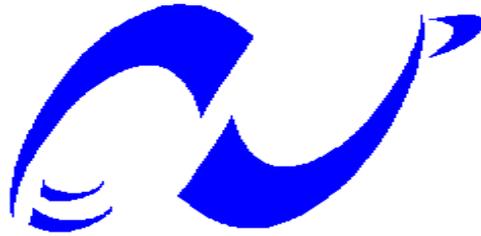


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT DE METALLURGIE

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Métallurgie

Thème :

Effet des éléments chimiques C, Si, Mn, Cu sur les caractéristiques
mécaniques et métallographiques de la fonte grise à graphite
lamellaire Ft25

Réalisé par :

MAMOU Mohamed
CHOUIDER Et-taher

Dirigé par :

Dr. A. DELLALI

ENP 2013

ملخص

وكان الغرض من هذه الدراسة هو تحديد تأثير الكربون و السليكون و المنجنيز و النحاس على الخواص الميكانيكية و المجهرية من الحديد الزهر الرمادي مع الغرافيت رقائقي .

يمكن أن تستغل هذه الدراسة لجعل الاجزاء الميكانيكية أكثر مقاومة عن طريق تعديل المحتوى الشامل للحديد من كل عنصر وهذا يتوقف على شروط الاستخدام لهذه الاجزاء .

الكلمات المفتاحية الحديد و الصلب الغرافيت المسطحة الصلب الرمادي التجارب الميكانيكية

Résumé

Le but de ce travail est de déterminer l'influence des éléments carbone, silicium, manganèse et cuivre sur les propriétés mécaniques et sur la microstructure de la fonte grise à graphite lamellaire Ft25. Cette étude peut être exploitée pour fabriquer des pièces mécaniques plus résistantes en modifiant la teneur massique de la fonte en chaque élément, en fonction des conditions d'emploi de ces pièces.

Mots clés : Fonte grise, graphite lamellaire, métallographie, les essais mécaniques.

Abstract :

The purpose of this study was to determine the influence of carbone, silicon, manganese and copper on the mechanical properties and microstructure of gray cast iron with lamellar graphite Ft25. This study can be exploited to make more resistant mechanical parts by modifying the mass content of iron in each element, depending on the conditions of use for these parts.

Key words: grey iron, lamellar graphite, metallography, mechanical tests.

REMERCIEMENT

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à faire ce modeste travail.

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier vivement Mr A. DELLALI notre encadreur pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, pour sa disponibilité, ses conseils et son aide précieuse.

Nous remercions également tous les membres de jury d'avoir accepté de siéger dans notre jury.

On ne peut oublier de remercier tous les gens qui nous ont aidé à la réalisation de ce projet.

Nous tenons à remercier les responsables de l'UFR de nous avoir aidé lors de notre passage pour un stage pratique effectué auprès d'eux.

DÉDICACES

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À :

- *MES CHERS PARENTS*
- *MES FRÈRES : LIM, BOUSSAD ET RABAH*
- *MON SEUL ET UNIQUE AMOUR HANANE*
- *MES COUSINS ET MES COUSINES*
- *TOUS MES AMIS DE L'ECOLE : MOULOUDJ,
TAHER, TAREK, YUCEF, LAMINE, MADJID,
CHOYEB, AMINE, MOUSSA, MORAD.....ETC*
- *TOUS CEUX QUI COMPTENT POUR MOI*

MAMOU

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : Présentation de l'entreprise	
I.1. Historique	2
I.2. Mission de l'entreprise	3
I.3. Activité de l'entreprise	3
I.3.1. Activité étude et recherche	4
I.3.2. Activité production	4
I.3.3. Activité de distribution et maintenance	6
I.3.3.1. Direction Marketing et Ventes (DMV)	6
I.3.3.2. Direction Centrale Après Vente (DCAV)	6
I.4. Division Fonderie Rouiba (D.F.R)	7
CHAPITRE II : Les fontes	
II.1. Le fer et ses alliages	11
II.2. Diagramme d'équilibre fer-carbone	11
II.2.1. Diagramme d'équilibre fer-cémentite	12
II.2.2. Diagramme d'équilibre fer-graphite	13
II.3. Généralités sur les fontes	14
II.3.1. Définition métallurgique d'une fonte	14
II.3.2. Différents types de carbone qui se trouve dans les fontes	14
II.3.3. Composition chimique.....	15
II.3.4. Types des fontes	16
II.3.4.1. Fontes blanches	16
II.3.4.2. Fontes malléables	17
II.3.4.3. Fontes grises.....	19
II.3.4.4. Fontes truitées	21
II.3.4.5. Fontes spéciales alliées.....	21
II.3.5. Caractéristiques des constituants de base des fontes moulées	22
II.4. Types de graphite.....	28
II.4.1. Graphite non sphéroïdal	28
II.4.1.1. Graphite punctiforme.....	28

SOMMAIRE

II.4.1.2. Graphite dit : en paillettes ou lamellaire.....	28
II.4.2. Graphite sphéroïdal.....	30
CHAPITRE III : Fonte grise lamellaire FGL	
III.1. Caractéristiques des fontes GL.....	31
III.2. Désignation normalisée.....	32
III.3. Caractéristiques mécaniques fondamentales des fontes GL.....	33
III.4. Elaboration.....	37
III.4.1. Constitution des charges métalliques	37
III.4.2. Ajustement de la composition chimique.....	39
III.4.2.1 Eléments d'addition, Ferro-alliages.....	39
III.4.2.2. Inoculation graphitiques.....	39
III.5. Etude du refroidissement d'une fonte hypoeutectique.....	40
III.6. Influence des éléments normaux sur la fonte GL.....	42
III.7. Influence des éléments spéciaux sur la fonte GL.....	43
CHAPITRE IV : Techniques expérimentales	
IV.1. Elaboration de la fonte Ft25.....	45
IV.2. Procédé de fabrication des éprouvettes.....	46
IV.2.1. Préparation des quantités à ajouter.....	46
IV.2.2. Fabrication des moules.....	49
IV.2.3. Opération de coulée.....	51
IV.2.4. Décochage et parachèvement des éprouvettes.....	51
IV.3. Caractérisation.....	52
IV.3.1. Caractérisation microstructurale.....	52
IV.3.1.1. Préparation métallographique des échantillons.....	52
IV.3.1.2. Attaque chimique	54
IV.3.1.3. Observation microscopique	54
IV.3.2. Caractérisation mécanique	56
IV.3.2.1. Essai de dureté	56
IV.3.2.2. Essai de traction.....	58
IV.3.2.3. Essai de compression	61
CHAPITRE V : Résultats et discussion	
V.1. La composition chimique de la fonte Ft25.....	62
V.2. La microstructure de la fonte Ft25.....	62
V.3. Caractéristiques mécaniques de la fonte Ft25.....	63

SOMMAIRE

V.4. Influence de la variation du taux des éléments.....	64
V.4.1. Influence sur la microstructure.....	64
V.4.1. Influence sur le graphite.....	64
V.4.1.1. Influence sur le graphite.....	64
V.4.1.2. Influence sur la matrice.....	68
V.4.2. Influence sur les propriétés mécaniques.....	72
V.4.2.1. Influence sur la dureté.....	72
V.4.2.2. Influence sur la résistance à la traction.....	79
V.4.2.3. Influence sur la résistance à la compression.....	85
CONCLUSION GENERALE.....	92

Index des figures

N°	Titres des figures	Page
Fig II.1	Diagramme métastable.	12
Fig II.2	Diagramme d'équilibre Fe-C-Si à 2% de silicium.	13
Fig II.3	Fonte blanche hypo-eutectique.	17
Fig II.4	Fonte malléable à cœur noir.	18
Fig II.5	Fonte grise lamellaire sans attaque x 200.	20
Fig II.6	Microstructure des constituants perlitique.	23
Fig II.7	Microstructure d'une fonte austénitique.	24
Fig II.8	Morphologie de la bainite supérieure.	25
Fig II.9	Morphologie de la bainite inférieure.	26
Fig II.10	Morphologie de la martensite.	26
Fig II.11	Morphologie de la sorbite.	27
Fig II.12	Représentation des différents types de graphite dans les fontes grises lamellaires.	29
Fig II.13	Forme du graphite sphéroïdal.	30
Fig III.1	Diagrammes métastable et stable superposés.	41
Fig III.2	Transformations à l'état solide d'une fonte grise.	41
Fig IV.1	La balance électronique.	49
Fig IV.2	Les moules pour éprouvettes.	50
Fig IV.3	Opération de coulée.	51
Fig IV.4	Meulage des éprouvettes.	51
Fig IV.5	Polisseuse à deux plateaux.	53
Fig IV.6	Polisseuse mono plateau pour la finition.	53
Fig IV.7	Echantillons coupés pour la structure.	54
Fig IV.8	Microscope optique « OLYMPUS » du Département Métallurgie.	55
Fig IV.9	Essai de dureté Brinell HB.	56
Fig IV.10	Echantillon après essai de dureté.	57
Fig IV.11	La machine de dureté HB.	57
Fig IV.12	Les éprouvettes de traction.	58
Fig IV.13	Courbe rationnel de traction pour la fonte FT25.	59
Fig IV.14	Les éprouvettes de compression.	61
Fig V.1	Microstructure de la fonte de base sans attaque chimique.	62
Fig V.2	Microstructure de la fonte de base attaquée au Nital 5%.	63
Fig V.3	Microstructure de la fonte avec une variation de 0,6% C, sans attaque chimique.	64
Fig V.4	Microstructure de la fonte avec une variation de 0,6% Si, sans attaque chimique.	65
Fig V.5	Microstructure de la fonte avec une variation de 0,6% Mn, sans attaque chimique.	66

Fig V.6	Microstructure de la fonte avec une variation de 0,6%Cu, sans attaque chimique.	67
Fig V.7	Microstructure de la fonte avec une variation de 0,6%C, après attaque chimique au Nital 5%.	68
Fig V.8	Microstructure de la fonte avec une variation de 0,6%Si, après attaque chimique au Nital 5%.	69
Fig V.9	Microstructure de la fonte avec une variation de 0,6%Mn, après attaque chimique au Nital 5%.	70
Fig V.10	Microstructure de la fonte avec une variation de 0,6%Cu, après attaque chimique au Nital 5%.	71
Fig V.11	Variation de la dureté en fonction de teneurs massiques en carbone.	73
Fig V.12	Variation de la dureté en fonction de teneurs massiques en silicium.	75
Fig V.13	Variation de la dureté en fonction de teneurs massiques en manganèse.	76
Fig V.14	Variation de la dureté en fonction de teneurs massiques en cuivre.	78
Fig V.15	Variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur massique en carbone.	79
Fig V.16	Variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur massique en silicium.	81
Fig V.17	Variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur massique en manganèse.	82
Fig V.18	Variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur massique en cuivre.	84
Fig V.19	Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur massique en carbone.	86
Fig V.20	Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur massique en silicium.	87
Fig V.21	Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur massique en manganèse.	88
Fig V.22	Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur massique en cuivre.	91

Index des tableaux

N°	Titre des tableaux	Page
Tableau III.1	liste des fontes non-alliées à graphite lamellaire.	32
Tableau III.2	Principales caractéristiques des nuances de fontes à graphite lamellaire.	35
Tableau III.3	Résistance au choc KG, selon la norme NF A 03-202, de trois fontes grises à graphite lamellaire.	36
Tableau III.4	composition chimique de la charge en hématite.	38
Tableau IV.1	Les fourchettes de la composition chimique de la fonte Ft25 utilisées à l'UFR.	45
Tableau IV.2	Caractéristiques mécaniques de la traction.	60
Tableau V.1	la composition chimique de la fonte élaborée.	62
Tableau V.2	les caractéristiques mécaniques de la fonte de base.	63
Tableau V.3	les valeurs de la dureté de la fonte, avec les différentes variations en teneur en carbone.	72
Tableau V.4	les valeurs de la dureté de la fonte, avec les différentes variations en teneur en silicium.	74
Tableau V.5	les valeurs de la dureté de la fonte, avec les différentes variations en teneur en manganèse.	76
Tableau V.6	les valeurs de la dureté de la fonte, avec les différentes variations en teneur en cuivre.	77
Tableau V.7	les valeurs de la résistance à la traction de la fonte, avec les différentes variations en teneur en carbone	79
Tableau V.8	les valeurs de la résistance à la traction de la fonte, avec les différentes variations en teneur en silicium.	80
Tableau V.9	les valeurs de la résistance à la traction de la fonte, avec les différentes variations en teneur en manganèse.	82
Tableau V.10	les valeurs de la résistance à la traction de la fonte, avec les différentes variations en teneur en cuivre.	83
Tableau V.11	les valeurs de la résistance à la compression de la fonte, avec les différentes variations en teneur en carbone.	85
Tableau V.12	les valeurs de la résistance à la compression de la fonte, avec les différentes variations en teneur en silicium.	87
Tableau V.13	les valeurs de la résistance à la compression de la fonte, avec les différents teneurs en manganèse.	88
Tableau V.14	les valeurs de la résistance à la compression de la fonte, avec les différentes variations en teneur en cuivre.	90

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Comparées aux autres matériaux métalliques, les fontes offrent aux utilisateurs un large choix de caractéristiques mécaniques pour un prix intéressant, compte tenu des matières employées et de la facilité d'élaboration. Leur domaine d'emploi est sensiblement élargi grâce à des éléments d'addition ajoutés de très faibles quantités qui permettent de varier les propriétés mécaniques et structurales.

Les fontes ordinaires contiennent, outre le fer le carbone, du silicium, du manganèse, du cuivre, du soufre et du phosphore. Les méthodes scientifiques modernes ont permis de faire mieux connaître le rôle de chacun de ces éléments composants les fontes et, elles ont eu pour conséquence, la mise au point des fontes répondant parfaitement à des conditions d'utilisation bien déterminées. La connaissance des fontes n'est pas chose simple ; complexes sont les phénomènes qui accompagnent, tant la solidification que le refroidissement à l'état solide de tels alliages ; complexes également, sont les effets, sur l'allure du produit solide à froid, des divers éléments composants la fonte.

Les fontes GL, 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.

Dans notre étude on s'intéresse aux propriétés mécaniques et microstructurales de celles-ci, et particulièrement de la fonte Ft25, ainsi que l'influence de carbone, de silicium, de manganèse et de cuivre sur les propriétés de ces fontes.

La partie bibliographique de ce travail présente au chapitre I, des généralités sur les fontes, ensuite on traite au chapitre II les caractéristiques mécaniques fondamentales et les caractéristiques microstructurales des fontes grises à graphite lamellaire, ensuite on parle de l'élaboration et du mode de refroidissement de ces fontes.

La partie expérimentale est constituée de deux chapitres, dans le premier on traite le déroulement des expériences, et dans le deuxième, on présentera les résultats obtenus et leurs interprétations. Puis on termine avec une conclusion générale.

CHAPITRE I :

Présentation de l'entreprise

I.1. Historique :

L'entreprise Nationale des Véhicules Industriels (SNVI) est née par décret 81-342 du 12/12/1981. Elle a hérité des structures, moyens, biens, activité, monopole à l'importation et le personnel détenus ou gérés par la Société Nationale de Construction Mécanique (SONACOME) par décret n° 81-345 du 12/12/1981.

La Société Nationale de Construction Mécanique (SONACOME) a été créée par ordonnance n° 67-150 du 09/08/1967, ayant pour vocation d'exploiter et de gérer les usines de construction mécanique du secteur public. Son schéma d'organisation regroupe dix divisions dont la DVI future SNVI.

La SONACOME a hérité du patrimoine de la société africaine des automobiles BERLIET (S.A.A.B / S.A). Après sa dissolution par décret n° 73-764 du 01/10/1973, suivant les conventions conclus à ALGER le 24/06/1964 entre l'état Algérien et la S.A.A.B/S.A, le 06/08/1964 entre la Caisse Algérienne du Développement (C.A.D) et la S.A.A.B/S.A et le contrat du 30/07/1970 entre la SONACOME et la S.A.A.B/S.A.

