les plus anciennement utilisées en construction mécanique, en architecture métallique, chauffage domestique et industriel, équipement de voirie. Aujourd'hui encore, elles ont une place prépondérante en fonderie.

Leur structure comprend essentiellement du graphite en lamelles-en paillettes ramifiées et arrangées en ensemble cellulaires, incluses dans une matrice le plus souvent perlitiques ou perlito-ferritique. Elles peuvent contenir assez de phosphore pour former un réseau de cristaux analogue à des carbures mais moins durs [12].

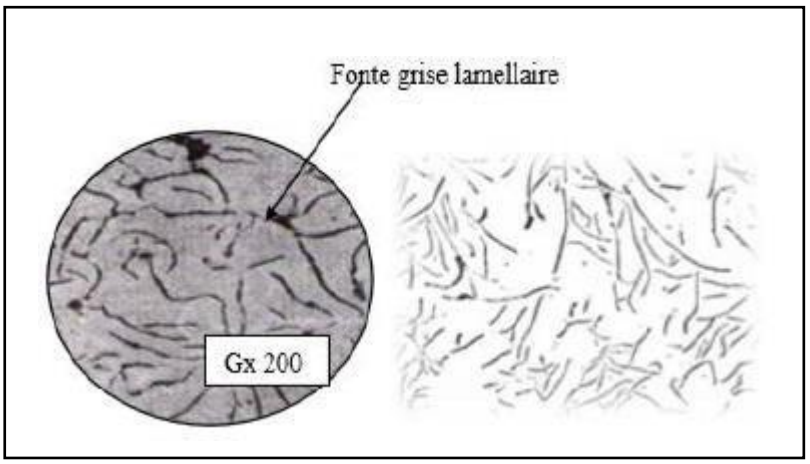


Figure 1.8 : Fonte grise lamellaire sans attaque [12].

1.6 Les Fontes malléables :

Les fontes malléables sont des fontes qui acquièrent une résistance et une capacité de déformation par des traitements thermiques appropriés [11].

- Un recuit de graphitisation pour la transformation de la cémentite en graphite nodulaire (**malléable à cœur noir**).
- Un recuit de décarburation dans le but d'éliminer le carbone de la couche superficielle (**malléable à cœur blanc**) [12].

1.6.1 Élaboration des fontes malléables :

L'élaboration s'articule autour des deux principes suivants.

1.6.1.1 Premier principe :

Le principe repose en, la coulée des pièces en fonte blanche (fonte à structure de cémentite Fe3C et de perlite) qui permet de profiter à la fois des bonnes propriétés de fonderie des fontes et de la grande facilité d'égrappages (séparation du système de coulée et des masselottes) due à la relative fragilité de la fonte blanche [11].

1.6.1.2 Deuxième principe :

La transformation de la structure non ductile de la fonte blanche par un traitement thermique de recuit, de manière à décomposer la cémentite et à obtenir une matrice métallique pouvant être constituée soit de ferrite (en fait, il s'agit de silico-ferrites plus ou moins riches en Si : 0,6 à 2 %) permettant d'atteindre des allongements allant jusqu'à 18 % pour la nuance la

plus ductile, soit d'autres produits de transformation de l'austénite, de la perlite notamment, avec toute la gamme des ferrito-perlites [11].

Au cours du traitement thermique de recuit, le carbone contenu dans la fonte blanche est soit totalement ou presque totalement éliminé, la fonte obtenue est une malléable à cœur blanc, soit précipité dans la structure métallique sous forme de flocons ou de nodules de graphite, il s'agit alors d'une malléable à graphite nodulaire [11].

Il existe donc deux procédés différents d'obtention des fontes malléables, avec, pour chacun d'eux, un certain nombre de techniques particulières, et deux grandes familles de fontes malléables :

1.6.1.3 Un procédé de malléabilisation par décarburation de la fonte blanche :

Grâce à un recuit en milieu oxydant, qui conduit à l'obtention de la malléable à cœur blanche raison de la couleur de la cassure du métal obtenu :

1.6.1.4 Un procédé de malléabilisation par graphitisation :

C'est-à-dire par précipitation du carbone d'une fonte blanche sous forme de graphite au cours d'un recuit non oxydant. Ce procédé conduit à l'obtention des malléables à graphite nodulaire, matériau longtemps dénommé malléable américaine, pour des raisons historiques, ou malléable à cœur noir, en référence à l'aspect de la cassure du métal [11].

La composition chimique de la fonte blanche coulée varie selon le type de fonte malléable recherché et dans une moindre mesure, selon les moyens d'élaboration.

1.7 Influence des éléments d'alliage sur les fontes :

Les fontes sont toujours composées de métal de base et d'autres éléments comme il a été expliqué au préalable : des éléments d'élaboration ou des éléments qu'on ajoute favorablement (éléments d'addition ou nuances). La présence de ces éléments confère à la fonte des propriétés mécaniques différentes et une nouvelle structure. On peut regrouper ces éléments en deux types selon leurs effets sur la structure.

1.7.1 Les éléments normaux :

1.7.1.1 Le carbone :

Le carbone a une grande affinité pour le fer, il constitue l'élément de base de la composition des fontes et des aciers. L'introduction de ferraille dans les lits de fusion nécessite souvent de recarburer le bain par des additions de matières carbonées. La solubilité du carbone

dans un bain ferreux augmente avec la température. Le carbone est gamma-gène et forme avec le fer ainsi qu'avec beaucoup d'autres éléments des carbures plus ou moins stable, métastable. Il joue le rôle déterminant dans les transformations à l'état solide.

1.7.1.2 Le Silicium :

Élément normal de la fonte, il devient élément d'addition au-dessus d'une teneur de 3%. Élément alphagène, il joue un rôle fondamental en métallurgie des fontes, car, aux teneurs considérées (jusqu'à 18%), il oriente la solidification des alliages Fe-C- Si vers le système stable (graphite + ferrite). C'est un graphitisant puissant.

Les Ferro-silicium, en raison probablement des faibles teneurs en aluminium et en calcium qu'ils contiennent, sont des corps inoculant. Ajoutés en petite quantité au métal liquide avant la coulée, ils produisent un effet germinateur du graphite, évanescent, qui entraine plusieurs avantages pratiques : multiplication des cellules eutectiques, élimination des carbures, suppression du graphite de surfusion….

1.7.1.3 Influence du silicium sur la vitesse de refroidissement :

Le silicium est considéré comme un élément qui favorise la formation du graphite. L'augmentation de sa quantité diminue la quantité de cémentite en favorisant la formation du graphite. On le trouve pratiquement en teneur supérieure à 1,7% (ou 2%) dans les fontes qu'on veut obtenir (grises).

Il a un effet direct sur le degré de surfusion notée ΔT, l'augmentation du taux de silicium favorise l'écart entre le point C et C', respectivement du système stable et métastable, On voit qu'il faut pour une différence entre ces deux points de l'ordre de 30 °C, un taux de silicium de 2%. Il rend la formation du carbure de fer moins probable. Il favorise la formation du graphite [17].

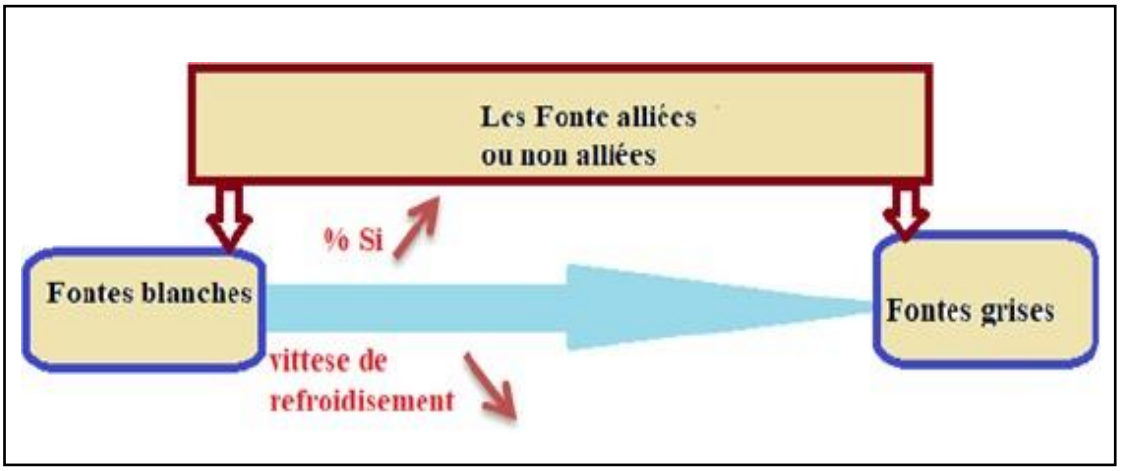


Figure I.9 : Influence du Si sur la vitesse de refroidissement [17].

1.7.1.4 Influence du carbone et du silicium :

Les fontes grises employées dans l'industrie ne peuvent pas être considérées comme un alliage binaire Fer-Carbone, en plus de carbone, elles contiennent d'autres éléments (Si, Mn, S, P, etc.) qui ont une grande influence sur la structure et les propriétés des fontes grises.

Les deux éléments (carbone et silicium) exercent une influence directe sur le passage de système métastable au système stable [18].

Le carbone est un élément graphitisant, il favorise l'accroissement des lamelles de graphite.

1.7.1.5 Le phosphore :

Elément faiblement graphitisant, le phosphore est une impureté des minerais ferreux qu'on élimine le plus possible par oxydation en présence de laitier basique. Son action fragilisant se manifeste dès la plus faible teneur dans les aciers et les fontes. Dans les fontes grises, il apparait sous forme de Fe_3C qui constitue les cristaux d'eutectique phosphoreux. En effet, pour les teneurs supérieurs à 0,3 %, il se forme ainsi un réseau dur favorable à la résistance à l'usure. Si les teneurs en C et Si ne sont pas trop élevées, il améliore la coulabilité [18].

1.7.1.6 Le soufre :

Le soufre est une impureté généralement nocive qui est présent dans le minerai. Il accroit le retrait, augmente la fragilité, diminue la fluidité, accroit la ségrégation à la coulée et abaisse la tension superficielle. Il se combine de préférence au Fe et au Mn pour former respectivement de FeS et du MnS. On l'élimine autant que possible des bains de fonte par réaction avec des laitiers ou des poudres basiques en milieu réducteur.

FeS + CaO + C Fe + CO + CaS

La solubilité du MnS dans le fer liquide est inférieure à celle du FeS, la présence de manganèse dans la fonte est donc favorable à la désulfuration [12].

1.7.1.7 Le manganèse :

Cet élément provient de la réduction des oxydes de manganèse contenus dans les minerais de fer, ou qui sont ajoutés à la charge pour obtenir la teneur visée. En effet, le rôle principal du manganèse est de fixer, comme on l'a vu précédemment, le soufre sous forme de MnS.

L'excès de manganèse fixe le carbone sous forme de Mn_3C, carbure isomorphe de la cémentite. Ainsi, il stabilise la cémentite et la perlite. Le manganèse est aussi un élément gammagène. Il entre donc dans la composition de l'acier, des fontes alliées austénitiques ou martensitiques. Il peut accroitre la tendance à certains défauts de fonderie : abreuvages, soufflures dans les fontes [17].

1.8 Les éléments d'additions :

1.8.1 Le nickel :

Il est l'un des éléments d'alliages les plus courants car son effet gammagène, trempant et sa miscibilité parfaite avec le fer permet de réaliser pratiquement toutes la gamme desstructures. Il abaisse les points critiques et les vitesses critiques au refroidissement, il permet donc une plus grande latitude dans les conditions de traitement thermique. Le nickel est graphitisant, diminue la sensibilité à l'épaisseur, affine le grain, affine la perlite et modifie la valeur de la vitesse critique de trempe.

Le nickel permet par trempe de durcir les pièces moulées. En effet lorsqu'il est présent, même à des doses extrêmement faibles dans la fonte (1,5 à 4,5 mm selon l'épaisseur du moulage), le nickel donne à l'austénite, si la vitesse de refroidissement de celle-ci est suffisante, le pouvoir de se transformer en martensite. Il est donc possible d'obtenir des pièces brutes de coulée dans lesquelles, de fait de leur faible vitesse de refroidissement dans le moule, ont la structure perlitique. Ces pièces alors facilement usinables, subissent ensuite un traitement thermique approprié, qui leur confère une dureté élevée [18].

1.8.2 Le chrome :

Le chrome est l'un des principaux éléments d'alliages couramment utilisés en fonderie de fonte et d'acier, C'est un élément alpha gène, augmentant la trempabilité et fortement carburigène. Au-dessus de 0,7 %, il' y a trop de cémentite libre dans la fonte qui devient in

usinable. Ensuite, au-dessus de 10 %, il y'a formation de carbure de chrome qui ne sont pratiquement pas graphitisant. Il permet donc d'avoir des fontes réfractaires. Le chrome affine la perlite et le graphite.

Les fontes et les aciers au chrome forment des familles très diversifiées. Les faibles teneurs permettent l'amélioration des caractéristiques mécaniques et facilitent les traitements thermiques. Les plus fortes teneurs leurs confèrent la résistance à l'abrasion, la réfractivité et l'in oxydabilité. Le chrome est souvent associé à d'autres éléments comme le nickel, le cuivre, le titane…etc.

Cet élément est relativement oxydable et des précautions doivent être prises pendant la fusion et la coulée des fontes et aciers à haute teneurs en chrome [17].

1.8.3 Le molybdène :

Le molybdène est un élément d'alliage alphagène, anti graphitisant et fortement trempant. Il facilite la trempe bainitique et est en générale très favorable à la résistance au fluage. On l'utilise largement dans des pièces moulées destinées à des usages thermiques. Le molybdène affine la ferrite et donc la perlite et il accroît les caractéristiques mécaniques de la fonte.

1.8.4 Le cuivre :

Il est bien connu que la solubilité du cuivre dans les fontes est limitée. Cet élément est faiblement gammagène et trempant. En solution solide dans la ferrite, il en augmente fortement la dureté en affinant le grain ferritique. Il a une action légèrement graphitisante, mais son effet n'influence que la cémentite libre et au contraire il stabilise la perlite.

Le cuivre améliore donc dans les fontes les caractéristiques mécaniques, la résistance à l'usure et à certain type de corrosion. Il affine également le graphite.

Il remplace partiellement le nickel (en diminuant la sensibilité à l'épaisseur) danscertaines fontes (austénitiques, martensitiques). Il est souvent associé au nickel ou au chrome pour faciliter les traitements thermiques [18].

1.8.5 Le Vanadium :

C'est un élément alphagène, désoxydant actif et anti graphitisant puissant. Il forme des carbures très durs. Les carbures de vanadium, stable à hautes températures, assurent dureté et résistance à chaud. Le vanadium entre dans la composition des fontes alliées. Il est relativement oxydable, des précautions sont donc à prendre lors de l'addition et au cours des traitements thermiques. Dans les fontes non alliées, il est toujours utilisé à faible teneur (0,2% à 0,3%).

1.8.6 Le Titane :

Le titane, élément alphagène forme des oxydes, des nitrures et des carbures. Il s'oxyde facilement à l'air et le rendement de l'addition n'est pas très régulier. Il peut aider à éliminer certains défauts dû à l'azote comme la porosité vermiculaire. Ajouté à la fonte, à des teneurs faibles (0,1% à 0,3%), c'est un élément graphitisant qui a un effet très sensible sur la forme et la répartition du graphite. Il rend le graphite très fin, le dissémine dans la masse sous forme de brouillard, c'est-à-dire des pseudo-lamelles. Cela implique une augmentation des caractéristiques mécaniques ainsi que de la résistance aux chocs thermique (effet d'entaille).

1.8.7 L'Etain :

C'est un métal relativement lourd, qu'on peut ajouter aux fontes grises ou au graphite sphéroïdal en faible teneur (de l'ordre de 0,1%) afin de stabiliser la perlite sans former de carbures libres. Des teneurs trop élevées en étain risquent de détériorer la forme du graphite lamellaire et de provoquer la dégénérescence du graphite sphéroïdal.

1.8.8 L'Aluminium :

Elément graphitisant, un effet germinateur du graphite pendant le recuit lui est assigné en fonderie de fontes malléables. Il est généralement présent dans les Ferro-siliciums et autres ferro-alliages. Il diminue la profondeur de trempe.

Le plomb, pratiquement insoluble dans les alliages ferreux, est un élément poison même à l'état de traces. Il perturbe gravement la forme du graphite lamellaire et surtout sphéroïdal. Il provient essentiellement de matières récupérées comme la peinture sur les tôles, l'acier de décolletage ou encore les pièces émaillées [17].

1.8.9 Le Tellure :

L'emploi du tellure est assez délicat (influence de la température, toxicité des vapeurs). Il est ajouté à l'état de traces dans les fontes afin d'inhiber la germination du graphite primaire dans les fontes malléables. C'est un puissant anti graphitisant. On l'utilise parfois sous forme d'enduits [18].

C'est un métal ultra léger, très volatil et réagissant très vivement avec l'oxygène et le soufre. C'est donc un agent de traitement utilisé pour la désoxydation, la désulfuration et surtout pour l'obtention du graphite sphéroïdal des fontes. Il peut être ajouté à l'état métallique pur, mais à condition d'employer des dispositifs spéciaux évitant les réactions explosives. On peut aussi modérer sa réactivé en l'utilisant sous forme d'alliages de magnésium plus denses.

Ces valeurs sont variables et dépendent de la teneur en éléments secondaires qui rentrent en solution dans la ferrite (Si, Mn, N ...). La ferrite apparaît dans les fontes au cours du refroidissement sous formes proeutectoïde et eutectoïde [19].

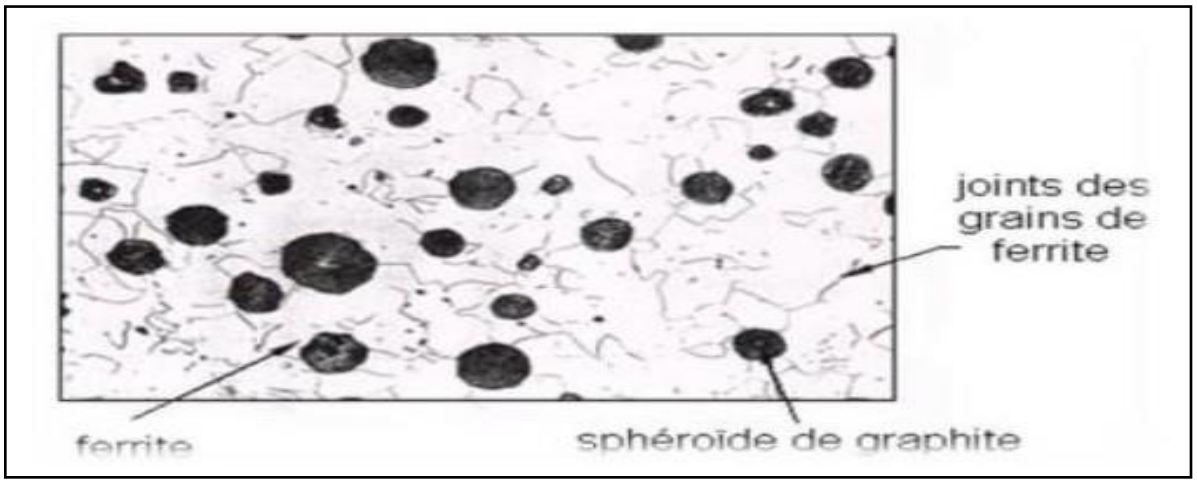


Figure 1.10 : Structure d'une fonte GS à matrice ferritique [19].

L'influence des autres éléments sur la dureté et la résistance de la ferrite sont données par la figure 1.9

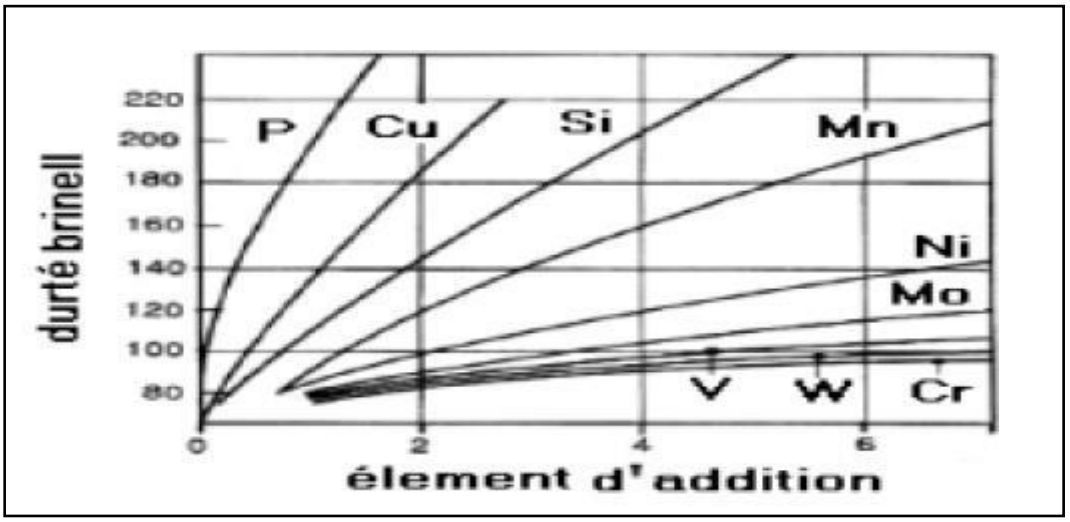


Figure 1.11 : Influence de quelques éléments sur la dureté de la ferrite [12].