L'installation de la société africaine des automobiles BERLIET (S.A.A.B/SA) en Algérie remonte à 1957. Son siège se situe à ALGER, immeuble « MAURITANIA ». Elle est dotée d'une usine de montage de véhicules « poids lourds » à 30 KM à l'Est d'ALGER, plus exactement à ROUIBA, avec des succursales implantées à : HUSSEIN DEY, CONSTANTINE, ORAN et OUARGLA.

Le 09/05/1995, transformation de la SNVI en Société Par Action au capital social de 2,2 milliards de dinars.

I.2. Mission de l'entreprise :

L'Entreprise Nationale des Véhicules Industriels (SNVI), issue de la restructuration de la SONACOME, est chargée dans le cadre du plan national du développement économique et social de :

- La recherche
- Le développement
- L'importation
- La distribution

Elle se spécialise dans le secteur des véhicules industriels et leurs composants dont :

- Les camions
- Les autocars, autobus, minicars, minibus
- Les camions spéciaux
- Le matériel tracté (remorques, semi-remorques, et autres...)
- Les pièces brutes de fonderie.

D'une manière générale, tous véhicules destinés au transport routier de personnes et marchandises d'une charge utile supérieur à 1,5 tonne.

D'autres parts, la SNVI est chargée d'assurer et de promouvoir les activités d'après vente des véhicules industriels, par la mise en place de leurs moyens de maintenance.

I.3. Activité de l'entreprise

La SNVI a pour activités principales :

- ✓ La recherche
- ✓ La production
- ✓ La distribution et la maintenance

I. 3.1. Activité étude et recherche :

Cette activité est assurée par l'Unité d'Etude et Recherche « UER ». Elle a pour missions :

- l'innovation et le lancement de nouveaux produits.
- L'amélioration de la qualité et la fiabilité.
- L'acquisition et la maîtrise de nouvelles technologies.
- La diversification des sources d'approvisionnement.

I.3.2. Activité production :

Cette activité est assurée par (04) quatre unités opérationnelles qui sont :

- a. Division Véhicules Industriels (D.V.I)
- b. Unité Carrosserie Rouïba (U.C.R)
- c. Unité Carrosserie Tiaret (U.C.T)
- d. Division Fonderie Rouïba (D.F.R)

a. Division Véhicules Industriels (D.V.I) :

Cette unité ayant pour activité d'origine, le montage de camions et d'autobus, leurs ventes ainsi que la distribution de pièces de rechange. Elle a été restructurée par la SONACOME pour la fabrication intégrée des camions, autobus et pièces de rechange.

La D.V.I fabrique actuellement (07) sept type de produits de base camions, autobus, autocars. Le taux d'intégration global moyen en usine est de l'ordre de 58%, ce qui nécessite la mise en œuvre d'une technologie variée et complexe au sein des différents centres de fabrication dont les plus importants sont :

- ✓ La forge
- ✓ L'emboutissage
- ✓ L'usinage et traitement thermique

- ✓ Le montage

b. Unité Carrosserie de Rouiba (U.C.R) :

Mise en production en Septembre 1979, cette unité intégrée initialement au C.V.I Rouïba, est autonome depuis 1987. Sa fonction est de fabriquer toutes une variété de produits de carrosserie portées ou tractées.

Elle dispose pour cela les ateliers principaux suivants :

- Atelier de débitage
- Atelier de mécanique
- Atelier d'assemblage
- Atelier de montage
- Atelier de peinture

c. Unité de Carrosserie de Tiaret (U.C.T) :

Mise en production en 1982, est d'une capacité contractuelle de 9000 carrosserie/an. La carrosserie de Tiaret fabrique essentiellement le matériel tracté et les équipements destinés à faire monter sur des châssis cabine SNVI.

d. Division Fonderie Rouïba (D.F.R) :

Mise en production en 1984, cette unité intégrée à l'origine C.V.I/ROUIBA, est autonome depuis le 01/01/1987. Elle est d'une capacité contractuelle de 10.000 tonnes/an de pièces de brutes de fonderie.

I.3.3. Activité de distribution et maintenance :

Cette activité est assurée sous les directives de deux (02) directions importantes :

I.3.3.1. Direction Marketing et Ventes (DMV) :

Pour améliorer son potentiel de distribution, la SNVI a mis en place une unité gestion produit. Implantée à Rouiba sur le site du complexe, cette unité a pour missions principales :

- Réception et contrôle des véhicules.
- Mise en carrosserie des véhicules.
- La préparation de ces véhicules.
- Livraison vers les unités commerciales.
- Gestion des stocks.

I.3.3.2. Direction Centrale Après Vente (DCAV) :

L'importante activité de la DCAV, est assurée par onze unités commerciales réparties à travers le territoire national.

La DCAV est chargée d'assurer :

- La vente des véhicules neufs
- La vente des pièces de rechange
- Le service Après Vente
- La réparation et la rénovation des parcs régionaux de ces produits.

I.4. Division Fonderie Rouïba (D.F.R) :

Cette unité est la plus importante car elle comporte plus de moyens, installations et nombres d'ouvriers qui travaille au sein de cette entreprise par rapport aux autres unités du complexe.

Organigramme de D.F.R :

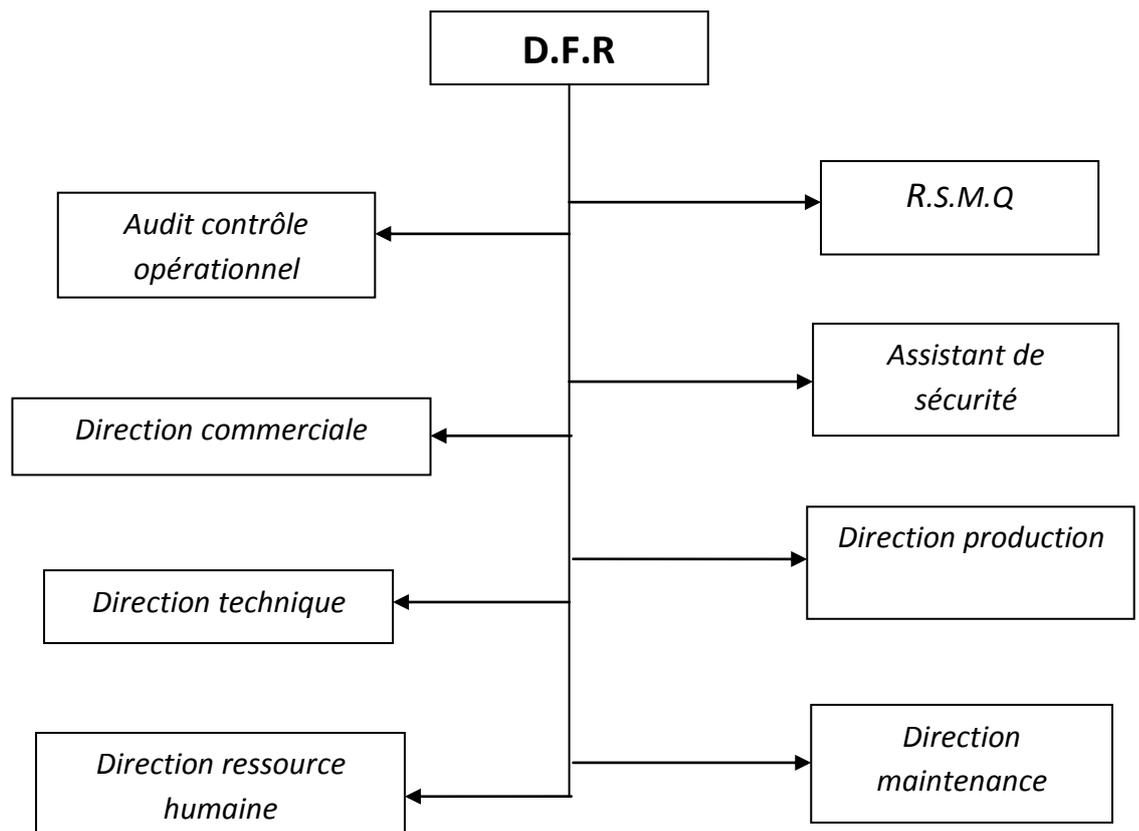
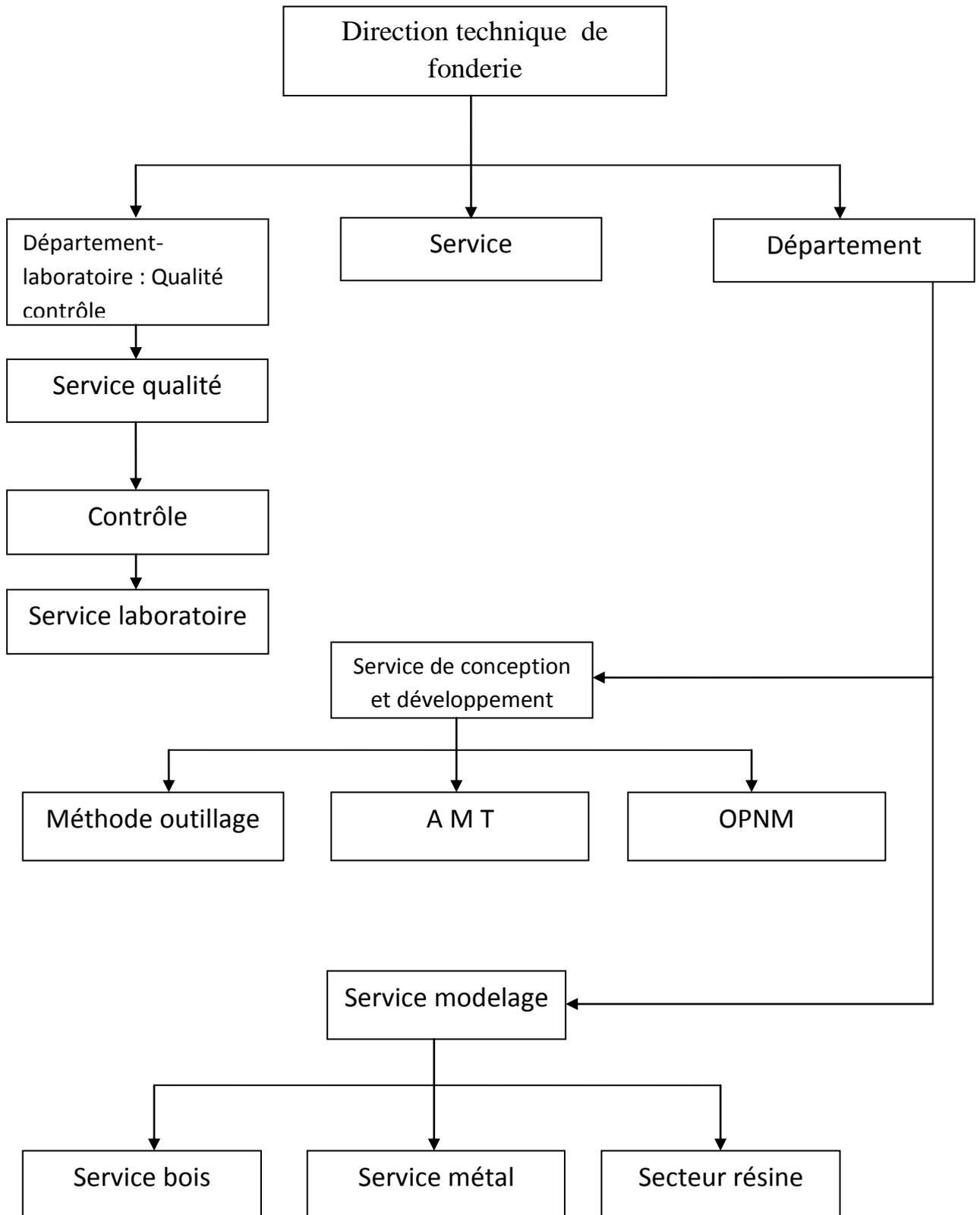


Fig. I.1 R.S.M.Q : Responsable de Système Management de la Qualité

Organigramme de la direction technique :



A .M. T : analyse et mesure des températures

O.P .N. M : organisation des produits nouveaux et modifier

L'UFR de Rouiba est équipée :

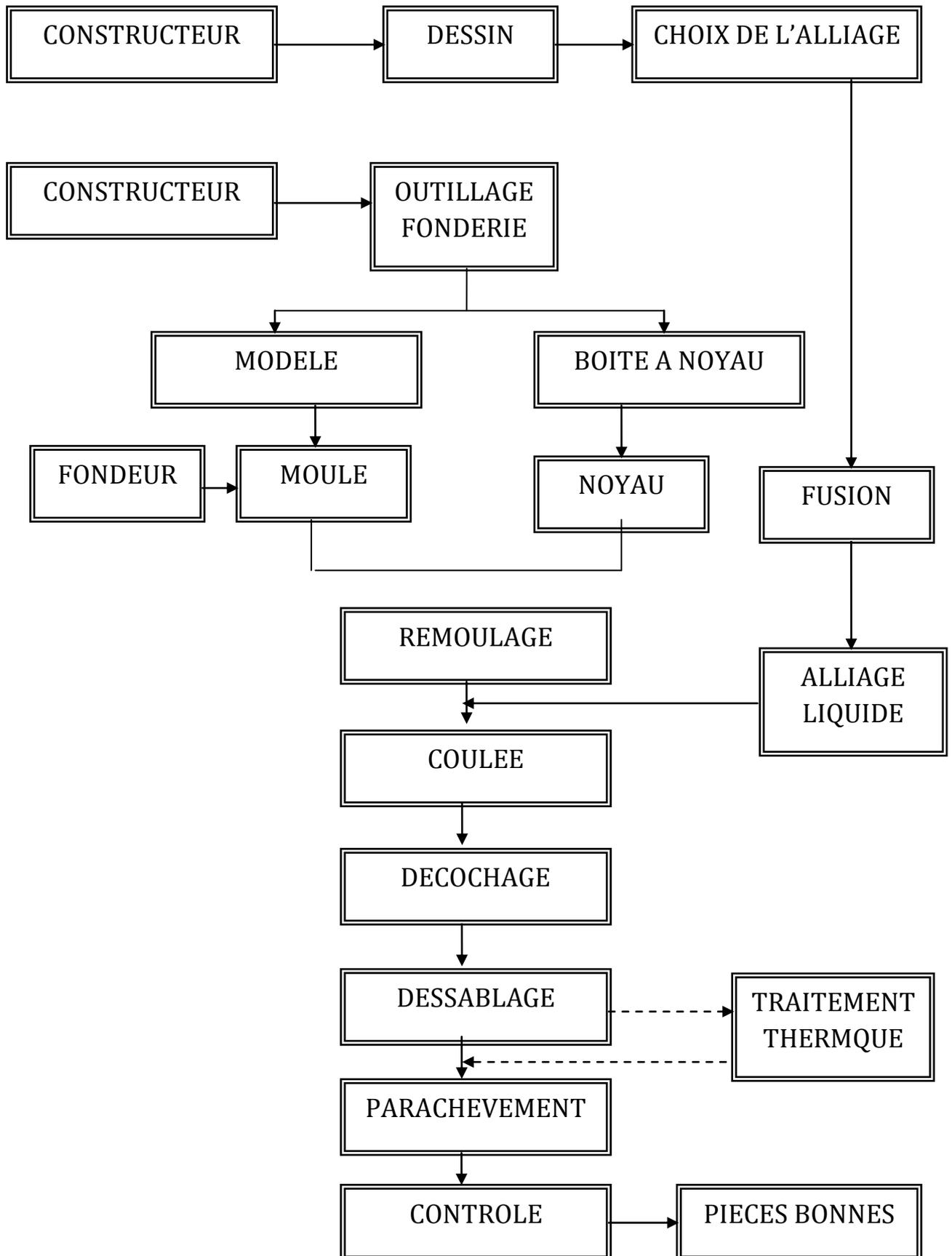
- ✓ Méthodes d'outillages
- ✓ Modelage
- ✓ Unité de traitement de sable
- ✓ Noyautage
- ✓ Moulage
- ✓ Fusion
- ✓ Parachèvement

Objectif actuel :

La DFR a le souci de subvenir au besoin du DVI et de se redéployer pour occuper les capacités existantes à savoir :

- a) Industrialiser le maximum de pièce en fonte grise lamellaire pour la DVI, tels que les tambours de frein, chapeaux, couvercles.
- b) Réaliser la production du CMT en FGS et en FGL tels que les tambours de frein, trompettes, volants moteurs, cuve d'huile, berceau d'essieu etc.
- c) Réaliser la production CPG en FGL tels que les tambours de frein, carters...
- d) L'intégration des blocs moteurs 3, 4 et 6 cylindres pour CMT depuis 1996.
- e) Industrialiser les pièces en FGS et FGL pour la DC ROUIBA et industrialiser les pièces mécaniques pour divers clients.