1.9 Influence de la vitesse de refroidissement sur la microstructure et les propriétés mécanique microstructures des fontes :

1.9.1 Décomposition de l'austénite :

Lorsque la vitesse de refroidissement est lente, les migrations des atomes de carbone ont "le temps de le faire" et les lamelles peuvent grossir. On obtient une structure perlitique et

grande. Quand la vitesse de refroidissement augmente, cette migration se fait, mais à moins longue distance donc, localement et en de multiples endroits, se forment de petites lamelles :

- Entre 750 °C et 500 °C environ, si le refroidissement est relativement lent, tout se transforme en perlite.
- Si à 500 °C tout n'est pas transformé, cela signifie que la vitesse de refroidissement est trop importante, le reste peut se transformer en martensite.
- Si la vitesse de refroidissement est très rapide, entre 750°C et 500°C, il ne se passe rien ; il y a deux solutions en dessous de 500 ° C :
- Si on stoppe le refroidissement alors le γ donne de la bainite.
- Si on ne stoppe pas le refroidissement alors l'austénite donne de la martensite [20].

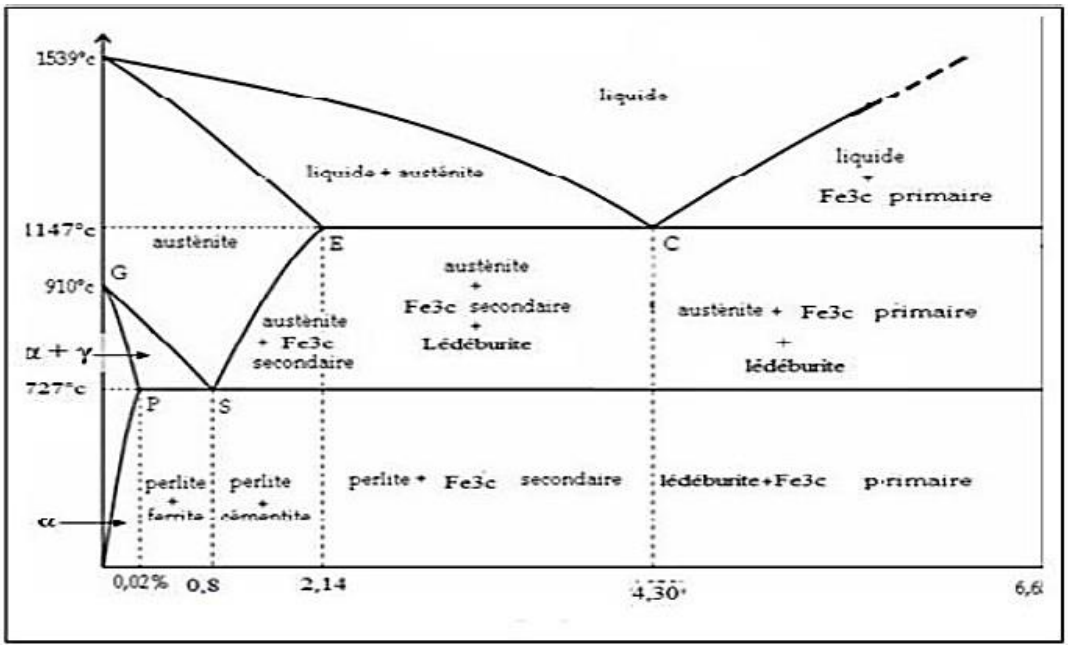


Figure 1. 12 : Diagramme d'équilibre métastable Fe - Fe_3C [12].

1.9.2 L'austénite :

Solution solide d'insertion du carbone dans le fer γ, l'austénite peut dissoudre 0,85 % de carbone à 735 °C et 1,7 % de carbone à 1130 °C.

Dans le cas de vitesses de refroidissement rapides, entre 730 °C et 500 °C l'austénite se transforme en perlite si les migrations de carbone ont le temps de se faire, sinon, nous assistons à d'autres transformations plus tardives (c'est le cas des traitements thermiques). Néanmoins, cette phase peut exister à température ambiante dans les fontes austénitiques au nickel et dans

les fontes trempées à austénite résiduelle. Cette phase ductile est oxydée par tous les réactifs acides [20].

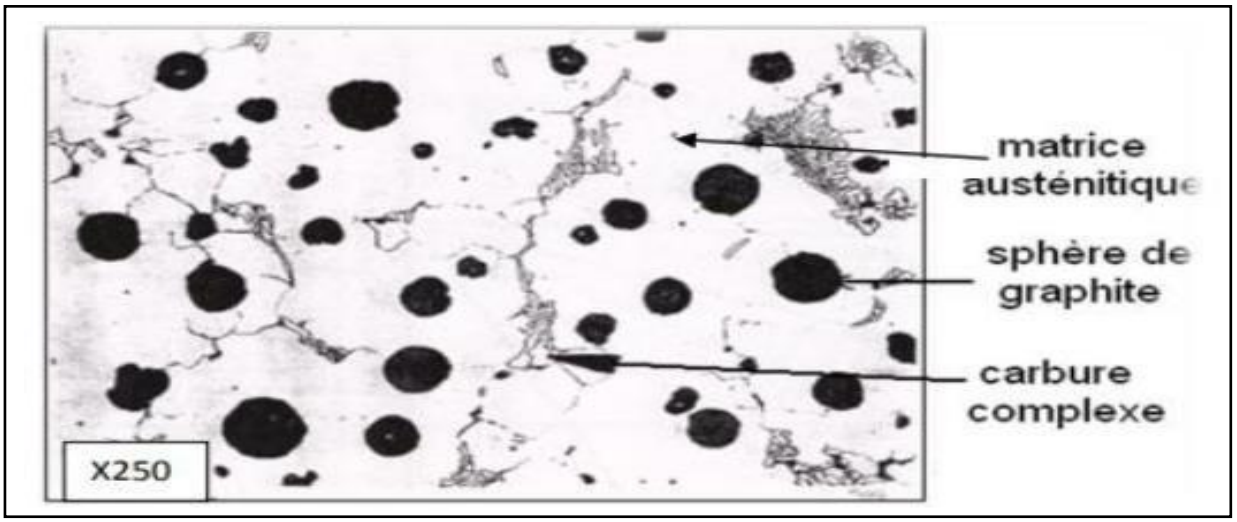


Figure1.13 : Structure d'une fonte GS à matrice austénitique [20].

1.9.3 La Cémentite :

La cémentite ou carbure de fer est une combinaison métallique de fer et de carbone définie chimiquement par la formule Fe_3C (contenant 6,67 % de carbone). Elle est constituée par une maille orthorhombique dont le motif de base peut être assimilé à un triangle par simplification. C'est un carbure très dur, cassant et très fragile. Ces caractéristiques sont les suivantes [12] :

- Rm très faible ;
- HB de 800 à 1000 ;
- A % quasiment nul ;

1.9.4 La Perlite :

La perlite se présente sous forme d'un feuilletage de lamelles de ferrite et de cémentite disposées alternativement, C'est un agrégat eutectoïde. La perlite se forme au passage de la ligne eutectoïde (environ à 727°C) conformément au diagramme d'équilibre Fer-Fe_3C.

Lorsque les lamelles de la perlite sont très minces, phénomène dû à un refroidissement rapide, elle devient plus dure et plus résistante [12].

Les caractéristiques mécaniques de la perlite dépendent avant tout de sa finesse et les éléments qui se trouvent en solution. Sa dureté Brinell varie entre 200 et 300.

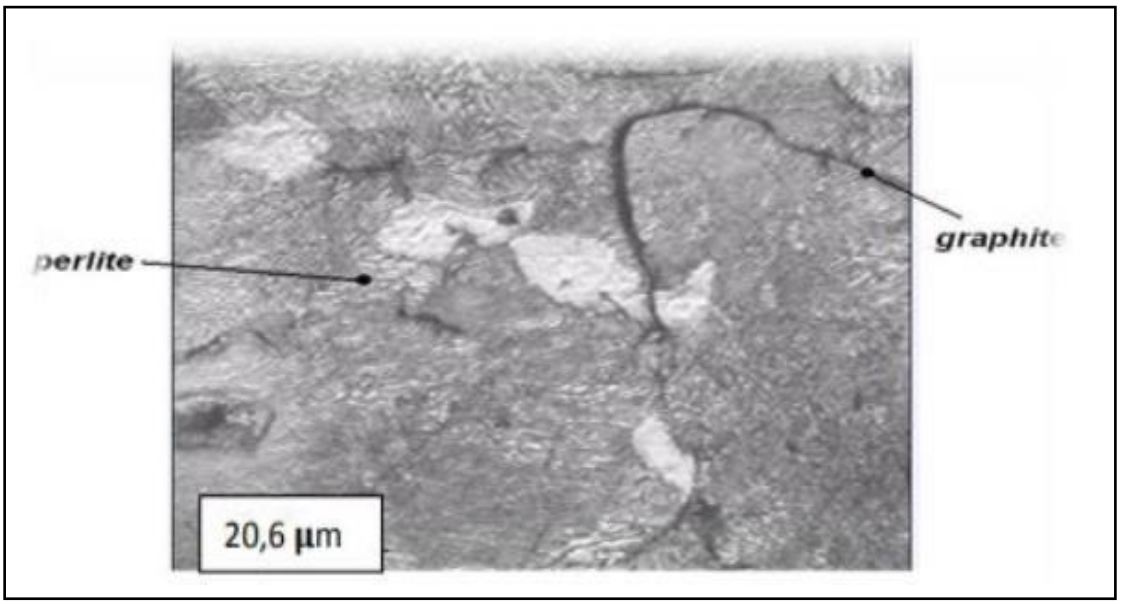


Figure 1.14 : Répartition de la perlite dans les fontes grises [12]

1.10 Comportement mécanique :

1.10.1 Caractéristiques mécaniques des fontes grises lamellaires :

Pour ces fontes, la quantité et le type de lamelles de graphite sont déterminants par les propriétés mécaniques ; les lamelles de graphite fragilisent la matrice du matériau. En effet, les extrémités des lamelles de graphite provoquent un effet ―d'entailles‖ entraînant des amorces de rupture il en résulte donc une chute des caractéristiques mécaniques.

Les propriétés mécaniques des fontes à graphite lamellaire dépendent nettement de la vitesse de refroidissement, autrement dit de l'épaisseur de paroi de la pièce moulée. L'ordre des lamelles de graphite peut varier suivant la composition chimique de la fonte, des conditions de refroidissement et le nombre de germes présents dans le bain métallique apporté par l'inoculation.

Ces fontes sont typiquement moins résistantes que les fontes blanches par exemple, mais offrent par la présence du graphite une capacité autolubrifiante et une capacité d'amortissement de vibration. Elles sont intéressantes par leurs propriétés de frottement liées à la présence des lamelles de graphite. La forme de ces dernières, de plus à l'échelle de quelques dizaines voire centaines de micron, est évidemment désavantageuse au niveau des propriétés mécaniques, donnant lieu à des concentrations de contraintes assez importantes. Les fontes grises à graphite lamellaire présentent des propriétés d'emploi uniques, dues pour la plupart au graphite. Ce

dernier par son caractère lubrifiant joue un rôle primordial, il améliore l'usinabilité et le degré de finition [21].

1.10.2 Facteurs exerçant une influence sur les caractéristiques mécaniques :

1.10.2.1 Composition chimique :

Les propriétés de la fonte grise dépendent, en particulier, de la composition chimique de celle-ci. La majeure partie du carbone présent dans la fonte grise se trouve sous forme de graphite. Un accroissement de la teneur en carbone total entraîne une augmentation de la quantité de graphite, d'où un abaissement de résistance mécanique et de dureté mais, par contre, une amélioration d'autres caractéristiques.

Une certaine teneur en silicium est nécessaire pour provoquer la formation du graphite. Cet élément a une influence sur les propriétés de la fonte ; en particulier, il lui confère une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation et, le cas échéant, il facilite le traitement de recuit [21].

1.10.2.2 Microstructure :

De point de vue microstructure, les fontes grises lamellaires contiennent du graphite en lamelles (ou graphite lamellaire) dispersées dans une matrice métallique à base de fer et de silicium. La quantité du graphite, la longueur des lamelles et la façon dont celles-ci sont reparties dans la matrice exercent une influence directe sur les propriétés de la fonte. Sa résistance mécanique et sa dureté dépendent de la matrice métallique dont les propriétés peuvent aller de celles d'un acier doux, à faible teneur en carbone, à celles d'un acier trempé àteneur en carbone élevée. Une matrice entièrement ferritique donne à la fonte une usinabilité élevée mais une résistance à l'usure et une résistance mécanique réduites.

Les fontes grises à haute résistance se caractérisent par une matrice entièrement perlitique. Pour certaines applications, des pièces sont produites avec une matrice dont la microstructure est constituée à la fois de ferrite et de perlite, pour obtenir une dureté mécanique moyenne. Si une matrice de perlite très fine ou une matrice bainitique est recherchée, il faut avoir recours, soit à des éléments d'alliage, soit un traitement thermique [21].

1.10.2.3 Influence de l'épaisseur :

L'épaisseur de la section dans laquelle une fonte est coulée est un facteur qui a une influence importante sur les propriétés des fontes grises. Dans le cas des fontes grises à graphite lamellaire, plus la solidification est lente, plus la dimension des lamelles est importante. Un

ralentissement du refroidissement correspond à une diminution de la dureté de la matrice métallique. Par contre une fonte coulée dans une épaisseur très mince se solidifie très rapidement et peut être dure.

Généralement une pièce en fonte grise d'épaisseur non uniforme présente une différence de grosseur de graphite et de dureté. Ces différences de structure se traduisent par des différences de caractéristiques mécaniques dans l'ensemble de la pièce [21].

1.10.2.4 Caractéristiques mécaniques fondamentales :

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

- La résistance à la traction, base de la normalisation des qualités de fontes grises non alliées.
- La dureté.
- Le module d'élasticité

1.10.2.5 Résistance à la traction :

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

- Normalisation

Pour des raisons de commodité, par analogie avec les autres alliages moulés et faute de pouvoir définir utilement une limite d'élasticité (en raison de la courbure du diagramme de traction), c'est la résistance à la traction Rm, exprimée en méga pascals (MPa), qui est la base de la classification des fontes grises. La norme NF A 32-101 de décembre 1965 classait donc les fontes d'après l'essai de traction sur des éprouvettes coulées séparément et de diamètre adapté à l'épaisseur déterminante des pièces représentées, c'est-à-dire l'épaisseur équivalente de leurs éléments paraissant les plus critiques au regard des contraintes en service.

Pour rester en harmonie avec la norme ISO R 185 (1961), la nouvelle édition de la norme NF A 32-101 Pièces moulées en fonte à graphite lamellaire de juin 1987 classe et désigne les fontes de plusieurs manières.

D'après la résistance à la traction minimale garantie mesurée dans un barreau coulé séparément, de 30 mm de diamètre ; la résistance à la traction (minimale) probable dans les pièces est indiquée sans garantie en relation avec l'épaisseur, suivant un tableau permettant de guider le choix de l'utilisateur, C'est la méthode de base.

D'après la résistance à la traction mesurée dans des échantillons attenants ou adhérents aux pièces ; ici encore la valeur minimale probable dans la pièce est donnée à titre indicatif selon l'épaisseur. Cette méthode ne peut s'appliquer qu'aux pièces relativement grosses (épaisseur supérieure à 20 mm ou masse supérieure à 200 kg) [22].

Le tableau I.4 donne les valeurs de la résistance à la traction Rm des différentes nuances :

Tableau1.4 : Classification d'après essai sur barreau coulé à part

(Tableau de la norme NF A 32-101 de juin 1987)

Nuances	**Valeurs garanties**	**Valeurs à titre indicatif**		
	Résistance minimale à la traction Rm (à obtenir sur éprouvette de 20mm usinée dans un barreau brut coulé à part de 30mm de diamètre) **(MPa)**	**Épaisseur de la pièce (mm)**		**Resistance à traction probable sur pièce Rm (MPa)**
		Plus de	**Jusqu'à et y compris**	
FGL 150	*150* **(1)**	*2.5*	*10*	*155*
		10	*20*	*130*
		20	*40*	*120*
FGL 200	*200* **(1)**	*2.5*	*10*	*205*
		10	*20*	*180*
		20	*40*	*165*
FGL 250	*250* **(1)**	*5*	*20*	*250*
		10	*40*	*225*
		20		*205*
FGL 300	*300* **(1)**	*10*	*20*	*270*
		20	*40*	*245*
FGL 350	*350* **(1)**	*10*	*20*	*315*
		20	*40*	*285*
FGL 400	*400* **(1)**	*10*	*20*	*355*
		20	*40*	*315*

(1) Une fonte à graphite lamellaire de nuance définie ne doit pas avoir une résistance maximale à la traction supérieure à la valeur de la qualité augmentée de 100 MPa, sauf accord contraire préalable entre client et fondeur

1.10.2.6. Dureté des fontes :

Sauf éventuellement dans les régions trempées superficiellement, la dureté des fontes grises est mesurée suivant la norme NF A 03-201 Essai de dureté Brinell pour la fonte grise (août 1967). Le symbole normalisé est HB (suivi éventuellement de trois nombres rappelant

Les conditions particulières de l'essai). La norme précise que la charge doit être maintenue pendant 15 s ±1 s et que la distance du centre d'une empreinte au bord de la pièce à essayer doit être au moins égale à 2,5 fois le diamètre de l'empreinte ; les centres de deux empreintes doivent être espacés d'au moins 4 fois leur diamètre.

La dureté des fontes non alliées varie dans des proportions très importantes en fonction de la structure :

- fontes blanches : 400 à 550 HB suivant la teneur en carbone.
- fontes grises **perlitiques** : 170 à 270 HB suivant la finesse de la perlite.
- fontes grises **ferritiques** : 100 à 150 HB.
- fontes grises **martensitiques** : 400 à 500 HB.
- fontes grises **bainitiques** : 300 à 400 HB.

La dureté globale de la fonte dépend évidemment avant tout de la matrice dont la dureté propre varie dans des proportions considérables, même dans le cas de fontes non alliées à l'état brut de coulée :

- dureté de la ferrite : 90 à 150 HB dans les fontes non alliées.
- dureté de la perlite : 200 à 300 HB suivant sa finesse).

La dureté d'une fonte est complètement indépendante du graphite, ce dernier agit par sa quantité et par ses dimensions (relatifs à des fontes à graphite lamellaire ferritiques).

La dureté est souvent déterminée pour apprécier la résistance à l'usure et l'usinabilité et la résistance à l'usure. C'est pourquoi l'annexe A de la norme NF A 32-101 indique une méthode pour la classification des pièces moulées en fonte grise par la dureté Brinell [22].

Tableau1. 5. Dureté Brinell d'échantillons, à l'état brut de coulée et traités (ferritique), en fonction du diamètre des barreaux coulés.

Diamètre du barreau (mm)		**Dureté Brinell**					
		Nuance I (1)		**Nuance II (1)**		**Nuance III (1)**	
		Brut de coulée	**Matrice ferritique**	**Brut de coulée**	**Matrice ferritique**	**Brut de coulée**	**Matrice ferritique**
Graphite	90	177	99	193	109	145	129
Très	50	197	102	211	121	159	131
grossier	32	212	107	229	131	175	152
graphite	22	223	111	241	131	197	161
Fin	15	246	129	257	145	218	171
	10	288	133	285	152	256	188

(1) Composition chimique (en %) des divers échantillons :

	C	**Si**	**Mn**	**S**	**P**
Nuance I……....:	3,10	2,79	0,67	0,08	0,18
Nuance II……...:	3,04	2,88	0,73	0,05	0,98
Nuance III……..:	3,33	2,86	0,76	0,08	0,18

1.12. Facteurs influencent la corrosion [23] :

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre groupe principaux tels que les :

- Facteurs définissant les modes d'attaque ;
- Facteurs métallurgiques ;
- Facteurs définissant les conditions d'emploi ;
- Facteurs dépendant du temps ;

Tous ces facteurs sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau 1.6 : Facteurs de corrosion [23].

Facteurs du milieu corrosif	Facteur métallurgiques	Facteurs définition la condition d'empli	Facteurs dépendants du temps
- Concentration du réactif, - Teneur en oxygène, - PH du milieu, - Température, - Pression.	- Composition de l'alliage, - Procédés d'élaboration, - Impuretés,	- Etat de surface, - Forme des pièces, - Emploi d'inhibiteur, - Procédés d'assemblage,	- Vieillissement, - Tensions mécaniques, - Modification du revêtement, - Protecteurs,

1.13 La corrosion des fontes :

La fonte est différente de l'acier par sa plus haute teneur en carbone (> 2 %) et silicium (> 1 %) qui la rend moins chère à produire que l'acier. La résistance à la corrosion de la fonte est comparable à celle de l'acier au carbone, et peut être même supérieure suivant la teneur de l'alliage. En raison de la teneur élevée en carbone, du graphite, cathodique par rapport au fer, se forme dans la microstructure de l'alliage sous forme de paillettes (fonte grise) ou de nodules (fonte ductile) suivant sa composition et son traitement thermique.

Cette différence de potentiel engendre un mécanisme appelé corrosion graphitique ou graphitisation, phénomène qui se produit sur les fontes non alliées exposées à des eaux moyennement acides ou douces. Les eaux présentant une faible teneur en hydrogène sulfuré (1ppm) favorisent aussi la graphitisation. La graphitisation tend à être pénétrante mais à des vitesses peu élevées. Lorsqu'une telle corrosion se produit, il y a formation sur la surface d'une couche d'oxyde de fer contenant du graphite qui conserve la forme de l'élément en cours de corrosion, un contrôle visuel ne permet donc pas de détecter cette forme de corrosion.

La durée de vie de la plupart des pièces en fonte dans des eaux domestiques aérées et alcalines à température ambiante s'avère très satisfaisante, principalement en raison de l'épaisseur des pièces moulées et de la corrosion modérée uniforme.