Schéma général de la fabrication:



CHAPITRE II :

Les fontes

II.1. LE FER ET SES ALLIAGES :

Le fer est un métal dont la structure, à l'état pur, est cubique centrée (fer α) au-dessous de 912 °C, cubique à faces centrées (fer γ) entre 912 °C et 1 394 °C, température à laquelle le fer reprend la structure cubique centrée sous la forme dite fer δ (identique au fer α), état cristallin qu'il conserve jusqu'à sa fusion à 1538 °C.

Les alliages de fer sont des matériaux métalliques relativement peu onéreux dont les performances mécaniques satisfont de nombreuses exigences qui peuvent atteindre des niveaux très élevés. Parmi eux on distingue :

- les aciers qui sont (selon NF EN 10020) des alliages de fer et de carbone, élément d'alliage dont la teneur est généralement inférieure à 2 %. Si l'acier contient d'autres éléments d'alliage, cette limite peut changer;
- les fontes, alliages fer + carbone contenant de haute teneur en carbone (supérieures aux limites fixées pour les aciers) et qui sont essentiellement mises en forme par moulage [1].

II.2. DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-CARBONE :

Les diagrammes d'équilibre sont construits à partir des conditions d'équilibre, ou des conditions assez proches de celle-ci ; ils nous indiquent la composition des phases et la structure de l'alliage en fonction de la température et la concentration. La connaissance du diagramme d'équilibre nous permet de prévoir que certaines transformations ne pouvant jamais se faire pour une température et une composition donnée, sans pour autant permettre de savoir si une transformation possible se produise avec une vitesse appréciable.

Il existe deux types de diagrammes d'équilibre Fer-Carbone, le diagramme Fer-cémentite (**Figure II.1**) dit métastable, et le diagramme Fer-graphite (**Figure II.2**) dit stable [2].

II.2.1. Diagramme d'équilibre fer-cémentite :

La **figure II.1** présente le diagramme d'équilibre Fer-Cémentite, qui traduit la composition des phases et la structure des alliages Fer-Carbone, dont la concentration varie de fer pur à la cémentite (6,67% de C). Le point A(1534°C) du diagramme correspond au point de fusion du fer pur, alors que le point D(1230°C) à celui de la cémentite. Quand au point N(1400°C) et G(910°C), il marque la transformation polymorphe du fer [2].

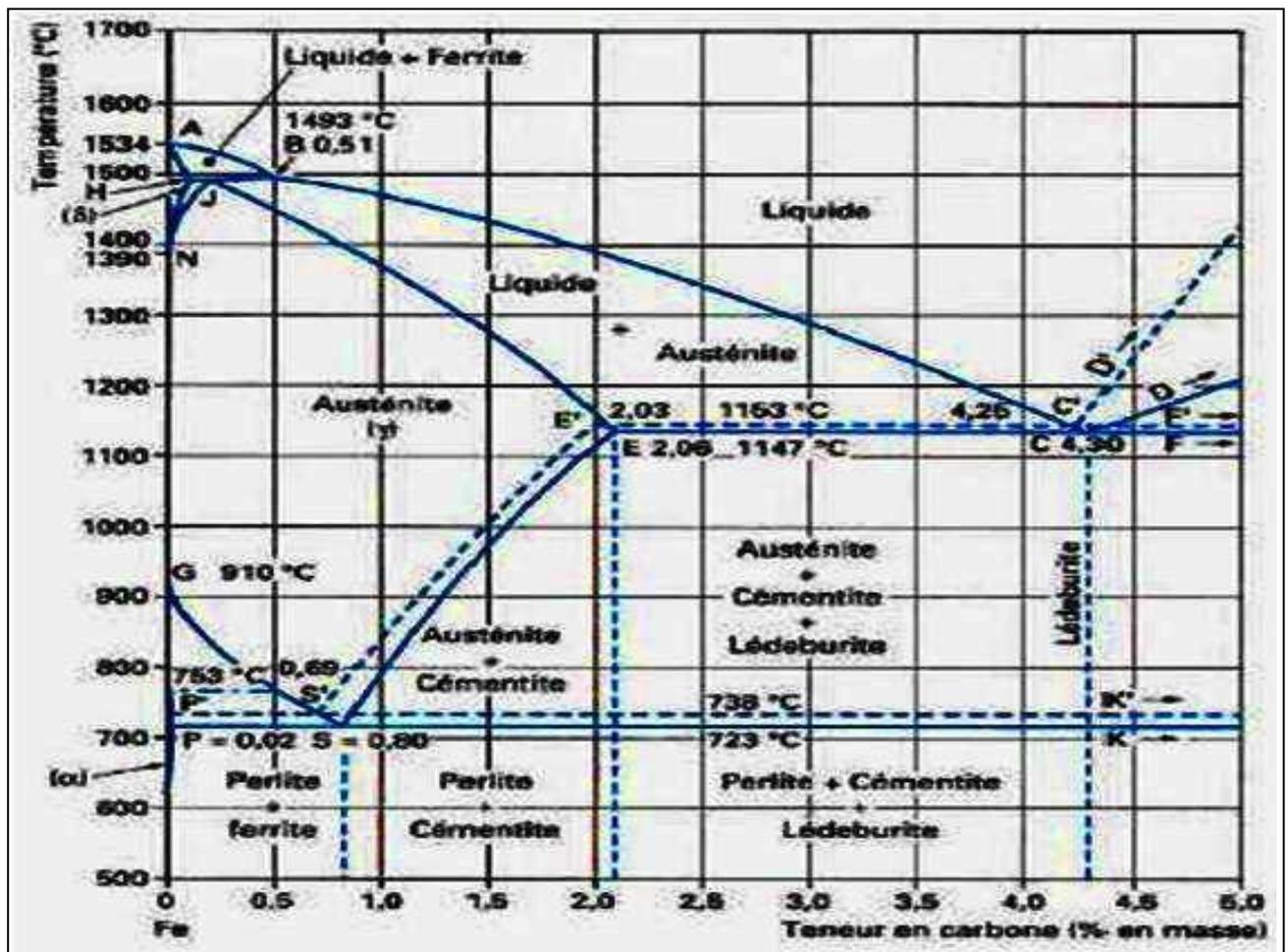


Figure II.1: Diagramme métastable [2].

II.2.2. Diagramme d'équilibre Fer-Graphite :

La formation d'une phase stable de graphite dans la fonte peut se produire soit par précipitation immédiate du graphite à partir de la solution liquide (ou solide), soit par la décomposition de la cémentite déjà formée [2].

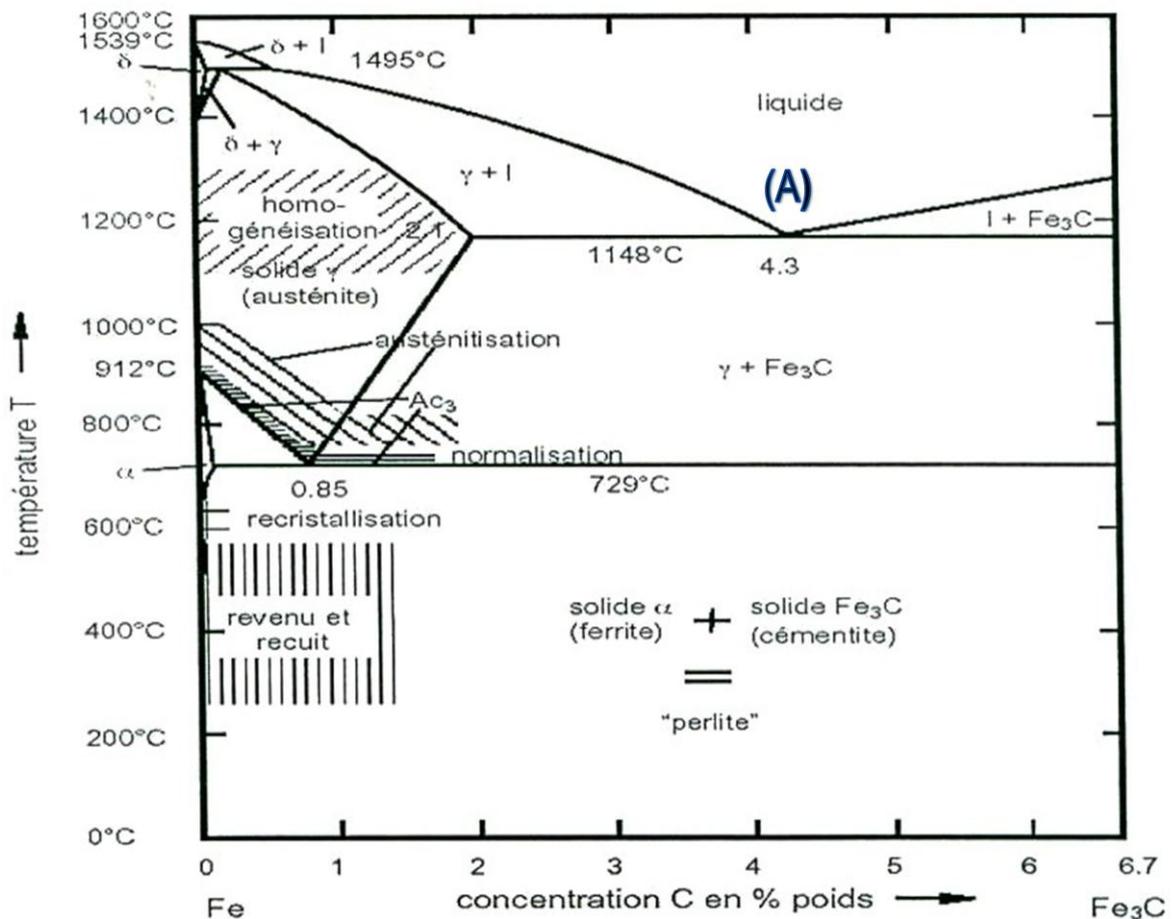


Figure II.2: Diagramme d'équilibre Fe-C-Si à 2% de silicium [2].

En effet, le carbure de fer Fe₃C, appelé **cémentite**, se forme spontanément lors du refroidissement des mélanges fer – carbone dans les conditions habituelles; mais il n'est que métastable et a tendance à se décomposer en fer et graphite (Fe₃C → 3 Fe + C) avec une cinétique activée par la température. Les refroidissements très lents pourront donc être décrits

par le diagramme Fe – C (au moins dans le domaine des températures supérieures à 800 °C) et les refroidissements rapides par le diagramme Fe – Fe₃C.

En outre, certains éléments d'addition **graphitisants** activent la décomposition de la cémentite (Si, P, Al, Ni, Cu, Ti, Zr...) et permettent d'imposer une évolution dans le diagramme Fe – C; d'autres, dits **antigraphitisants** ou **carburigènes**, stabilisent la cémentite ou des carbures mixtes analogues (Mn, Cr, Mo, S, V, W, B, Se, Te...) et conduisent aux phases du diagramme Fe – Fe₃C [3].

II.3. Généralités sur les fontes :

II.3.1. Définition métallurgique d'une fonte :

Une fonte, qu'elle soit produite dans une usine sidérurgique pour être transformée en acier ou qu'elle soit élaborée dans une fonderie, afin de couler des pièces dans des moules, peut se définir comme un alliage à **base de fer et de carbone**, dont la teneur en carbone est suffisante pour que la fusion et la solidification se produisent dans un intervalle de température nettement plus bas que le point de fusion du fer et relativement étroit, soit généralement entre 1100 et 1350 °C [2].

II.3.2. Différents types de carbone qui se trouve dans les fontes :

- a) **Carbone total (Ct)** : quantité totale de carbone contenue dans la fonte, sous quelque forme qu'il soit. Ces quantités s'expriment presque toujours sous forme de pourcentage en poids.

$$Ct = C \text{ lié} + C \text{ graphitique} = C \text{ lié (dans Fe}_3\text{C)} + 0,3(\text{Si}+\text{P}).$$

- b) **Carbone graphitique (Cgr)** : pourcentage de carbone pur cristallisé dans le système hexagonal, on en parle seulement lorsque la totalité du carbure ne se présente pas sous cette forme dans la fonte. C'est un constituant très tendre et très friable n'ayant aucune cohésion [1].

$$C \text{ graphitique} = 0,3(\text{Si}+\text{P}).$$

c) **Carbone équivalent (Ceq)** : on le calcule en utilisant la formule suivante :

$$C_{\text{eq}} = C + \frac{(\text{Si}+\text{P})}{3}$$

d) **Eutectique** : se situe à 3,9% de C pour les fontes grises et à 4.25% de C pour les fontes blanches. Dans le cas d'une fonte alliée on se sert de l'indice de saturation du carbone **Sc** (figure 1) [1].

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

$$D = 4,25 \text{ ou } 3,9 - (0,31 \text{ Si}) - (0,25 \text{ P}) + 0,07 (\text{Mn} - 2\text{S}) - (0,14 \text{ Cr}) - (0,11 \text{ Ni}) -$$

$$(0,16 \text{ Al}) - (0,4 \text{ Mo})$$

Si **Sc** = 1 : Fonte eutectique

Si **Sc** > 1 : Fonte hypo-eutectique.

Si **Sc** < 1 : Fonte hyper-eutectique.

II.3.3. Composition chimique :

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 [1].

La tendance à former du graphite dépend donc de la composition et de la vitesse de refroidissement. Une concentration en silicium supérieur à environ 1%_m et une faible vitesse de refroidissement durant la solidification favorisent la formation de graphite. Le carbone existe sous forme de graphite dans la plupart des fontes, auquel cas sa microstructure et son comportement mécanique sont liés à la composition et au traitement thermique subi.

Les fontes grises, nodulaires, blanches et malléables constituent les plus répandues [4].

II.3.4. Type des fontes :

II.3.4.1. Fontes blanches :

Les fontes blanches, ainsi nommées en raison de l'aspect de leur cassure, sont caractérisées par l'absence complète du graphite car le carbone, en excès-par rapport à sa solubilité maximale dans l'austénite est combiné au fer sous forme de carbures métastables. Les carbures à base de fer ont des propriétés physiques très différentes de celle du graphite et, en particulier, leur dureté élevée augmente beaucoup celle de la fonte dont ils constituent une fraction volumique importante. Ainsi les fontes blanches, dures mais malheureusement plus ou moins fragiles, conviennent excellentement pour résister à l'usure abrasive ; en conséquence, il est très difficile, sinon impossible, de les usiner à l'aide d'outils coupants.

Pour la plupart des applications modernes –éléments de broyeurs, par exemple -, les fontes blanches sont encore durcies par l’ajout d’éléments d’alliage (nickel, chrome, molybdène, vanadium, tungstène) avec une certaine amélioration de la ténacité aux chocs.

Les principaux facteurs favorisant l’obtention de ces fontes sont : abaissement de la température de coulée et refroidissement rapide, teneurs en carbone et silicium relativement faible, teneur en manganèse élevée [5].



Figure II.3 : Fonte blanche hypoeutectique [6].

En général, la fonte blanche joue un rôle d’intermédiaire dans la production d’une autre fonte, la fonte malléable [4].