En distribution, la longévité des réseaux en fonte peut aller au-delà de cent ans, mais ils nécessitent à priori une protection à long terme. Jadis, l'intérieur des tubes en fonte était protégé par des revêtements simples type vernis bitumineux. Aujourd'hui, on utilise des revêtements à

base de mortier de ciment qui sont également résistants aux eaux résiduaires contenant des sulfures. On trouve aussi de plus en plus des revêtements à base de matériau plastique agréé.

La protection extérieure contre la corrosion est souvent constituée par un revêtement bitumineux épais d'une centaine de microns. Une protection renforcée aux discontinuités du revêtement peut être apportée par des anodes sacrificielles, la pulvérisation de zinc ou par une protection cathodique par potentiel imposé suivant la corrosivité des sols.

Les tubes en fonte ductile, dont l'utilisation s'est fortement développée par suite de leur grande résistance mécanique, présentent une longévité un peu réduite par rapport à celle de la fonte grise due à leur moindre épaisseur et une vitesse initiale de corrosion plus marquée[24].

Traitement thermique desfontes

2.1 Introduction :

Les traitements thermiques se définissent comme étant « l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé » appliqués à des métaux et alliages. De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.). Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion). En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement). [25]

2.3 Cycle d'un traitement thermique :

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose des étapes suivantes : (voir la figure 1)

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC3).
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :

- lente (dans le four, à l'air).
- Assez rapide (dans l'huile).
- Très rapide (dans l'eau).

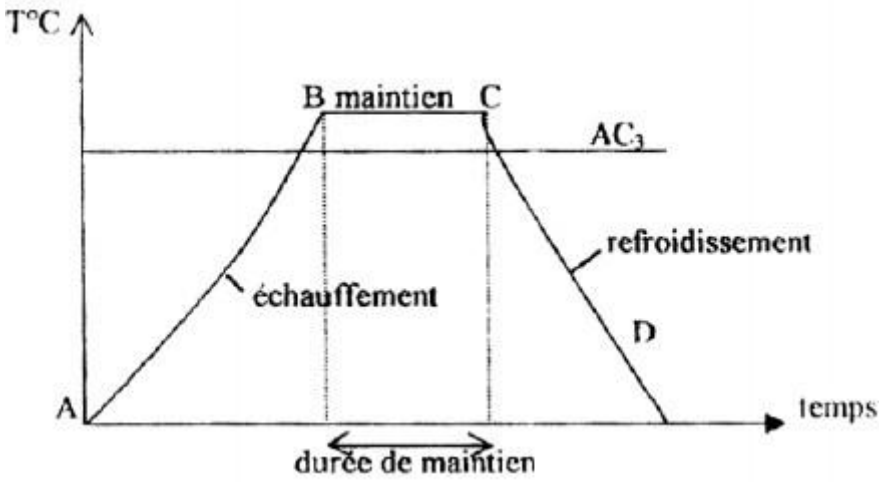


Figure 2.1: Le cycle thermique. [26]

2.2 Principes et effets des traitements thermiques :

A part les fontes malléables et certaines fontes spéciales, il n'est en général pas nécessaire de traiter thermiquement les fontes.

Cependant, des traitements thermiques sont souvent utiles pour :

• La relaxation des contraintes de coulée.

• L'amélioration des propriétés mécaniques.

• Ou encore la correction des anomalies dues à une élaboration mal adaptée.

Les principes métallurgiques sont les mêmes que pour les aciers, à ceci près que le graphite et les carbures libres échangent réversiblement du carbone avec la matrice au cours du cycle thermique.

Les principaux traitements thermiques qui font le plus souvent l'objet d'une convention avec l'utilisateur sont décrits ci – après [27].

Les traitements thermiques sont définis comme suit :

1. Trempe :

Après chauffage et maintien, les pièces sont soumises à un refroidissement selon le mode approprié, dont la vitesse est réglée par le milieu de trempe utilisé, refroidissement qui peut se faire en air calme, air soufflé, dans l'huile, en bains de sels, etc., et suivant les alliages des pièces et les caractéristiques recherchées [29]. Pour obtenir une trempe efficace, on est amené à chauffer le métal à une température assez élevée jusqu'au domaine austénitique.

2. Revenu :

C'est une opération qui suit le traitement thermique (généralement la trempe). Les paramètres principaux du revenu sont la température de chauffage et la durée de maintien à cette température. La vitesse de refroidissement après revenu a une influence faible sur l'état des contraintes résiduelles. Néanmoins plus le refroidissement est lent, plus les contraintes résiduelles sont faibles [28]. Le revenu a pour rôle essentiel de faire évoluer une structure hors équilibre, obtenue par trempe, vers un état proche de l'équilibre. Il s'effectue à température modérée inférieure à la température de trempe.

- Revenu à basse température : Le revenu à basse température s'effectue avec un chauffage entre 200°C et 300°C.

Revenu à température intermédiaire : Le revenu à température intermédiaire se réalise entre 300 et 500°C.

- Revenu à haute température : Le revenu à haute température se fait entre 500 et 700°C.

Le plus souvent, il ne permet pas d'atteindre l'état d'équilibre obtenu par recuit. La nature des phases obtenues et leur composition sont en général voisines de celles obtenues par recuit, mais la structure micrographique est considérablement plus fine.

La trempe et le revenu des aciers n'ont pas seulement pour but de régler la dureté mais visent plutôt à établir le meilleur compromis entre l'usinabilité, la résistance à l'usure et les caractéristiques mécaniques (résistance, résilience, plasticité).

3. Recuit :

Le but visé par le recuit consiste à mettre le métal dans un état d'adoucissement ne présentant aucune trace laissée par les diverses manipulations subies antérieurement par le métal. Le recuit est un traitement thermique qui est composé d'opérations de chauffage, du séjour et un refroidissement ultérieur lent. Ce traitement comprend un chauffage au-dessus de l'intervalle de transformation. Le refroidissement qui suit le maintien à cette température doit être réalisé afin d'obtenir les constituants et la dureté désirés selon la vitesse de refroidissement.

- Refroidissement rapide, à l'air.
- Refroidissement lent, dans le four.

Trois types de recuit peuvent être envisagés :

- Recuit complet à haute température, supérieure à 900°C.
- Recuit à température moyenne, supérieure à la température de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$.
- Recuit à basse température, au-dessous de l'intervalle de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$. [29].
- Atlas of isotherme transformation diagramme of B.S. En Steele. (10 réf.), 1949, Spécial report.

2.4 Buts et rôle des traitements thermiques :

Le but des traitements thermiques et de donner à une pièce métallique les propriétés les plus convenables, soit pour sa mise en forme, soit pour son utilisation :

- Conférer à un matériau des propriétés particulières adaptées à sa meilleure utilisations us forme de pièce finie.
- Augmenter la dureté et la résistance mécanique.
- Augmenter la malléabilité.
- Facilité de mise en forme.
- Changement de la microstructure de la pièce.
- Affiner les grains et homogénéiser la structure. [27

CHAPITRE 3

Techniques expérimentales

3.1 Introduction :

Les pièces fabriquées en fonte grise lamellaire sont coulées et elles subissent des usinages ultérieurs. Leur usinage est un peu difficile et cela à cause de dureté élevée. Pour résolve ce problème de difficulté d'usinage, les pièces nécessitent un traitement de ferritisation.

Dans notre expérimentale de ce travail. La fonte grise lamellaire utilisée dans la fabrication des pièces flasque voir Figure 3.1. Dont la composition chimique est donnée dans le tableau

Tableau 3.1 : Composition chimique de la fonte étudiée.

Élément	C	S	Si
%	3. 3000	0.0643	2.17



Figure 3.1 : Flasque mécanique

3.2 Echantillons d'études :

Les échantillons utilisés sont de forme allongée, sont découpés d'une flasque déjà moulée.



Figure 3.2 : échantillon d'étude

3.3 Traitement thermique :

Pour faire un traitement de ferritisation, les échantillons doivent subir un traitement thermique.

Pour effectuer les traitements thermiques, des fours sont utilisés. Le four utilisé, est un four électrique dont la température peut atteindre 1050°C.

Les températures d'étude sont 800°C, 900°C et 950°C avec un temps de maintien de 30 minutes. Placer les échantillons dans un four préchauffé à une température d'environ 200°C pendant une période suffisante 1 heure pour éliminer l'humidité résiduelle et les tensions internes.

Les étapes à suivre pour les traitements sont les suivants :

- Retirer les échantillons du four et les laisser refroidir à température ambiante.
- Nous cassons le flasque mécanique et en prélevons 10 échantillons.
- Nettoyer les échantillons pour éliminer toute contamination ou oxydation de surface.
- Placer dans le four trois échantillons et attendons qu'il atteigne 800°C
- Nous l'avons réglé à la même température pendant 28 minutes.



Figure 3.3 : four de traitements thermiques.

Après le chauffage des échantillons a différentes températures, on les a subis des refroidissements selon les étapes suivantes :

- Nous sortons deux échantillons le premier échantillon refroidissement à l'air calme et le deuxième échantillon refroidissement à l'air comprimé. Le troisième nous parton refroidissement dans le jusqu'à 200 C.
- . Nous prélevons les échantillons après le refroidissement et les examiner visuellement pour détecter d'éventuels changements de microstructure ou de surface.

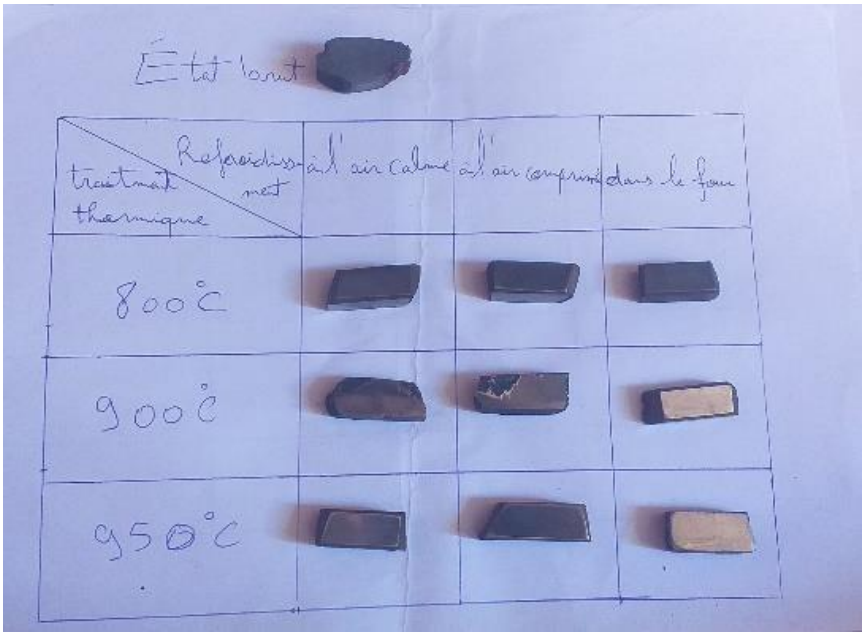


Figure 4.4 : Différents échantillons dans notre étude.

3 .4 Caractérisation métallographique :

Pour l'étude métallographique nous prélevons des échantillons en les coupant et les polissant.