II.3.4.2. Fontes malléables :

Le chauffage prolongé de la fonte blanche à une température de 800°C à 900°C dans une atmosphère neutre (pour empêcher l’oxydation) décompose la cémentite et produit du graphite sous forme de grappes ou de rosettes entourées d’une matrice de ferrite ou de perlite, selon la vitesse de refroidissement. La figure II.4 présente une micrographie d’une fonte malléable ferritique. Sa microstructure ressemble à celle de la fonte nodulaire, ce qui explique sa résistance relativement élevée ainsi que sa ductilité ou sa malléabilité notable. Parmi les usages les plus courants, signalons la fabrication de bielles, d’engrenages de transmission et de boîtiers de différentiel pour l’industrie de l’automobile, de même que la mise au point de brides, de raccords de tuyauterie et de pièces de robinet pour les chemins de fer, la marine, et d’autres utilisations industrielles [4].

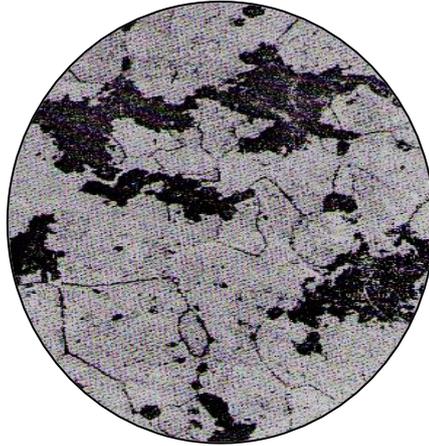


Figure II.4 : Fonte malléable à cœur noir. Graphite nodulaire déchiqueté.

Matrice ferritique. Inclusion de sulfure de manganèse x 250 [6].

a. Fontes malléables à « cœur noir »

Connues depuis une centaine d'années, ces fontes malléables « à cœur noir » – à cause du graphite –, dites parfois « américaines », ont joué un grand rôle dans le développement du machinisme agricole, de l'automobile... Mais actuellement, leur production est pratiquement abandonnée en France, d'autres pays leur réservant encore une part de marché plus importante [3].

b. Fontes malléables « à cœur blanc »

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

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

On remarquera toutefois que, parmi toutes les variétés de fontes, celles-ci que l'on nomme « malléables à cœur blanc » – ou encore malléables **européennes** – sont les seules qui soient soudables sans plus de précautions que l'acier ordinaire [7].

II.3.4.3. Fontes grises :

Elles sont caractérisées, par la présence de carbone libre disséminé dans la masse.

La structure graphitique du carbone est obtenue par un refroidissement très lent de la fonte, ou l'ajout de composants graphitisants comme le silicium [2].

a. Fontes grises lamellaires :

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 perlitique ou perlito-ferritique. Elles peuvent contenir assez de phosphore pour former un réseau de cristaux analogue à des carbures mais moins durs [8].

Leurs caractéristiques sont :

- Résistance à la traction ne dépasse guère 400 MPa, mais elles ont un meilleur comportement en compression, donc en flexion ;
- Dureté est modérée (200-280 HB);
- Facilement usinable et résistent particulièrement bien à l'usure sans grippage;
- Amortissent bien les vibrations;
- Résistent bien aux corrosions courantes et à la chaleur;
- Reçoivent couramment des revêtements protecteurs : émaillage, bleuissage.

Les principaux défauts :

- relativement fragile comparé aux aciers [5].

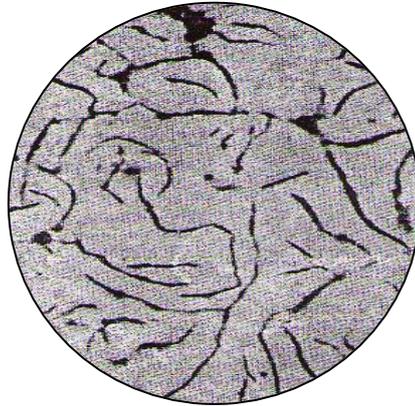


Figure II.5 : Fonte grise lamellaire sans attaque x 200 [6].

b. Fontes ductiles (ou nodulaires) :

L'ajout d'une petite quantité de magnésium ou de cérium à la fonte grise avant la coulée donne une microstructure et un ensemble de propriétés mécaniques très différentes. On retrouve encore du graphite, mais sous forme de nodules ou de particules sphéroïdales plutôt que de flocons. Il en résulte un alliage appelé fonte ductile ou nodulaire. La matrice entourant ces particules est faite de perlite ou de ferrite, selon le traitement thermique.

Dans le cas d'une pièce brute de coulée, il s'agit habituellement de perlite. Toutefois, un traitement thermique de plusieurs heures à environ 700°C donne une matrice de ferrite. Les pièces moulées sont plus résistantes et beaucoup plus ductiles que la fonte grise. En fait, les caractéristiques mécaniques de la fonte ductile se rapprochent de celles de l'acier. Les fontes ductiles ferritiques, par exemple, ont une résistance à la traction variant de 380 MPa à 480 MPa et un allongement à la rupture compris entre 10% et 20%.

Parmi les utilisations les plus fréquentes de ce matériau, mentionnons la fabrication de robinets, de corps de pompe, de vilebrequins, d'engrenages ainsi que d'autres pièces d'automobile et de machine [4].

II.3.4.4. Fontes truitées :

Les fontes truitées dont la cassure présente à la fois des zones grises et d'autres zones blanches, chacune de ces zones étant respectivement formée des constituants caractérisés précédemment dans les fontes grises et les fontes blanches.

Lorsqu'on examine au microscope, on constate que les portions grises dans lesquelles le graphite est présent, sont disséminées dans une matrice de perlite et de cémentite.

L'aspect particulier de la cassure : Taches ponctuées grise sur fond blanc, par analogie avec celui que présente la peau de la truite, a inspiré l'appellation des fontes ayant une telle structure << fontes truitées >>. Suivant que les plages de graphite sont nombreuses ou non, les fontes de ce type sont dites << truitées grise ou truitées blanches >> [9].

II.3.4.5. 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** (teneur de quelques dixièmes ou quelques pour-cent) en nickel, chrome, cuivre, étain, molybdène, titane..., ne modifiant pas la structure mais rendant seulement la matrice plus fine, plus homogène, plus sensible aux traitements thermiques. Tel est le cas des fontes à graphite lamellaire, sphéroïdal ou vermiculaire et même les fontes blanches ; les possibilités sont au contraire fort restreintes dans le cas des fontes malléables (les éléments carburigènes étant évidemment exclus) ;
- les **fontes grises, GS ou blanches fortement alliées** (jusqu'à 40 % de métaux divers) dont la structure et les propriétés sont profondément influencées par la composition : fontes austénitiques au nickel (cuivre) chrome, fontes ferritiques à haute teneur en silicium ou en aluminium.

La coulée de pièces en fontes fortement alliées peut présenter des difficultés d'ordre métallurgique ou dues à des propriétés de fonderie défavorables ; c'est en principe la

spécialité d'un petit nombre de fonderies qui n'en produisent le plus souvent que quelques nuances.

Pour certaines pièces, fortement sollicitées par la corrosion, la chaleur, l'abrasion..., les fontes spéciales sont seules envisageables malgré leur coût beaucoup plus élevé que celui des fontes courantes [7].

II.3.5. Caractéristiques des constituants de base des fontes moulées :

Il est donc essentiel, afin de pouvoir donner aux pièces moulées, en fonte, la constitution qui convient le mieux à leurs conditions d'emploi, de savoir quelle est l'action possible sur la fonte, de chacun des constituants de base, et, partant de bien connaître les caractéristiques de ceux-ci [5].

Ces constituants de base sont : la ferrite, la cémentite, la perlite, le graphite.

FERRITE

C'est de fer à l'état allotropique α , dans lequel peut se trouver en solution solide, des quantités relativement importantes de silicium (jusqu'à 15%), du phosphore, du nickel (jusqu'à 6%), etc. elle est magnétique. Sa dureté est faible ($H_B = 80$ environ). Sa résistance à la rupture par traction voisine de 30 daN/mm^2 , et sa grande ductilité (a voisin de 50%), lui confère des grandes qualités de non fragilité et de malléabilité. Elle est facile à usiner à l'outil coupant. Sa couleur est celle du fer. Sa densité est voisine de 8 [10].

CEMENTITE

C'est un carbure de fer (de formule Fe_3C) contenant 6,66% de carbone. Sa dureté très élevées (correspondant à $H_B = 800$ à 1000) en interdit, pour l'usinage, l'utilisation d'outils coupants et impose l'emploi de la meule. Elle est magnétique jusqu'à 212°C . Sa couleur est blanche d'aspect brillant.

Elle peut se décomposer en fer et graphite si les conditions de températures et de durée de maintien à celles-ci sont respectées [4].

PERLITE

C'est un agrégat se présentant sous l'aspect de paquets formés de lamelles alternées (sensiblement parallèles) de ferrite et de cémentite. Ces lamelles sont extrêmement minces, celles de cémentite surtout. La perlite est d'autant plus fine (lamelles d'autant plus minces) que sa formation a eu lieu plus rapidement. Elle présente des caractéristiques mécaniques dont les valeurs sont comprises entre celles de ses deux constituants ; dureté Brinell $H_B = 200$ à 300 , résistance à la traction : 80 daN/mm^2 environ, allongement de l'ordre de 8% à 10% .

La perlite, malgré la présence de cémentite, constituant pourtant extrêmement dur et inattaquable par les outils coupants, est facilement usinée avec ceux-ci. Cela est dû à la structure en lamelles alternées de ferrite et de cémentite et à la finesse des lamelles de cémentite, lesquelles, sous l'action de l'outil ne sont pas coupées, mais cassées [7].

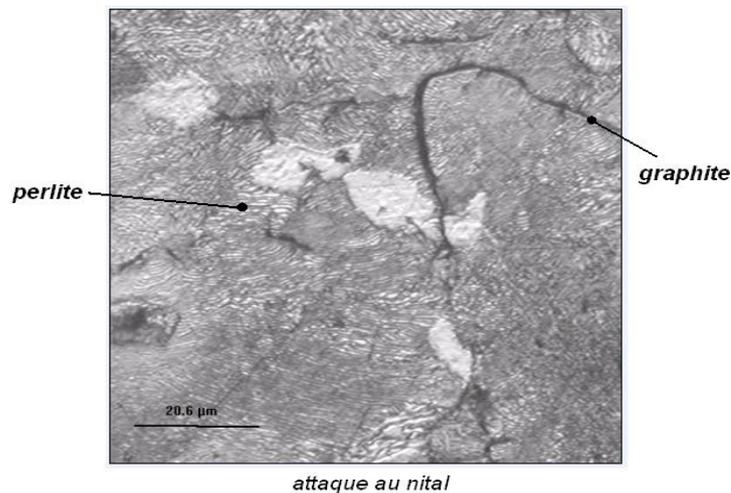


Figure II.6 : Microstructure des constituants perlitiques [11].

AUSTENITE

L'austénite est une solution solide de carbone dans le fer γ , qui peut dissoudre de 0.85% de carbone à 735 °C à 1.7% de carbone à 1130 °C. Cette phase n'est pas stable en dessous de 735°C. En effet, c'est à cette température que se produit le changement de variété allotropique du fer [6].

Le fer γ se transforme en fer α avec un rejet de carbone sous différentes formes :

- Rejet de graphite si le refroidissement est suffisamment lent ;
- Rejet de cémentite si le refroidissement est rapide.

Les deux transformations énoncées ci-dessus sont les plus couramment observées au cours du refroidissement d'une pièce dans un moule (sable, métallique...) en fonderie [2].

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, ce corps peut exister à température ambiante dans les fontes austénitiques au nickel et dans les fontes trempées à austénite résiduelle. C'est, dans ce cas, un corps un peu fragile, ductile. Il est oxydé par tous les réactifs acides [10].

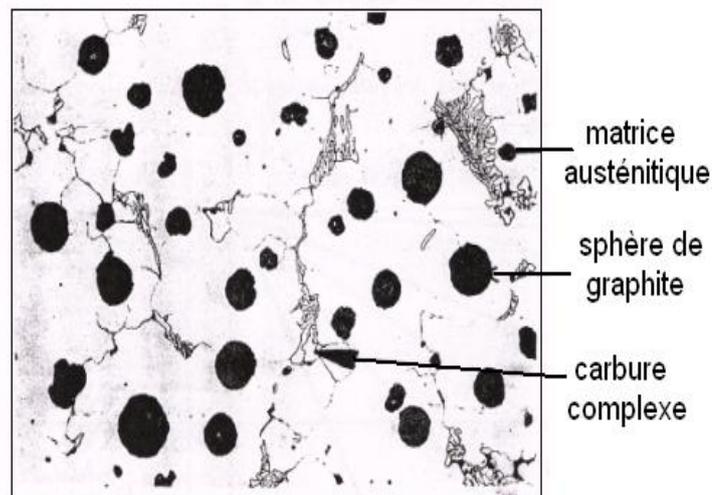


Figure II.7 : Microstructure d'une fonte austénitique [11].

LEDEBURITE

La Lédéburite est un mélange hétérogène d'austénite et de cémentite obtenu à l'eutectique (4.3% de carbone et à 1147°C). A l'ambiante, après transformation, la Lédéburite s'appelle Lédéburite transformée car elle conserve sa structure mais l'austénite se transforme en perlite. [9]

BAINITE

C'est un produit de décomposition de l'austénite entre la perlite et la martensite. Pour l'obtenir il faut une vitesse de refroidissement suffisamment grande pour ne pas obtenir de la perlite entre 750 °C et 500 °C suivi d'un maintien isotherme entre 500 °C et 250 °C. En fonction de la température de refroidissement, deux types de Bainite sont mises en évidence: la bainite supérieure et la bainite inférieure [3].

Bainite supérieure :

La bainite supérieure est un corps très dur (400 à 450 HB), qui résulte d'un maintien aux environs de 450 °C. Sa morphologie est présentée sur la figure II.8 [11].

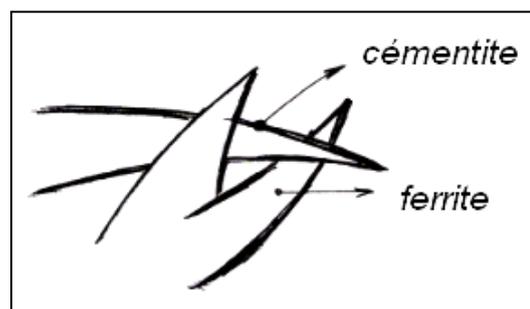


Figure II.8 : Morphologie de la bainite supérieure [11].

Bainite inférieure :

Elle résulte d'un maintien isotherme à des températures plus basses (300 °C). Le cisaillement du réseau est alors plus important et la structure est plus fine la rend encore plus dure (de l'ordre de 600 HB) [11].

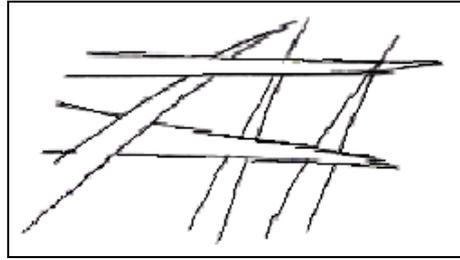


Figure II.9 : Morphologie de la bainite inférieure [11].

MARTENSITE

C'est une ferrite sursaturée en carbone produite quand l'austénite, au dessous de 200°C, se décompose brusquement. Il s'agit d'une transformation presque instantanée avec un bruit caractéristique dû à l'augmentation de volume.

Alors que rien ne s'était passé depuis 750 °C, brusquement, le fer γ se transforme en fer α . Dans ce réseau α qui ne dissout pas le carbone, celui-ci ne peut pas migrer et reste emprisonné dans les mailles de fer α . C'est un constituant très dur (HB= 700) et de structure en aiguille. Peu colorée par les réactifs habituels, elle devient brun clair après une longue attaque aux réactifs acides [9].