Utiliser des techniques de caractérisation telles que la microscopie optique voir figure pour examiner la microstructure des échantillons traités. Analyser la distribution du graphite, la formation de phases ferritique et tout autre changement microstructural.

3 .4.1 Polissage :

Le but du polissage est de réaliser sur une coupe de l'échantillon, une surface polie spéculaire afin d'obtenir une image représentative de sa structure.

Le polissage a été réalisé sous un courant d'eau avec des papiers abrasifs en passant par plusieurs étapes :

• Polissage grossier avec papier émeri : 120, 180, 320

• Polissage moyen avec papier émeri : 500, 600

• Polissage fin avec papier émeri : 1000, 1200, 4000

• Finition en utilisant un feutre et de la pâte diamantée.

• Lubrifiant approprier (l'eau)

Pour cette opération il ne faut pas engendrer, la détérioration et l'échauffement de la surface.



Figure 3.5 : Polisseuse.

3.4.2 Finition :

C'est l'opération finale de polissage, a pour but d'éliminer les copeaux des grains et rendre la surface plus brillante. On a réalisé cette opération avec un filtre placé sur un disque tournant 300ture/min (figure 3.6), avec la pâte diamantée.



Figure 3.6 : Polisseuse mono plateau pour la finition.

3.4.3 Attaque chimique :

Pour faire l'attaque chimiques qui est une étape importante dans la préparation métallographique, le natale est utilisé comme agent d'attaque. Chaque échantillon est attaqué par le liquide pendant quelques secondes, l'échantillon est lavé après l'attaque séché et être prêt pour l'analyse métallographique au microscope.

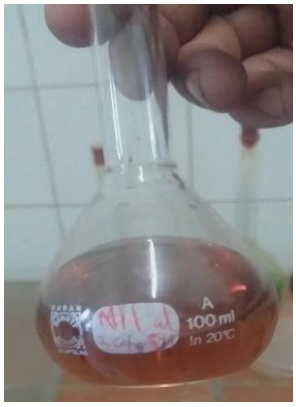


Figure 3.7 : Nitale pour attaque chimique.

3.4.5 Microscopie optique :

Le but de cette technique est de révéler les différentes microstructures de métal étudier avant et après traitement thermiques.

Le microscope utilisé est de marque LAIKA ; des différents grossissements ; menu d'une caméra ; qui est relier à un ordinateur : les micrographies sont traitées par un logiciel.



Figure 3.8 : Photo du microscope.

3.5 Caractérisation mécanique :

Dureté (Rockwell)

Cet essai sert à mesurer la dureté du matériau avant et après les différents traitements thermiques. En tenant compte de la profondeur à laquelle une pointe pénétrée dans le matériau lorsqu'on applique une charge donnée. Dans notre cas on a appliqué la dureté HRC (Rockwell):

- La charge appliquée : 750kgF.
- La pénétration (sous forme de bille) : cône en diamant.
- Diamètre : 5mm.



Figure 3.9: Rockwell.

Résultats et discussions

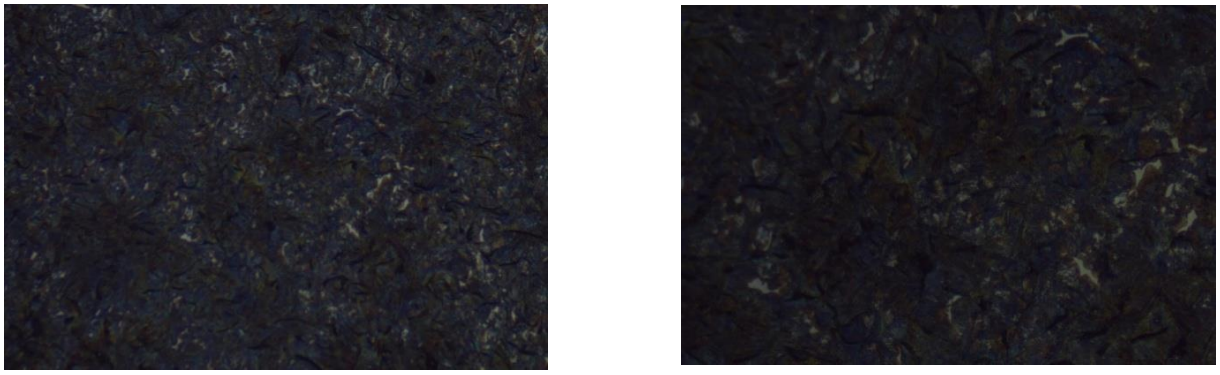
4.1 Introduction :

Après que les échantillons ont subi des traitements de chauffage et refroidissement. Les analyses microstructurales et mécaniques sont présentées dans ce chapitre. Tout cela pour correspondre la microstructure avant et après traitements thermiques aux caractéristiques mécaniques de la fonte grise.

Les différentes microstructures sont les suivantes.

4.2 Avant traitement :

La fonte grise est constituée entre 5 à 10% de ferrite et le reste perlito-ferrite ; dans notre micrographie représentée dans la figure 4.1 , les zones blanches représentent la phase ferrique et les zones sombres représentent les phases perlito-ferrite, dont la perlite est constituée de ferrite et cémentite.



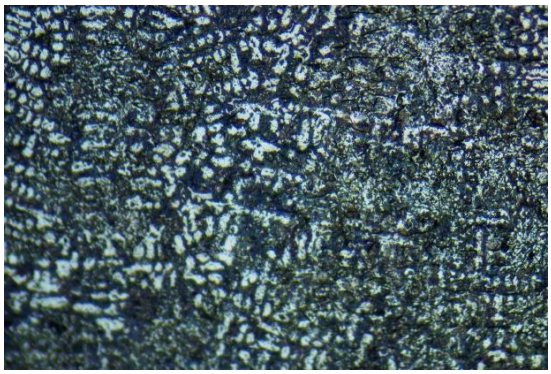
(a)×100 (b)×200

Figure 4.1 : Micrographie optique état brut (a)×100 et (b)×200.

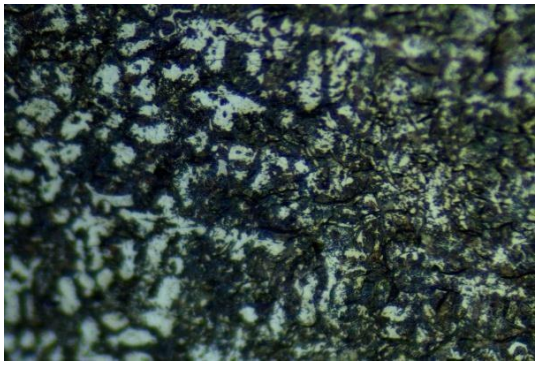
4.3 APRES TRAITEMENS à 800 :

4.3.1 Refroidissement dans le four :

Apres traitement au four ou le chauffage est effectué a 800 et un maintien pendant 30 minutes et un refroidissement dans le four pendant 21 heures et retirer l'échantillon a une température de 200) après un refroidissement a l'air ambient. Les microstructures sont représentées dans la figure 4.2. On remarque bien, que le pourcentage de la phase ferritique est augmenté cela est représenté par les phases claires, ainsi que les pourcentages de la phase perlito-ferritique est diminué, qui est représenté par les phases sombre. On peut dire que le pourcentage de ferrite représente entre 50 à 70%.



(a)×100



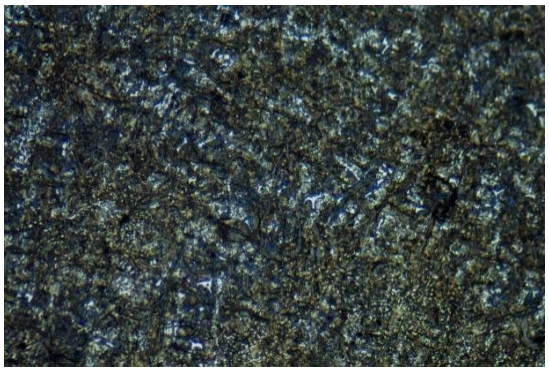
(b)×200

Figure 4.2 : Micrographie optique Traitement thermique à 800, refroidissement four :(a) ×100 et (b)×200

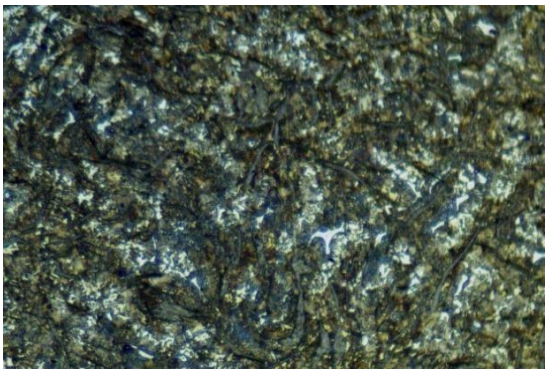
4.3.2 Refroidissement à l'air calme :

Apres traitement au four ou le chauffage est effectué a 800 et un maintien pendant 30 minutes et un refroidissement à l'air calme, à la température ambiante.

Les microstructures sont représentées dans la figure 4.3. On remarque bien, que le pourcentage de la phase ferritique est augmenté cela est représenté par les phases claires, ainsi que les pourcentages de la phase perlito-ferritique est diminué ; qui est représenté par les phases sombre. On peut dire que le pourcentage de ferrite représente entre 50 à 70%.



(a)×100



(b)×200

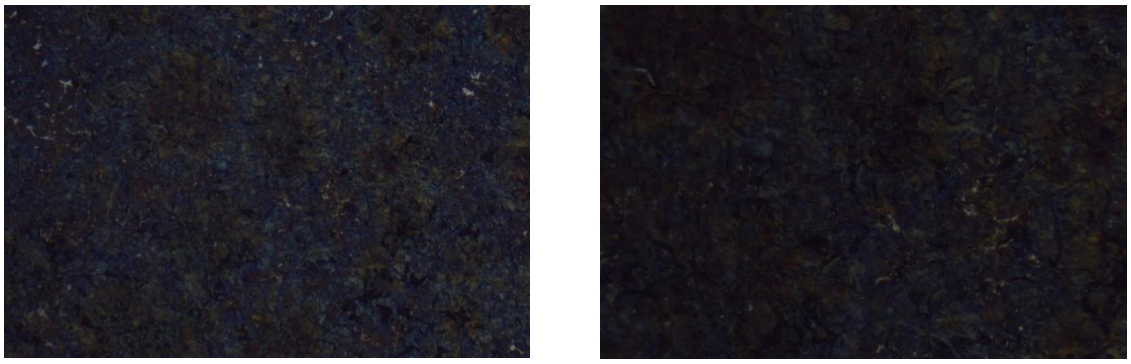
Figure 4.3 : Micrographie optique Traitement thermique à 800 ; refroidissement à l'air calme ; (a)×100 et (b)×200

4.3.3 Refroidissement à l'air comprimé :

Apres traitement au four ou le chauffage est effectué a 800 et un maintien pendant 30 minutes et un refroidissement à l'air comprimé d'une pression de 7 bars et une température de ……., pendant 7 minutes. Les microstructures sont représentées dans la figure 4.4. On

remarque bien, que le pourcentage de la phase ferritique est presque stagné cela est représenté par les phases claires ; ainsi que les pourcentages de la phase perlito-ferritique est aussi stagné, qui est représenté par les phases sombre.