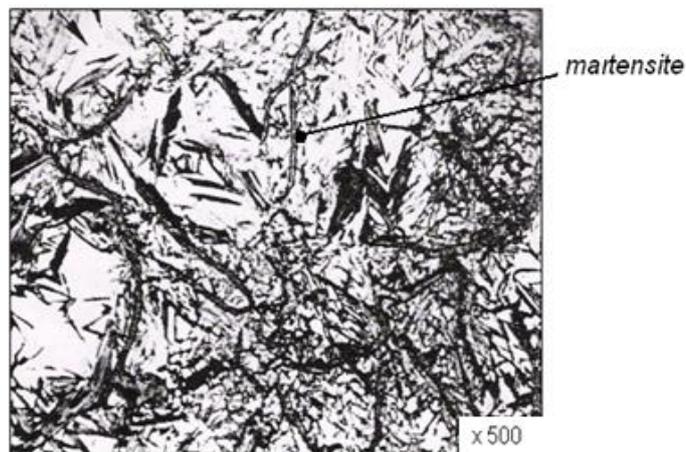


Figure II.10 : Morphologie de la martensite [11].

SORBITE

Agrégat très fin identique à la perlite du point de vue constitution. C'est une perlite très fine seulement résoluble au microscope de teinte plus foncée que la perlite. Elle est obtenue par un traitement thermique de fontes ordinaires (trempe+revenu) ou avec des fontes alliées [2].

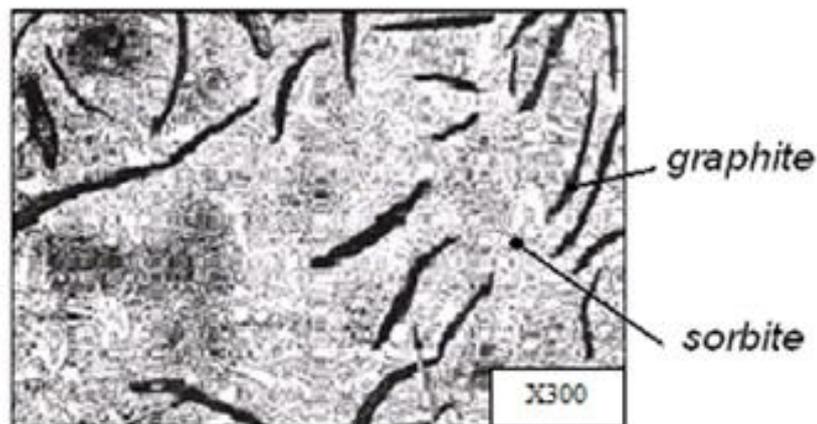


Figure II.11: Morphologie de la sorbite [11].

GRAPHITE

C'est du carbone cristallisé, de couleur, noire. Sa densité est faible (de l'ordre de 2,2). Tendre et de faible résistance mécanique à la traction (2 daN/mm^2), le graphite s'effrite sous l'action de l'outil coupant, et il possède d'excellentes qualités lubrifiantes, (il facilite donc grandement l'usinage des fontes dans lesquelles il est présent) [4].

Dans les fontes courantes, le graphite est plus ou moins ramifié, plus ou moins fin, plus ou moins abondant en fonction de divers facteurs. Il résulte d'une influence importante sur l'effet d'entaille dans la matrice et par conséquent sur les propriétés physiques et mécaniques.

Le graphite est un constituant très affaiblissant du point de vue des caractéristiques mécaniques des fontes grises. Il joue en effet le même rôle que des microfissures qui, lors d'un chargement entraînent une concentration de contraintes.

Le carbone sous forme de graphite occupant, à masse égale, un volume plus grand que lorsqu'il est sous la forme combinée, la formation du graphite dans la fonte, s'accompagne d'une expansion, et, les fontes moulées dans lesquelles il y a du graphite ont un retrait beaucoup plus faible que celles qui n'en contiennent pas (8 à 10‰ au lieu de 18 à 22 ‰). Selon les conditions dans lesquelles il prend naissance dans les fontes, le graphite se présente dans celles-ci sous les divers aspects suivants : [7]

II.4. Types de graphite :

II.4.1. Graphite non sphéroïdal:

Lorsqu'une fonte hypoeutectique n'a pas reçu les additions qui conduisent au graphite sphéroïdal, la solidification y fait d'abord apparaître des dendrites d'austénite, entre lesquelles le liquide mère vient ensuite former des cellules d'eutectique en étale la solidification sur un intervalle notable. C'est la période, ou, dans la partie déjà solidifiée des cellules, la décomposition de Fe_3C est la plus active, cette décomposition donne naissance à du graphite, qui se présente sous deux formes principales à savoir le graphite punctiforme et lamellaire [12].

II.4.1.1. Graphite punctiforme :

Correspond à un retard à l'amorçage de la décomposition de Fe_3C (on l'appelle aussi graphite de surfusion, parce que c'est lui qui se forme de préférence en cas de surfusion notable de l'alliage).

II.4.1.2. Graphite dit : en paillettes ou lamellaire :

C'est celui qui se forme dans la plupart des fontes moulées normales et dans de nombreux cas de fontes moulées alliées.

Les fontes moulées dans lesquelles il y a du graphite en paillette sont dites <<fontes lamellaires>>.

Le graphite lamellaire peut se présenter sous divers aspects dont l'allure dépend de la composition de la fonte et des conditions de refroidissement de celle-ci. On distingue 5 types principaux de graphite lamellaire (figure II.12) : [13]

-Type A : graphite en lamelles de distribution uniforme et d'orientation désordonnée ;

-Type B : graphite en rosettes, d'orientation désordonnées;

-Type C : graphite en lamelles de tailles diverses;

-Type D : graphite interdendritique d'orientation désordonnées;

-Type E : graphite interdendritique d'orientation privilégiée.

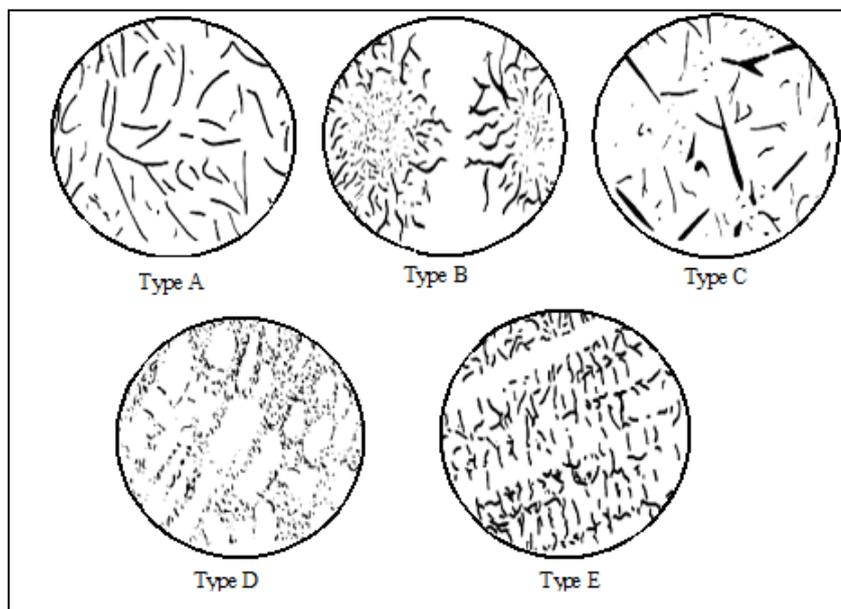
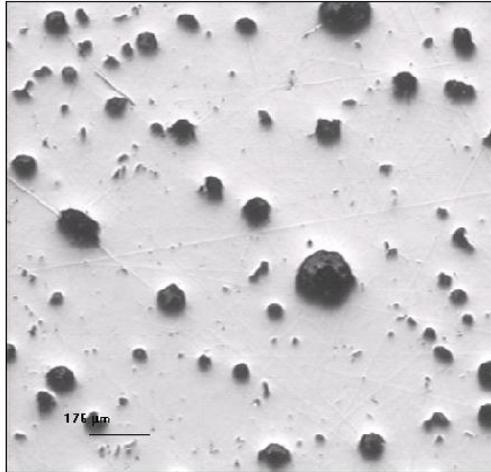


Figure II.12 : Représentation des différents types de graphite dans les fontes grises lamellaires [13].

II.4.2. Graphite sphéroïdal :

Cette forme de graphite s'obtient par un traitement spécial du métal à l'état liquide par des composés à base de magnésium [12].



sans attaque

Figure II.13 : Forme du graphite sphéroïdal [11].

CHAPITRE III :

Fonte grise lamellaire FGL

III.1. Caractéristiques des fontes GL :

C'est la plus courante des fontes grises. Le graphite s'y trouve sous forme de lamelles.

Les principales qualités des fontes GL sont :

- Facilité d'usinage ;
- Très bonne absorption des vibrations ;
- Stabilité dimensionnelle (réalisation de machine à outil silencieuse et stable géométriquement) ;
- Excellente coulabilité ;
- Prix du métal peu élevé [5].

Les principaux défauts sont :

- Relativement fragile comparé aux aciers ;
- Soudabilité médiocre [10].

Les principales utilisations sont :

- Toutes pièces mécaniques (différents grades de résistance).
- Bâtis de machines outils, bonne résistance aux vibrations.
- Tuyaux et canalisation (il est possible de couler des tubes de grande taille via le coulage par centrifugation).
- Blocs moteurs d'automobiles de tracteurs et de camions.
- Tambours de frein d'automobiles.
- Disques d'embrayage d'automobiles [2].

III.2. Désignation normalisée :

La définition des nuances de fontes non-alliées repose sur leurs caractéristiques en traction.

Ainsi la norme européenne EN 1561 caractérise les nuances de fontes non-alliées à graphite lamellaire :

- le préfixe EN-GJ, indiquant qu'il s'agit d'une fonte ;
- la famille de fonte :
 - L : fonte à graphite lamellaire (fonte grise),
- la résistance à la rupture R_m , en MPa ;

L'ancienne norme française NF A 02-001 indiquait :

- la nature de la fonte :
 - FGL : fonte à graphite lamellaire, ou fonte grise à graphite lamellaire,
- résistance à la rupture R_m en MPa ;

P. ex. : EN-GJL-250 (anciennement FGL 250) : fonte à graphite lamellaire de résistance à la rupture $R_m = 250$ MPa [14].

Tableau III.1: liste des fontes non-alliées à graphite lamellaire selon les normes européennes en vigueur [14].

Types de fontes	Normes	Nuances	Résistance à la traction(MPa)	Allongement %
Fontes à graphite lamellaire	EN 1561	EN-GJL-100	100-200	----
		EN-GJL- 150	150-250	----
		EN-GJL- 200	200-300	----
		EN-GJL- 250	250-350	----
		EN-GJL- 300	300-400	----
		EN-GJL- 350	350-400	----

III.3. Caractéristiques mécaniques fondamentales des fontes GL :

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

- la résistance à la traction, base de la normalisation des qualités de fontes grises non alliées ;
- la dureté ;
- le module d'élasticité [13].

a. 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 %).

En effet, au-delà des propriétés de traction, il faut savoir que les fontes à graphite lamellaire peuvent présenter d'autres caractéristiques mécaniques intéressantes [8].

b. Dureté :

La dureté est la caractéristique qui est mesurée le plus couramment car la mesure est faite au moyen d'un essai simple, et la plupart des propriétés intéressantes de la fonte sont en relation directe avec cette propriété. Ainsi, la résistance à la compression présente une très bonne corrélation avec la dureté. Une relation entre les valeurs de la résistance à la traction et de la dureté des fontes à graphite lamellaire est représentée à la figure (). La dureté des fontes non alliées à graphite lamellaire varie dans des proportions très importantes en fonction de la structure :

— fontes *grises* perlitiques : 170 à 270 HB suivant la finesse de la perlite ; (cas de la fonte FT25) ;

— fontes *grises* ferritiques : 100 à 150 HB ;

— fontes *grises martensitiques* : 400 à 500 HB [14].

c. Elasticité :

Le rapport entre la contrainte appliquée et la déformation qui en résulte est appelée <<module d'élasticité>>. Pour les fontes à graphite lamellaire, ce rapport n'est pas constant. Les nuances qui ont un module relativement élevé sont souhaitables pour les structures où la rigidité joue un rôle important. Au contraire, une fonte de module plus faible sera souhaitable pour l'amortissement des vibrations [12].

d. Capacité d'amortissement des vibrations :

La capacité d'amortissement exceptionnellement élevée des fontes à graphite lamellaire est l'une des qualités les plus précieuses de ces matériaux ; c'est la raison pour laquelle elles conviennent de façon idéale pour les bâtis et les supports de machines, les blocs-moteur des moteurs à combustion interne et les pièces de frein. Ce comportement est attribué à la forme lamellaire du graphite [14].

e. Résistance à la compression :

Par ailleurs, les lamelles de graphite présentes dans la fonte grise à graphite lamellaire ont beaucoup moins d'influence sur ses caractéristiques en compression que sur ses caractéristiques en traction. Ainsi, la valeur de la résistance à la compression de la fonte grise est trois à quatre fois plus élevée que sa valeur de résistance à la traction [13].

f. Résistance à la torsion :

La résistance à la torsion des fontes à graphite lamellaire est supérieure d'environ 25%, voir 40%, à leur résistance à la traction. Cette résistance à la torsion relativement élevée en fait un matériau de choix pour toute pièce de type arbre de transmission par exemple.

On donne dans le tableau III.2 quelques caractéristiques mécaniques des fontes grises à graphite lamellaire non alliées [14].

Tableau III.2 : Principales caractéristiques des nuances de fontes à graphite lamellaire [14].

caractéristiques	Désignation du matériau				
	EN-GJL-150	EN-GJL-200	EN-GJL-250	EN-GJL-300	EN-GJL-350
	Structure de base				
	Ferritique/perlitique	perlitique			
Résistance à la traction (MPa)	150 à 250	200 à 300	250 à 350	300 à 400	350 à 450
Résistance à la compression (MPa)	600	720	840	960	1080
Résistance à la torsion (MPa)	170	230	290	345	400
Résistance à la fatigue par flexion (MPa)	70	90	120	140	145

g. La tenue aux chocs :

La tenue au choc des fontes à graphite lamellaire est souvent inférieure à celle des autres matériaux ferreux moulés.

Les lamelles de graphite suffisent à créer dans la matrice des fontes grises un effet d'entaille important c'est pourquoi la norme NF A 03-202 (novembre 1967) définit un essai du type Charpy sur éprouvettes non entaillées [12].

Tableau III.3 : Résistance au choc KG, selon la norme NF A 03-202, de trois fontes grises à graphite lamellaire [14].

Qualité	Composition (%)					R_m (Mpa)	KG (J)
	C	Si	Mn	S	P		
FGL 150	3,58	2,39	0,57	0,04	0,10	174	14,6
FGL 250	3,24	2,07	0,60	0,10	0,30	263	17,2
FGL 400	2,73	1,71	0,30	0,09	0,10	398	32,6

III.4. ELABORATION :

La production exige donc des matières premières rigoureusement choisies : fontes neuves spéciales ou chutes d'acier très pures, et des équipements de fabrication et de contrôle appropriés. Les appareils de fusion classiques peuvent être utilisés dans la mesure où le métal est homogène, de composition requise et à une température suffisante pour les opérations métallurgiques et de coulée [2].

III.4.1. Constitution des charges métalliques :

La charge métallique peut être constituée par les mêmes matières neuves ou de récupération disponibles sur le parc de production ou sur le marché mais, pour des raisons techniques et économiques, dans des proportions fort diverses (de 0 à 100 % dans les cas extrêmes) [15].

a. Fontes neuves de moulage :

Les fontes neuves de moulage sont des fontes brutes (n'ayant pas subi de transformation) qui proviennent de l'industrie sidérurgique sous forme de lingots (ou *gueuses*) de 10 à 20 kg, livrés en lots homogènes.

La composition chimique de chaque lot est déterminée par référence à une classification, aux spécifications du fournisseur (et éventuellement du fondeur) et à une analyse chimique de référence résultant de prélèvements et de dosages effectués suivant des méthodes bien définies, voire normalisées [7].

En outre, ces fontes proviennent de procédés divers (coulée directe de haut-fourneau, affinage et ajustement au four électrique, combinaison avec l'élaboration d'autres produits, etc.), ce qui fait varier très largement non seulement leur composition chimique nominale mais leur degré de pureté et, plus généralement, leur *qualité métallurgique* [15].

Pour la fonte FT 25, on utilise une charge en fonte neuve <<HEMATITE>>, dont la composition chimique est indiquée dans le tableau suivant :

Tableau III.4 : composition chimique de la charge en hématite [7].

Eléments chimiques	Fonte neuve <<hématite>>
Carbone	3,5% à 4,3%
Silicium	2% à 2,8%
Manganèse	0,7 % à 1 %
Soufre	≤ 0,01 %
Phosphore	≤ 0,01 %
Cr, Mo, Ni, Va, W, Al, Pb	Traces (PPM)
Forme et poids de la gueuse	10 à 15 Kg

b. Ferrailles d'acier :

Les déchets d'acier triés en vue de leur refusion (ribbons) constituent – malgré la nécessité d'en assurer la *recarburation* contrôlée au cours de l'élaboration des fontes – une part relativement peu coûteuse du lit de fusion en fonderie. Les lots correspondants se caractérisent par leur composition chimique moyenne, par leur état de division (ferrailles minces ou lourdes, copeaux...), par leur propreté et par leur présentation (en paquets, en vrac...). Mais un premier principe est de distinguer surtout les **chutes neuves** de fabrication (laminage, estampage, voire copeaux d'usinage) d'origine précise garantissant une qualité très régulière (même si elle n'est pas la mieux adaptée aux besoins) et les **ferrailles de récupération** provenant du négoce après tri plus ou moins sommaire [16].

c. Vieilles fontes : retours et bocages :

Une règle classique élémentaire impose à chaque unité de fabrication de refondre ses propres **retours** , car il s'agit de matières dont la composition est proche de celle des pièces moulées à produire. En pratique, ces retours sont constitués par les *jets de coulée*, c'est-à-dire les systèmes de remplissage et de masselottage détachés des pièces au cours du décochage, et par les *rebuts* ou *caffûts* , c'est-à-dire les pièces rejetées pour non-conformité aux différents stades du contrôle [7].

III.4.2. Ajustement de la composition chimique :

III.4.2.1. Eléments d'addition, Ferro-alliages :

Les **ferro-alliages** et les **métaux ou corps divers** plus ou moins purs servent à ajuster la composition chimique des fontes non alliées ou alliées. On les introduit comme composants des charges solides sous forme de morceaux, de demi-produits ou de briquettes. Une proportion limitée des métaux et alliages (suffisamment lourds pour ne pas flotter) peut être ajoutée simplement au métal de base, dans le four en fin de fusion ou même dans les poches de maintien ou de coulée [2].

III.4.2.2. Inoculation graphitisante :

Définition et principes de l'inoculation des fontes :

L'inoculation des fontes a été inventée en 1924 (par Meehan) pour mieux contrôler la solidification et la structure du graphite des **fontes grises à graphite lamellaire** ;

On cherche la plupart du temps à éviter le graphite de *surfusion* [type D de la norme NF EN ISO 940 (indice de classement A 32-100)].

Le principe est de mélanger vivement au métal liquide, peu de temps avant la coulée, une quantité minimale d'une substance qui, sans action déterminante sur la composition chimique globale, réduit la surfusion et provoque ainsi la formation complète de graphite lamellaire (types A, B ou E) dans les mêmes conditions où, sans inoculation, apparaîtraient du graphite D et même des carbures [15].

Les substances appropriées dites **agents d'inoculation** ou **inoculants** sont soit des **ferro-alliages**, soit des **mélanges complexes** où les **alcalino-terreux**, le graphite et les terres rares jouent un rôle très important ; en revanche, le silicium et l'aluminium ne contribuent pas nettement – en tout cas, pas seuls – au mécanisme spécifique de l'inoculation.

L'atelier de fusion commence par chargé le four à arc électrique avec de la fonte et des ferrailles, après la fusion, le liquide est transféré vers les fours de maintien, une analyse chimique permet de montrer les écarts des taux par rapports aux normes et de faire les additions nécessaires, on verse le contenu au fur et à mesure du temps de la coulée dans des poches de coulée, le métal étant prêt et à la bonne température, il est coulée dans les moules préparés pour obtenir les formes et les pièces voulus [16].

III.5. étude du refroidissement d'une fonte hypoeutectique

(Système stable), cas de la fonte Ft25 :

L'alliage est pris à 1 400 °C, le point figuratif étant en m_0 (figure III.1). À 1 300 °C, début de solidification en m_1 sous forme de dendrites de solution solide γ ; à 1153 °C (au point m'_2) l'eutectique se solidifie en agrégat de lamelles de graphite dit *eutectique* dans une solution solide γ à 2 % C.

L'alliage solidifié comprend à ce moment :

- des dendrites de solution solide γ à 2 % C ;
- du graphite en lamelles qui se dépose dans la solution solide γ de l'eutectique.

Le passage d'un diagramme à l'autre peut se faire en un point quelconque situé sur $E'S'$.

Si le passage se fait en S_1 , sur la verticale de S , il y aura dépôt de graphite de E' à S_1 ; partant de S_1 , le refroidissement amènera l'alliage directement en S avec formation de l'eutectoïde perlite (sans ferrite ou cémentite proeutectoïde).

À ce moment la structure finale de la fonte à 3 % C comprend :

- perlite (correspondant à un acier eutectoïde à 0,8 % C) ;
- graphites eutectique et proeutectoïde.

Une telle fonte est dite *perlitique* alors que les précédentes sont dites respectivement à *ferrite* à gauche de la ligne S_1S , et à *cémentite* à droite de cette même ligne [13].

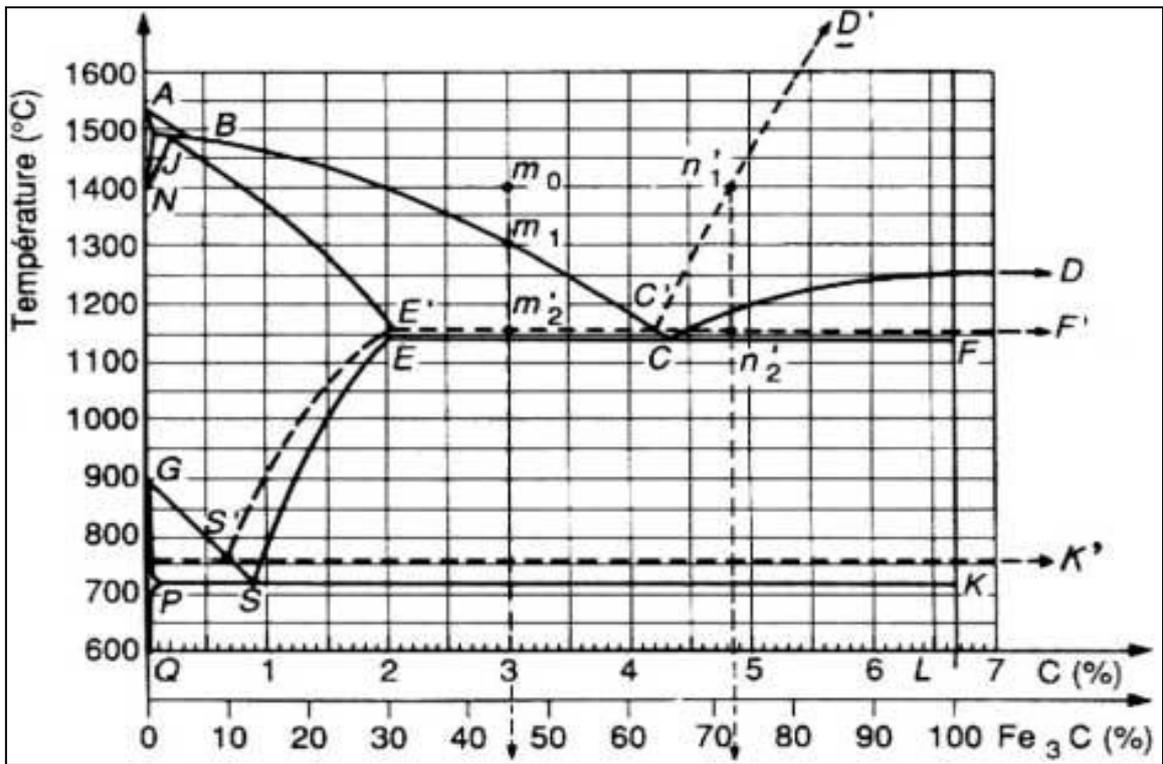


Figure III.1 :Diagrammes métastable et stable superposés [13].

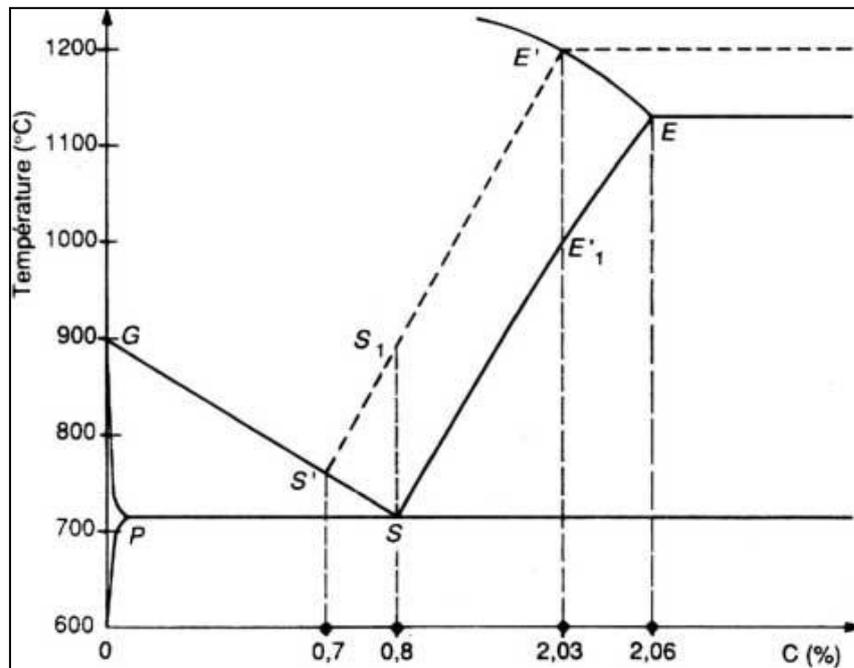


Figure III.2 : Transformations à l'état solide d'une fonte grise [13].

III.6. Influence des éléments normaux sur la fonte GL :

Carbone

On le trouve sous forme de graphite et combiné au fer. On a remarqué que l'augmentation du carbone graphitique se fait plus rapidement que celle du carbone total.

C'est pour cette raison que l'on peut dire que le carbone est un élément graphitisant [10].

Le carbone graphitique est un élément faible sans aucune propriété mécanique. Par "effet d'entaille", les lamelles de graphite nuisent aux caractéristiques mécaniques de la fonte et en particulier à sa résistance à la traction ; L'effet d'entaille est d'autant plus important que les lamelles de graphites sont grossières. Par contre, la présence de carbone graphitique facilite l'usinage des pièces et améliore leurs qualités de frottement en agissant comme un lubrifiant. Il donne à la fonte une grande capacité d'amortissement des vibrations, ce qui améliore grandement les conditions de travail des machines outil [3].

Silicium

Le silicium se rencontre dans les fontes ordinaires sous des teneurs qui peuvent atteindre 3,5%, mais ne dépassent guère ce chiffre, pour lequel il se trouve encore à l'état dissous dans la ferrite. Le silicium exerce, dans la fonte, un rôle graphitisant. Le silicium est un élément de graphitisation de base dans les fontes. Il abaisse la température du liquidus et élève celle du solidus, donc il diminue l'intervalle de solidification. Une augmentation de la teneur en silicium a tendance à augmenter la fraction ferritique de la structure donc à diminuer la dureté, ainsi que la résilience [10].

Manganèse

Le manganèse se rencontre dans les fontes sous des teneurs qui ne dépassent guère 2%. Nous avons vu que, pour des telles teneurs, le manganèse en excès sur la quantité nécessaire pour saturer le soufre à l'état de MnS se trouve principalement à l'état de Mn_3C , associé avec Fe_3C dans une cémentite au manganèse. Stabilisant par ce moyen la cémentite, le manganèse, contrairement au silicium, est, pour les fontes, un élément trempant, s'oppose à la graphitisation et accroît la dureté de l'alliage. Son effet antigrahitisant n'est sensible qu'à des

taux élevés. Aux taux normaux 0,5 à 0,8%, il affine la perlite, augmente la dureté et la résistance à la traction [6].

Phosphore

Sa teneur varie en pratique de 0.05 à 1.5%. A partir d'une teneur de 0.1% environ, il forme un eutectique Fe-Fe₃C-Fe₃P fondant à 983°C. Cet eutectique phosphoreux ou steadite, crée des difficultés d'usinage et peut engendrer des porosités.

Cependant le phosphore améliore beaucoup la fluidité et la coulabilité des fontes, tant que la composition n'est pas hypereutectique. Pour cette raison on emploie des fontes phosphoreuses de 0.7 à 1.2% de phosphore pour la fabrication des pièces à parois minces [1].

Soufre

C'est un élément nuisible qui diminue la coulabilité. Il stabilise les carbures et rend la fonte dure, fragile et poreuse. On combat son effet par une addition de manganèse [18].

III.7. Influence des éléments spéciaux sur la fonte GL :

Cuivre

Elément graphitisant à la solidification surtout aux basses teneurs en silicium, il contribue fortement à l'affinement de la perlite par son action gamagène. En outre le cuivre est un élément anti-feritisant. Il favorise l'obtention d'une matrice perlitique, à l'état brut de coulée.

Son introduction dans la fonte entraîne une augmentation de la résistance au choc et de la dureté. Un taux croissant de Cu permet d'obtenir :

- Une matrice ferrito — perlitique pour 0,3 à 0,5 % de Cu;
- Une matrice perlitique pour 1 % de Cu [2].

Chrome

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

- avec 1% de chrome, apparition de carbures ;
- avec 2% de chrome, la fonte devient blanche ;
- avec 12% de chrome les carbures s'affinent ;
- avec 30% de chrome la structure est une ferritique au chrome donnant une bonne résistance à la corrosion [17].

Étain

Cet élément est intéressant dans les pièces courantes de fonderie, lorsque l'on veut obtenir une matrice perlitique. Ainsi avec 0.1% de Sn seulement, on transforme une matrice ferrito-perlitique en une matrice perlitique [8].

Molybdène

Elément carburigène, il favorise la formation de structure aciculaire et affine celle -ci. Bonne action sur la résistance aux chocs. On l'associe souvent au nickel et au chrome en addition de 0.3 à 1% [6].

Nickel

Soluble dans le fer, il n'est pas carburigène. C'est un élément graphitisant, trois fois moins énergétique que le silicium. Il affine la structure et plus on en ajoute, plus il modifie celle-ci qui passe de perlite en martensite, puis en austénite [18].

CHAPITRE IV :

Techniques expérimentales

IV.1. Élaboration de la fonte Ft25 :

La fonte FT25 est obtenue dans un four à arc à la fonderie S.N.V.I de Rouïba. Le lit de fusion est composé de :

- Retour de fonderie (masselottes, pièces rebutées, les chenaux et les jets de coulées) (60%) ;
- Hématite (20%) ;
- Tôles en acier (20%).

Après la fusion, la fonte liquide est transférée dans le four de maintien, pour le dégraissage et pour l'inoculation.

Le **tableau-IV.1** nous donne les intervalles des teneurs massiques pour les éléments chimiques : C, Si, Mn, S, P, Cu et le Carbone équivalent. Ces fourchettes sont utilisées à l'UFR pour l'élaboration de la fonte Ft25.

Tableau-IV.1 : les fourchettes de la composition chimique de la fonte Ft25 utilisées à l'UFR.

Nuance	% Carbone	% Silicium	% Manganèse	% Soufre	% Phosphore	% Cuivre	% C _{éq}
Ft25	3,16-	1,60-	0,60-	≤0,10	≤0,15	0,50-	3,70-
	3,36	1,90	0,90			0,80	4,00

La fonte liquide dans le four de maintien est analysée au laboratoire d'analyse spectrale de la fonderie chaque jour, afin de connaître la teneur massique de tous les éléments de la fonte avant de remplir les moules.