On peut dire que le pourcentage de ferrite représente entre 5 à 10%. Presque aucun changement de la microstructure brut, aucun effet du traitement sur la microstructure.



(a)×100 (b) ×200

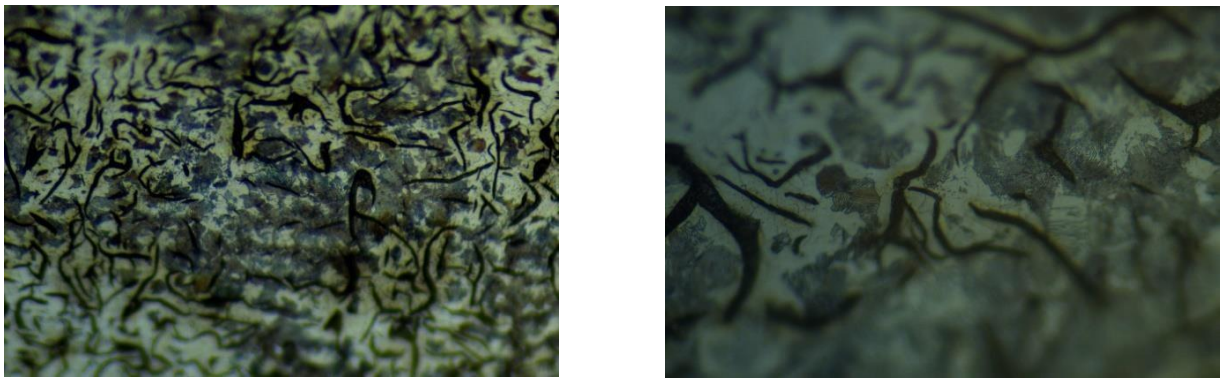
Figure 4.4 : Micrographie optique Traitement thermique à 800, refroidissement à l'air comprimé, (a)×100 et (b) ×200

4.4 APRES TRAITEMENS à 900 :

4.4.1 Refroidissement dans le four :

Apres traitement au four ou le chauffage est effectué à 900 et un maintien pendant 30 minutes et un refroidissement dans le four pendant 23 heures et retirer l'échantillon a une température de 200 après un refroidissement a l'air ambient.

Les microstructures sont représentées dans la figure 4.5. On remarque bien, que le pourcentage de la phase ferritique est augmenté cela est représenté par les phases claires, ainsi que les pourcentages de la phase perlito-ferritique est diminué, qui est représenté par les phases sombre. On peut dire que le pourcentage de ferrite représente entre 70 à 90%.



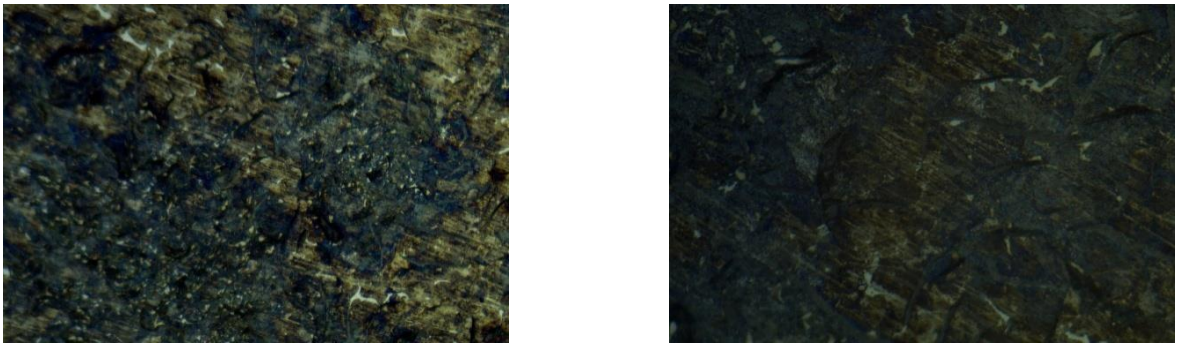
(a)×100 (b) ×200

Figure 4.5 : Micrographie optique Traitement thermique à 900, refroidissement au four: (a)×100 et (b) ×200

4.4.2 Refroidissement à l'air calme :

Apres traitement au four ou le chauffage est effectué à 900 et un maintien pendant 30 minutes et un refroidissement à l'air calme , à la température ambiante.

Les microstructures sont représentées dans la figure 4.6. On remarque bien, que le pourcentage de la phase ferritique n'est pas changé est représenté par les phases claires , ainsi que les pourcentages de la phase perlito-ferritique est diminué, qui est représenté par les phases sombre. On peut dire que le pourcentage de ferrite représente entre 5 à 10%.



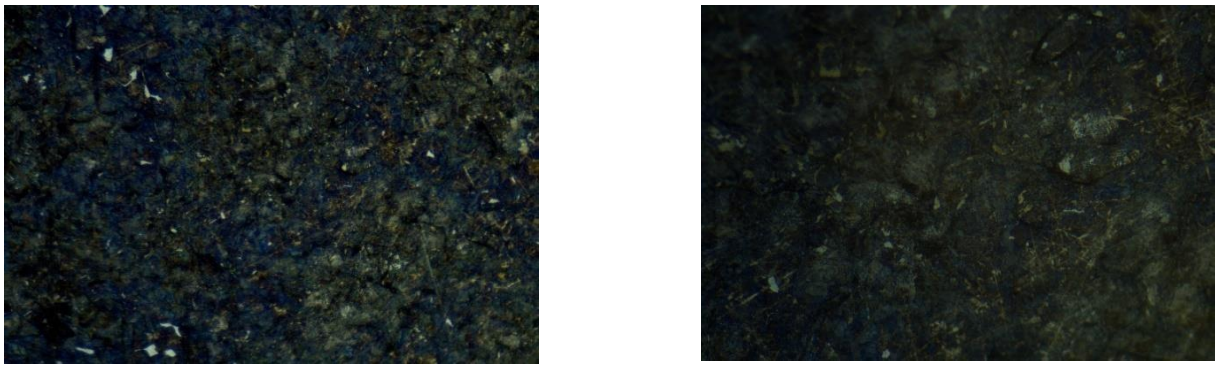
(a)×100 (b) ×200

Figure 4.6 : Micrographie optique Traitement thermique à 900, refroidissement à l'air calme, (a)×100 et (b) ×200

4.4.3 Refroidissement à l'air comprimé :

Apres traitement au four ou le chauffage est effectué à 900 et un maintien pendant 30 minutes et un refroidissement à l'air comprimé d'une pression de 7 bars et une température de ……., pendant 7 minutes. Les microstructures sont représentées dans la figure 4.7. On

remarque bien, que le pourcentage de la phase ferritique est remarquablement diminué ; presque toute la microstructure est perlitique. Dont les pourcentages de ferrite représentent entre 1 à 5%.



(a)×100 (b) ×200

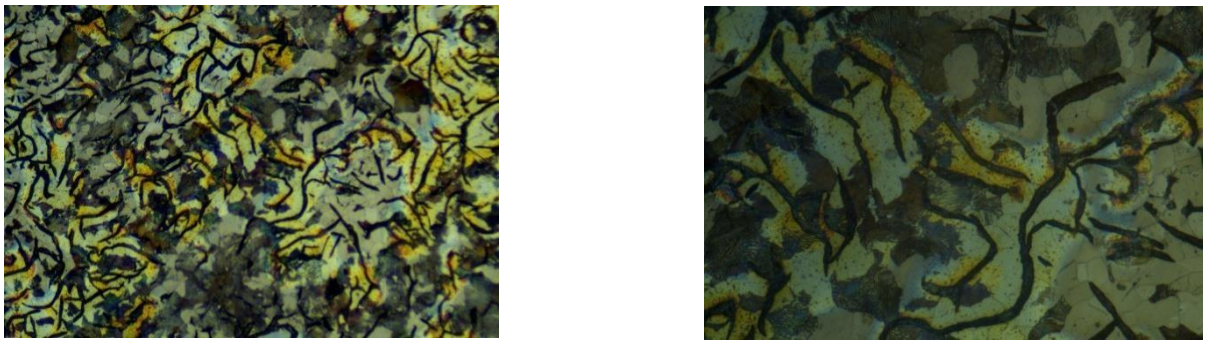
Figure 4.7 : Micrographie optique Traitement thermique à 900, refroidissement à l'air comprime, (a)×100 et (b) ×200

4.5 APRES TRAITEMENS à 950 :

4.5.1 Refroidissement dans le four :

Apres traitement au four ou le chauffage est effectué à 950 et un maintien pendant 30 minutes et un refroidissement dans le four pendant 24 heures et retirer l'échantillon a une température de 200 après un refroidissement a l'air ambient. Les microstructures sont représentées dans la figure 4.8.

On remarque bien, que le pourcentage de la phase ferritique est augmenté cela est représenté par les phases claires, ainsi que les pourcentages de la phase perlito-ferritique est diminué, qui est représenté par les phases sombre. On peut dire que le pourcentage de ferrite représente entre 70 à 90%.



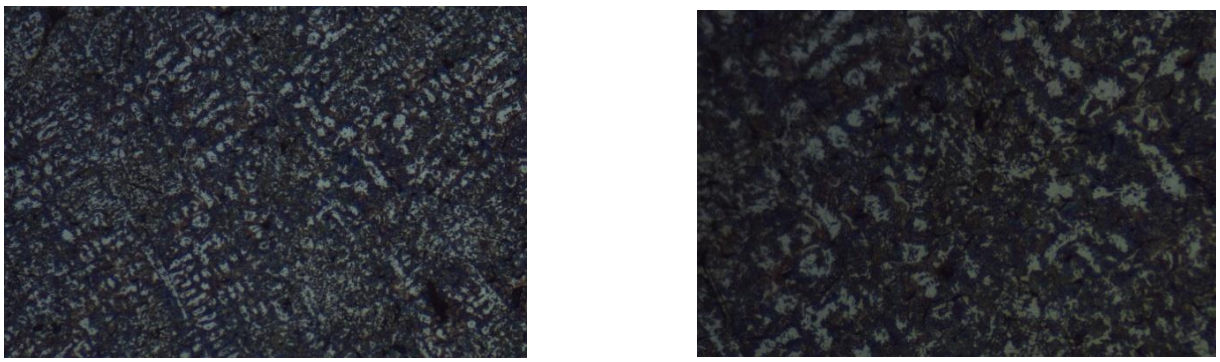
(a)×100 (b)×200

Figure 4.8 : Micrographie optique Traitement thermique à 950, refroidissement au four, (a)×100 et (b)×200

4.5.2 Refroidissement à l'air calme :

Apres traitement au four ou le chauffage est effectué à 950 et un maintien pendant 30 minutes et un refroidissement à l'air calme, à la température ambiante. Les microstructures sont représentées dans la figure 4.9.