IV.2. Procédé de fabrication des éprouvettes :

IV.2.1. Préparation des quantités à ajouter :

Nous avons pris, après l'analyse chimique, la composition de la fonte de four de maintien, et nous avons étudié l'influence de chaque élément, à part. Pour cela, on a augmenté la teneur massique de chaque élément étudié de 0,2%, de 0,4% et de 0,6%, en ajoutant des quantités bien connues de chaque élément dans des moules pour éprouvettes, soit sous forme de graphite, soit sous forme de ferro-silicium (dans le cas de silicium), soit sous forme de ferro-manganèse (dans le cas de manganèse), soit sous forme de fils en cuivre (dans le cas de cuivre).

Pour le carbone :

Le carbone est disponible sous forme de granules de graphite à 98% C. Pour cela on doit broyer ces granules afin d'obtenir une poudre fine en graphite.

Pour déterminer les masses de graphite qu'on doit mettre dans les moules, pour les variations de la composition chimique de la fonte de base citées ci-dessus, on a effectué le calcul suivant :

$$m = \frac{M \times t}{98} \dots \dots \dots (a)$$

Tel que :

M : la masse de quille-block égale à 10,50 Kg.

t : les variations en teneur massique du carbone, t=0,2 ; 0,4 ; 0,6.

m : la masse de graphite à ajouter pour les variations en teneur massique citées ci-dessus.

Donc :

pour t=0,2%, $m_1 = 21,42g$

pour t= 0,4%, $m_2 = 42,85g$

pour t= 0,6%, $m_3 = 64,28g$

Pour le silicium :

Sachant que le ferro-silicium, est disponible aussi sous forme de granules, contenant 80% de silicium. Nous avons effectué tout d'abord un broyage des granules, pour obtenir une poudre très fine en ferro-silicium, puis nous avons calculé les masses de ferro-silicium à ajouter dans les moules par le calcul suivant :

$$m = \frac{M \times t}{80} \dots\dots\dots (a)$$

Tel que :

M : la masse de quille-block égale à 10,50 Kg.

t : les variations en teneurs massique du silicium, t=0,2 ; 0,4 ; 0,6.

m : la masse de ferro-silicium à ajouter pour les variations en teneur massique citées ci-dessus.

Donc :

pour t=0,2%, m₁= 26,25g

pour t= 0,4%, m₂= 52,5g

pour t= 0,6%, m₃= 78,75g

Pour le manganèse :

Le ferro-manganèse disponible, se trouve aussi sous forme de granules, contenant 75% de manganèse, donc on est contraint d'effectuer un broyage pour obtenir une poudre très fine en ferro-manganèse. Nous avons déterminé les masses de ferro-manganèse à ajouter dans les moules, par le même calcul que dans le cas de silicium :

$$m = \frac{M \times t}{75} \dots\dots\dots (a)$$

pour $t=0,2\%$, $m_1= 28\text{g}$

pour $t= 0,4\%$, $m_2= 56\text{g}$

pour $t= 0,6\%$, $m_3= 84\text{g}$

Pour le cuivre :

Le cuivre est disponible sous forme de fils en cuivre à 96% de Cu.

On a déterminé par le même calcul, pour les variations citées avant, les trois masses en cuivre à ajouter dans les moules :

$$m = \frac{M \times t}{96} \dots\dots\dots (a)$$

pour $t=0,2\%$, $m_1= 21,87\text{g}$

pour $t= 0,4\%$, $m_2= 43,75\text{g}$

pour $t= 0,6\%$, $m_3= 65,62\text{g}$

Après, on a pesé toutes les masses des éléments à ajouter (c.-à-d. les neuf quantités), à l'aide d'une balance électronique, puis on a mit chaque quantité du chaque élément dans un moule.



Figure IV.1: La balance utilisée

IV.2.2. Fabrication des moules :

Dans ce procédé on a réalisé les moules avec une boîte à noyau et un sable composé de :

Silice

Silicate

Noir minéral

CO₂ pour le durcissement

IV.2.3. Opération de coulée :

Le remplissage des moules, préparés avant, s'effectue à l'aide d'une poche de coulée.



Figure IV.3 : opération de coulée.

IV.2.4. Décochage et parachèvement des éprouvettes :

Après la solidification du métal liquide, on a décoché les quilles-blocks à l'aide d'une grenailleuse, puis on a enlevé les éprouvettes et on les a ébarbé à l'aide d'une meule.

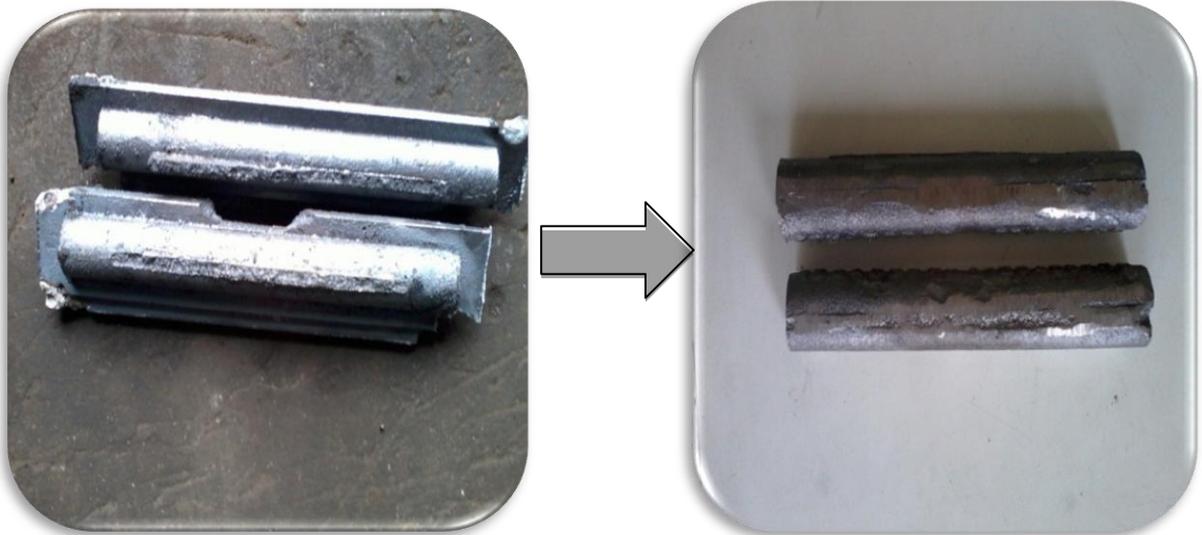


Figure IV.4 : meulage des éprouvettes.

IV.3. Caractérisation :

La caractérisation renferme deux parties distinctes : l'une microstructurale où nous avons procédé à un examen micrographique des échantillons découpés, et l'autre est mécanique où on a procédé à des essais mécaniques : la traction, la compression et la dureté.

IV.3.1. Caractérisation microstructurale :

Afin de caractériser la microstructure des fontes élaborées avec les différentes compositions, on a procédé à l'examen micrographique, qui nécessite une préparation métallographique suivi d'une attaque chimique.

IV.3.1.1. Préparation métallographique des échantillons :

Les échantillons ont été découpés depuis les éprouvettes, et puis nous avons effectué un polissage de façon à obtenir une surface d'examen plane. Sachant que le polissage s'effectue en deux étapes :

Pré-polissage :

Il se fait par frottement de l'échantillon sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus fine, décroissante (240, 400, 600, 1000 et 1200). L'opération de polissage s'effectue habituellement avec lubrification à l'aide de l'eau (arrosage) et ceci pour éliminer le risque d'échauffement de l'échantillon. Ce dernier est rincé à l'eau à chaque changement de papier pour éviter que des particules de grand diamètre n'affectent le stade de polissage à plus faible granulométrie.



Figure IV.5 : Polisseuse à deux plateaux.

Polissage de finition :

Le polissage de finition consiste à polir l'échantillon sur un disque de feutre avec la suspension de la pâte diamantée répartie à l'aide d'un diluant sur le disque qui joue aussi le rôle d'un refroidisseur.



Figure IV.6 : Polisseuse mono plateau pour la finition.

IV.3.1.2. Attaque chimique :

La révélation de la microstructure est réalisée à l'aide d'une attaque chimique qui met en évidence les différentes phases de la fonte étudiée. Pour cela les échantillons sont attaqués au Nital : 5% d'acide nitrique (HNO_3) et 95% d'éthanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{-OH}$). La durée de l'attaque chimique est comprise entre 20 et 30 secondes.

Avant l'attaque chimique, nous avons vérifié au microscope optique que les échantillons ne possèdent aucune rayure pour pouvoir finalement accéder à l'attaque chimique.



Figure IV.7 : échantillons coupés pour la structure.

IV.3.1.3. Observation microscopique :

Microscopie Optique

Comme son nom l'indique, le microscope est un instrument permettant l'observation visuelle de petits objets ou détails d'objets, usuellement indiscernables à l'œil nu. Une des propriétés de cet appareil est son agrandissement angulaire, c'est-à-dire la possibilité de fournir une image agrandie d'un objet à étudier.

Cependant, ce paramètre ne suffit pas à lui seul à caractériser les performances du dispositif. Il faut en effet que cette propriété s'applique à tous les détails de l'objet, y compris les plus fins. La seconde propriété du microscope est donc sa résolution, dont découlent d'importantes conséquences pratiques, puisque cela implique de travailler avec des optiques de grande ouverture numérique, mais limitée par la diffraction. Les bons microscopes sont donc des systèmes optiques et mécaniques complexes et coûteux [8].

A l'aide d'un microscope optique (**Figure IV.8**) nous avons pris les microstructures. Les photos sont prises par une caméra numérique reliée à l'ordinateur. Le logiciel d'acquisition des photos est l'**Archimed**.

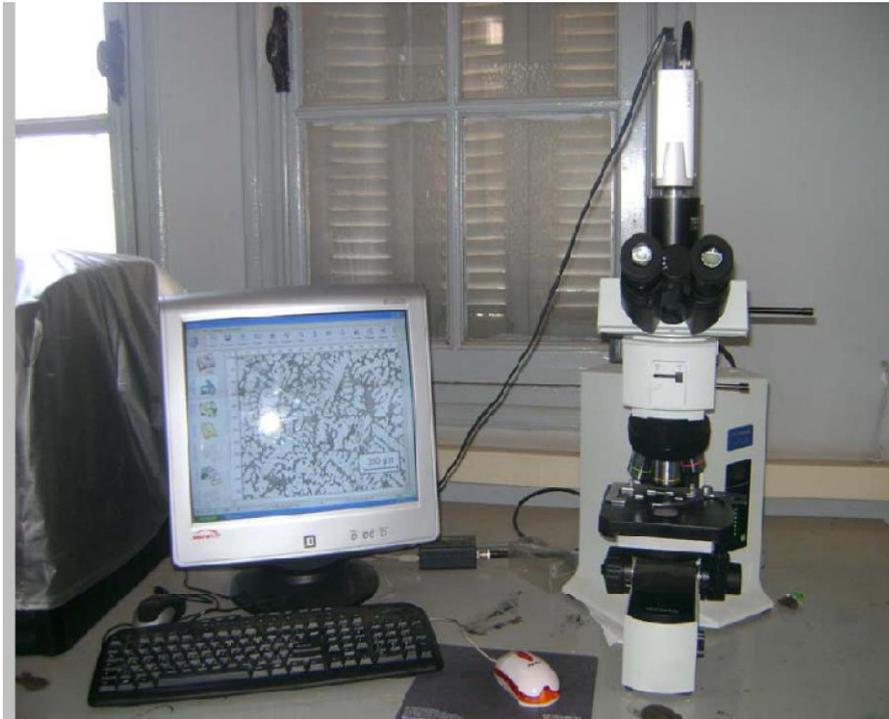


Figure IV.8: Microscope optique « OLYMPUS » du Département Métallurgie.

IV.3.2. Caractérisation mécanique :

IV.3.2.1. Essai de dureté :

L'essai de dureté Brinell consiste à appliquer sur la surface polie une charge constante et statique F pendant un temps défini (10 à 15 s). Cette charge s'applique à l'aide d'une bille de diamètre D , nous permettons de mesurer le diamètre de l'empreinte laissée après suppression de la charge.

La dureté Brinell (HB) est le quotient de la charge F en Kg (ou $1,02F$ en daN) par la surface S en mm^2 de l'empreinte considérée comme la calotte d'une sphère de diamètre d [17].

$$HB = F / S \text{ (F en Kgf)}$$

$$HB = 1.02 F / S \text{ (F en daN)}$$

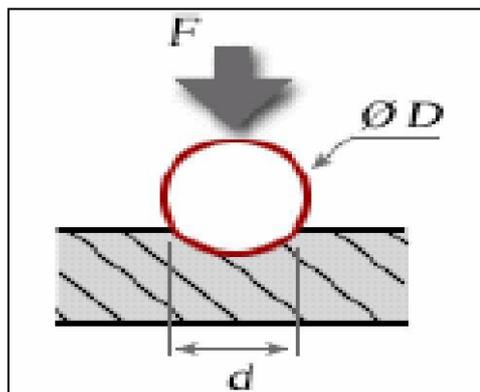


Figure IV.9: Essai de dureté Brinell HB.

On a effectué des essais de dureté Brinell à l'UFR. Les essais ont été effectués à l'aide d'une machine WOLPERT (**Figure IV.11**) ayant les propriétés suivantes :

- la charge : 3000 kgf ;
- diamètre de la bille : 10 mm ;
- le temps de l'essai : 30 s



Figure IV.10 : Echantillon après essai de dureté.



Figure IV.11: La machine de dureté HB.

IV.3.2.2. Essai de traction :

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort progressif et croissant jusqu'à la rupture de cette dernière. Cet essai est réalisé à D.V.Ià l'aide d'une machine de traction SATEC (60HVL-1248). Elle permet de caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau.

Dans cet essai, il a été utilisé des éprouvettes qui sont représentées dans la figureIV.12ci-dessous

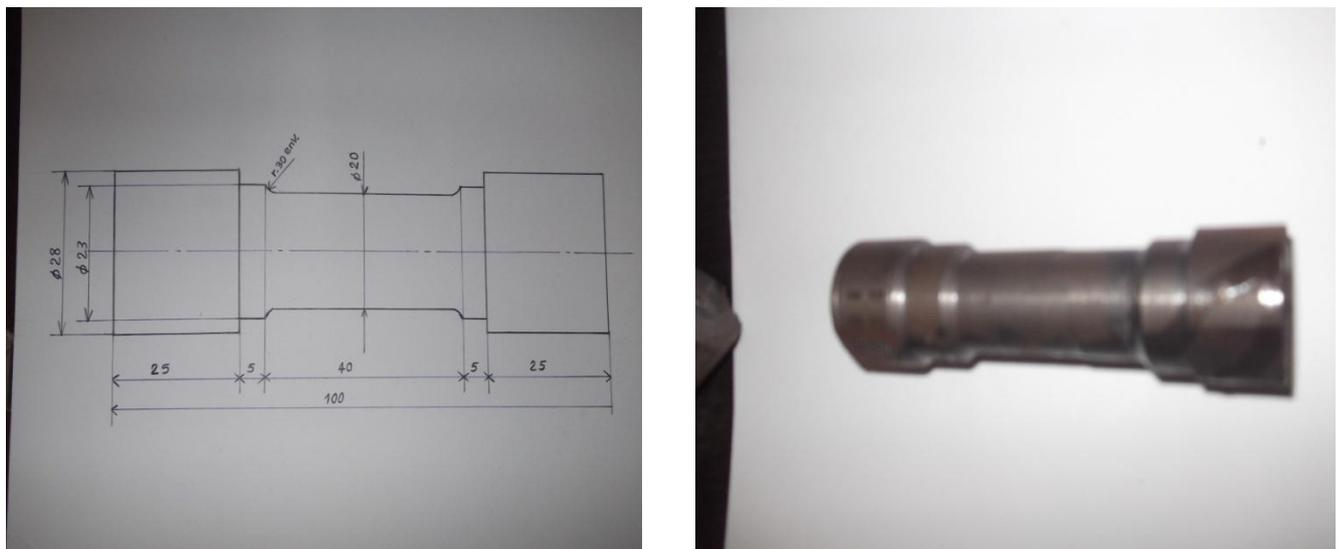


Figure IV.12: Les éprouvettes de traction.