On remarque bien, que le pourcentage de la phase ferritique n'est pas changé est représenté par les phases claires, ainsi que les pourcentages de la phase perlito-ferritique est diminué, qui est représenté par les phases sombre. On peut dire que le pourcentage de ferrite représente entre 5 à 10%.



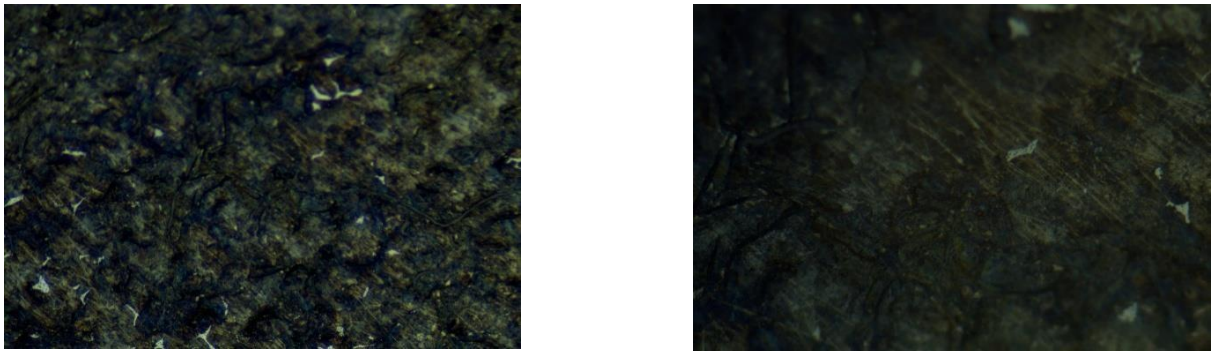
(a)×100 (b) ×200

Figure 4.9 : Micrographie optique Traitement thermique à 950, refroidissement à l'air calme, (a)×100 et (b) ×200

4.5.3 Refroidissement à l'air comprimé :

Apres traitement au four ou le chauffage est effectué à 950 et un maintien pendant 30 minutes et un refroidissement à l'air comprimé d'une pression de 7 bars et une température de ……..,pendant 7 minutes.

Les microstructures sont représentées dans la figure 4.10. On remarque bien, que le pourcentage de la phase ferritique est remarquablement diminué, presque toute la microstructure est perlitique. Dont les pourcentages de ferrite représentent entre 1 à 5%.



(a)×100 (b) ×200

Figure 4.10 : Micrographie optique Traitement thermique à 950, refroidissement à l'air comprimé, (a)×100 et (b) ×200

4.6 La dureté :

4.6.1 Etat brut avant traitement thermique :

Présente la micrographie d'une fonte à graphite apte pour un traitement FG.

Il s'agit d'une fonte ferrito-perlitique.

Tableau4.1 : La dureté à l'état brut

La dureté HB $_{5/750}$	229

4.6.2 Traitement thermique a 800 :

Tableau4.2 : La dureté de traitement thermique à 800.

Refroidissement	Le four	L'air calme	L'air comprimé
La dureté **HB**$_{5/750}$	175	207	224

La dureté change d'après les traitements thermiques, on remarque que la dureté diminue de 229 à 175. On peut expliquer ce changement et diminution d'après le changement

microstructural des phases dans la fonte grise. Le pourcentage de la phase ferritique augmente avec type de refroidissement, au four un refroidissement long qui fiat augmenter le pourcentage de la ferrite qui est moins dure que la phase perlitique.

Pour l'air calme la température et ambiante, mais la température de l'air comprimé est moins que celle de l'ambiante. Un refroidissement rapide que celui de l'air calme ou au four.

Et on peut remarquer ça par la température du séjour et le temps de refroidissement, qui de 800 et 21 heures de refroidissement dans le four.

4.6.3 Traitement thermique à 900 :

Tableau4.3 : La dureté de traitement thermique à 900.

Refroidissement	Le four	L'air calme	L'air comprimé
La dureté $\mathbf{HB}_{5/750}$	179	224	266

La dureté change d'après les traitements thermiques ; on remarque que la dureté diminue de 229 à 179. On peut expliquer ce changement et diminution d'après le changement microstructural des phases dans la fonte grise. Le pourcentage de la phase ferritique augmente avec type de refroidissement, au four un refroidissement long qui fiat augmenter le pourcentage de la ferrite qui est moins dure que la phase perlitique.

Pour l'air calme la température et ambiante ; mais la température de l'air comprimé est moins que celle de l'ambiante. Un refroidissement rapide que celui de l'air calme ou au four.

4.6.4 Traitement thermique à 950 :

Tableau4.4 : La dureté de traitement thermique à 950.

Refroidissement	Le four	L'air calme	L'air comprimé
La dureté $\mathbf{HB}_{5/750}$	157	241	269

La dureté change d'après les traitements thermiques, on remarque que la dureté diminue de 229 à 157. On peut expliquer ce changement et diminution d'après le changement microstructural des phases dans la fonte grise. Le pourcentage de la phase ferritique augmente avec type de refroidissement, au four un refroidissement long qui fiat augmenter le pourcentage de la ferrite qui est moins dure que la phase perlitique.

Pour l’air calme la température et ambiante, mais la température de l’air comprimé est moins que celle de l’ambiante. Un refroidissement rapide que celui de l’air calme ou au four.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

En conclusion, le traitement de la ferritisation des fontes grises par le biais d'un traitement thermique est un sujet d'étude important et bien documenté. Les travaux antérieurs ont démontré l'efficacité de cette méthode pour transformer la matrice graphite-perlite en une matrice ferritique plus homogène et compacte, améliorant ainsi les propriétés mécaniques et magnétiques des fontes grises.

La ferritisation des fontes grises offre plusieurs avantages significatifs, notamment une meilleure résistance à la traction, une résistance à la corrosion accrue, une meilleure usinabilité et des propriétés magnétiques adaptées à certaines applications. Cette transformation de phase permet également d'obtenir une microstructure plus uniforme, réduisant ainsi les défauts et les variations dans les propriétés des pièces en fonte grise.

Les travaux antérieurs ont porté sur divers aspects de la ferritisation, tels que l'optimisation des paramètres de traitement thermique, l'effet de la composition chimique, la caractérisation des microstructures ferritisées, les propriétés mécaniques et magnétiques, ainsi que la modélisation et la simulation numérique. Ces études ont jeté les bases pour une meilleure compréhension des mécanismes de transformation de phase et ont fourni des informations précieuses pour l'optimisation des processus de ferritisation.

Cependant, il reste encore des opportunités de recherche dans ce domaine. Par exemple, il serait intéressant d'explorer davantage l'effet des différents éléments d'alliage et de leurs concentrations sur la ferritisation, d'étudier les mécanismes de transformation de phase à l'échelle microscopique et de développer des modèles plus précis pour prédire et optimiser les propriétés des fontes grises ferritisées.

En outre, l'application des fontes grises ferritisées peut être étendue à de nombreux secteurs industriels, tels que l'automobile, la construction, l'énergie, etc. Des études supplémentaires pourraient donc se concentrer sur les applications spécifiques et les avantages de ces fontes grises traitées par ferritisation dans ces domaines.

En somme, les travaux antérieurs ont clairement démontré l'importance et le potentiel de la ferritisation dans le traitement thermique des fontes grises. L'étude de ce processus continue de fournir des connaissances précieuses pour améliorer les propriétés et l'utilisation des fontes grises dans diverses applications industrielles.

Références bibliographiques :

[1]- Jacques Fargues**,** matériaux métalliques**,** Définition métallurgique des fontes, (2008), pp. 309.

[2]- Khalid AFANGA,Modélisation systémique des filières sidérurgiques, Le haut fourneau conventionnel, Thèse, (2014).

[3]- S.BENSAADA, ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS), pp. 57-58.

[4]- Khalid AFANGA,Modélisation systémique des filières sidérurgiques, Filière Sidérurgique Globale, Thèse, (2014). pp.78- p84.

[5]- S.BENSAADA, ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS), pp. 53 et 64.

[6]- Khalid AFANGA,Modélisation systémique des filières sidérurgiquesDescription physico-chimique du haut fourneau classique, Thèse, (2014).

[7]- S.BENSAADA, ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS), pp. 68.

[8]- Jacques Fargues**,** matériaux métalliques**,** Définitions, notions de base et classification des fontes, (2008), pp.309.

[9]- Simone PARENT-SIMONIN et Jean-Claude MARGERIE. Technique de l'ingénieur : traitement thermiques des fontes.

[10]- Technique de l'ingénieur M 380 ; Jean-Claude MARGERIE ; Propriétés des fontes grises ordinaires.

[12]- Jacques Fargues, matériaux métalliques, Définitions, notions de base et classification des fontes, (2008), p312.

[13] – Technique de l'ingénieur M 380 ; Jean-Claude MARGERIE ; Propriétés des fontes grises ordinaires.

[11] – Technique de l'ingénieur M 770; Jacques CHÉRIÈRE ; Propriétés des fontes àgraphite nodulaire.

[14]- Laplanche, Les fontes et leur traitement thermique (tome II) page 139, 142 à 144, 160, 169, 170 à 172.

[15] – www.site.com ; « effet de Si sur les fontes ».

[16] – Métallurgie de la fonderie.

[17]- H. Le Breton: Manuel pratique de fondeur de fonte, Dunod, paris 1966.

[18]- M. Geier, Métallurgie de fonderie T2, édition Eyrolles, (1978).

[19] – Technique de l'ingénieur M 4610 ; Jacques JAULT ; Fontes à graphite sphéroïdal.

[20] – Technique de l'ingénieur M 1611 ; Christian GATELLIER ; Élaboration de la fonte et de l'acier.

[21]- TLILI-DJAOUAHDOU SAMIRA,Elaboration et Caractérisation des Revêtements durs de Molybdène et des Couches Nitrocarburées Déposés sur une Fonte Grise,Facteurs exerçant une influence sur les caractéristiques mécaniques, Thèse, (2013).

[22]- Jean-Claude MARGERIE, Propriétés des fontes grises Ordinaires, Caractéristiques mécaniques,**M 380**

[23]- J. J. LAMOUREUX, Précis de corrosion, edition Beauchemin MASSON, 1994.

[24]- https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/corrosion-des-metaux-etbetons/corrosion-des-materiaux-metalliques/corrosion-de-la-fonte-graphitisation

Chapitre 2 : traitement thermique des fontes

[25] Science et génie des matériaux modulo Editeur, 2001,233AV Dunbar Mont Royal

Québec, Canada

[26] S.Bensaada, Traitements Thermiques, Classification Et Désignation Des Aciers Et Fontes

[27] M. AIT GHERBI Hamza, M. SALHI Sofiane. Amélioration de la dureté de la vanne de contrôle dans les systèmes de forage à entraînement supérieur. Editeur a l'université ummto 2013

[28] Mémoire : BOUTEBBA Salah Eddine, 2017.

[29] WEVER (F), ROSE (A), PETER (W), STRASSFURG (W) et REDEMACHER (L.).