Le diagramme de traction rationnel est représenté sur la Figure IV.13:

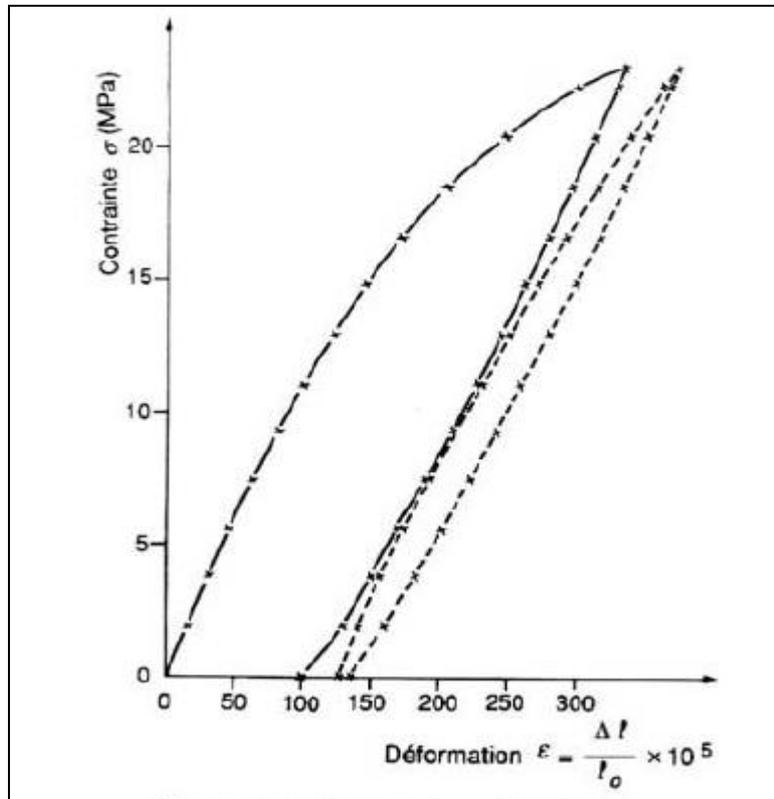


Figure IV.13: Courbe rationnel de traction pour la fonte FT25.[13]

Les caractéristiques mécaniques de la traction sont représentées dans le tableau IV.2, ci-dessous:

Tableau-IV.2 : Caractéristiques mécaniques de la traction.

Caractérisation de traction	Formules de calcul
Limite élastique apparente Re	$Re \text{ (N/mm}^2\text{)} = Fe \text{ (MPa ou N)} / So$ (mm).
Résistance à la rupture Rm	$Rm \text{ (N/mm}^2\text{)} = Fm \text{ (MPa ou N)} / So$ (mm).
Allongement en % : A %	$A [(Lu - Lo) / Lo] \times 100.$
Striction en % : Z %	$Z [(So - Su) / So] \times 100.$

IV.3.2.3. Essai de compression :

En raison de son caractère conventionnel, et des difficultés qu'il y a à l'exécuter parfaitement, l'essai de compression est rarement pratiqué sur les fontes ; on emploie le plus souvent une éprouvette cylindrique dont le rapport de la hauteur au diamètre est de 2 ou de 3, les résultats étant d'ailleurs assez voisins. La charge de rupture par compression vaut de 2,5 à 4 fois la résistance à la traction. [13]

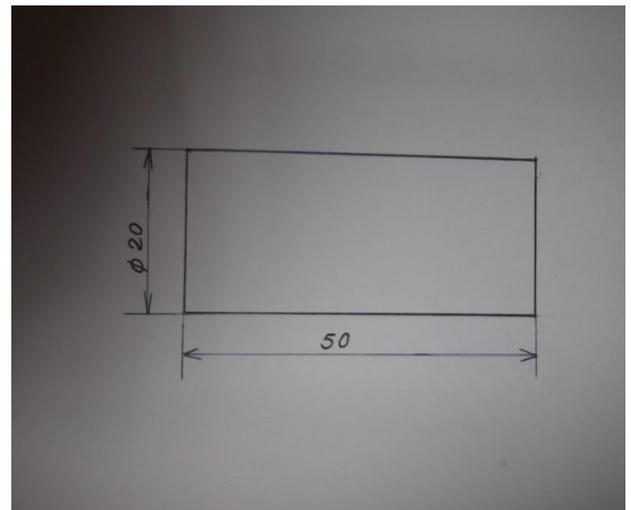


Figure IV.14 : les éprouvettes de compression.

Cet essai est réalisé au Département Génie Civil à l'École Nationale Polytechnique, à l'aide d'une machine de compression SATEC (60HVL-1248).

La forte résistance à la compression est une des caractéristiques remarquables des fontes grises.

CHAPITRE V :

Résultats & Interprétations

V.1. La composition chimique la fonte Ft25 :

Après la fusion des charges dans le four à arc, la fonte liquide est transférée au four de maintien. Le tableau V.1 donne la composition chimique de la fonte liquide ainsi élaborée.

Tableau V.1 : la composition chimique de la fonte élaborée.

Nuance	% Carbone	% Silicium	% Manganèse	% Soufre	% Phosphore	% Cuivre	% C _{éq}
Ft25	3,25	1,80	0,70	≤ 0,10	≤ 0,15	0,38	3,88

V.2. La microstructure de la fonte Ft25 :

C'est une fonte à graphite lamellaire, la matrice est presque perlitique, la forme de la perlite est lamellaire. La distribution du graphite est uniforme et l'orientation est désordonnée (Type A).



Figure V.1: fonte de base sans attaque chimique.



Figure V.2: fonte de base avec l'attaque chimique au Nital 5%.

La structure finale de la fonte de base comprend :

- perlite (correspondant à un acier eutectoïde à 0,8 % C) ;
- graphites eutectique et proeutectoïde.

V.3. Caractéristiques mécaniques de la fonte Ft25 :

Le **tableau V.2** nous donne les caractéristiques mécaniques de la fonte Ft25.

Tableau V.2 : les caractéristiques mécaniques de la fonte de base.

Nuance	La dureté mesurée (HB)	Résistance à la traction R_m (N/mm^2)	Résistance à la compression σ_d (N/mm^2)	Allongement (A%)
FT25	191	258	780	—

Ces résultats confirment bien ce qui est dit dans la partie théorique, à propos de la fonte Ft25 : $R_m > 250MPa$; avec une rupture fragile ; une dureté qui correspond à celle des fontes grises à matrice perlitique (170 à 210 HB) ; une résistance à la compression élevée qui vaut 3 fois la résistance à la traction.

V.4. Influence de la variation du taux des éléments :

V.4.1. Influence sur la microstructure :

Nous avons pris une variation de 0,6% en taux d'éléments (C ; Si ; Mn ; Cu), pour mieux observer l'impact de ces éléments sur la microstructure de la fonte de base, que ce soit sur le graphite ou sur la matrice.

V.4.1.1. Influence sur le graphite :

a. variation en taux de carbone :

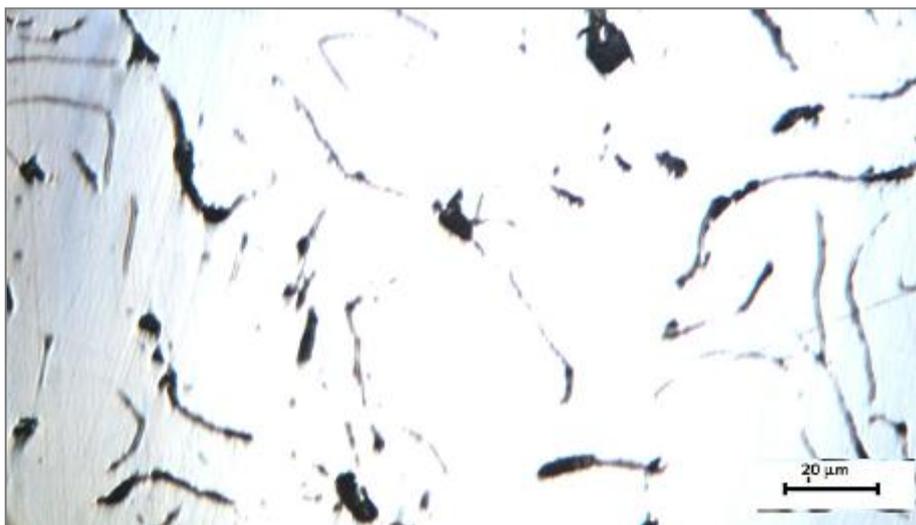


Figure V.3 : la fonte avec une variation de 0,6% C, sans attaque chimique. (type C).

On observe les lamelles de graphite qui sont presque identiques, de fortes dimensions et orientées en tout sens, entre lesquelles sont dispersées un grand nombre de lamelles de petites dimensions.

Cette structure est observée dans le cas de fontes hypereutectiques. Les lamelles de fortes dimensions sont constituées par du graphite hypereutectique déposé avant l'eutectique, les lamelles plus fines font partie de l'agrégat eutectique.

b. variation en taux de silicium :



Figure V.4 : la fonte avec une variation de 0,6%Si, sans attaque chimique.

On observe des lamelles de graphite dont la distribution est uniforme et l'orientation est désordonnée (Type A).

c. variation en taux de manganèse :

Figure V.5 : la fonte avec une variation de 0,6%Mn, sans attaque chimique.

On observe moins de graphite précipité dans la fonte, ceci est dû au manganèse qui empêche la décomposition de l'austénite primaire en austénite secondaire et en graphite proeutectoïde, mais plutôt il favorise la précipitation de cémentite proeutectoïde, donc une diminution de rapport C_g/C_c .

d. variation en taux de cuivre :

Figure V.6 : fonte avec une variation de 0,6%Cu, sans attaque chimique.

On observe des lamelles de graphite plus fines en raison de l'effet de cuivre.

L'effet graphitisant de cuivre n'influe que sur la cémentite libre, et comme la fonte Ft25 ne contient pas de cémentite libre, on peut dire que la teneur en carbone graphitique reste constante.

V.4.1.2. Influence sur la matrice :**a. variation en taux de carbone :**

Figure V.7 : fonte avec une variation de 0,6% C, après attaque au Nital 5%.

La structure finale de la fonte comprend :

- perlite (correspondant à un acier eutectoïde à 0,8 % C) ;
- graphite primaire, eutectique et proeutectoïde.

b. variation de taux de silicium :

Figure V.8 : fonte avec une variation de 0,6%Si, après attaque au Nital 5%.

On observe plus de plages en couleur blanche qui correspondent à l'augmentation de la fraction ferritique, ceci est dû à une augmentation de taux de silicium.

La structure finale de la fonte comprend :

- perlite et ferrite correspondant à un acier hypoeutectoïde ;
- graphites eutectique et proeutectoïde.

c. variation de taux de manganèse :

Figure V.9 : fonte avec une variation de 0,6%Mn, après attaque au Nital 5%.

On observe des inclusions de MnS, qui apparaissent en gris souris, et des inclusions de l'eutectique phosphoreux binaire en bleu.

La structure finale de la fonte est constituée de :

- perlite et cémentite proeutectoïde, correspondant à un acier hypereutectoïde ;
- graphite eutectique.

d. Variation de taux de cuivre :

Figure V.10 : fonte avec une variation de 0,6% Cu, après attaque au Nital 5%.

La structure finale de la fonte à comprendre :

- perlite (correspondant à un acier eutectoïde à 0,8 % C) ;
- graphites eutectique et proeutectoïde.

V.4.2. Influence sur les propriétés mécaniques :**V.4.2.1. Influence sur la dureté :****a. variation en taux de carbone :**

Le tableau V.3 nous donne les valeurs de la dureté Brinell pour la fonte, avec les différentes variations en teneur massique en carbone.

Tableau V.3 : les valeurs de la dureté de la fonte, avec les différentes variations en teneur en carbone.

La variation en %C	Base	Base + 0,2 %C	Base + 0,4 %C	Base + 0,6 %C
Dureté (HB)	191	185	182	180

La variation de la dureté totale de la fonte en fonction des teneurs massiques en carbone, est représentée sous forme de courbe (**Figure V.11**).

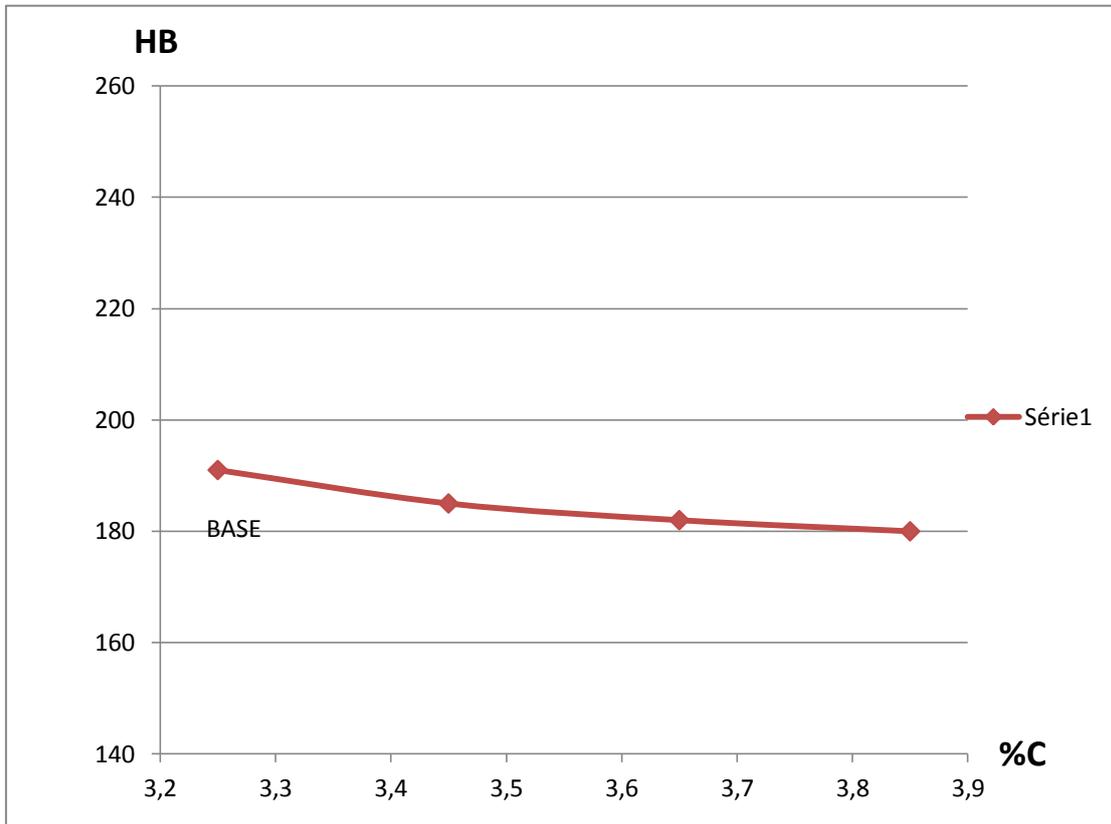


Figure V.11 : variation de la dureté en fonction de teneurs massiques en carbone.

On remarque bien que la dureté ne varie presque pas. En fait, La **dureté globale de la fonte** dépend évidemment avant tout de la matrice qui reste perlitique pour ces variations en taux de carbone.

b. variation en taux de silicium :

Les résultats obtenus lors de l'essai de dureté, avec les variations en taux de silicium, sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau V.4 : les valeurs de la dureté de la fonte, avec les différentes variations en teneur en silicium.

La variation en %Si	Base	Base + 0,2 %Si	Base + 0,4 %Si	Base + 0,6 %Si
Dureté (HB)	191	183	177	165

La variation de la dureté totale de la fonte en fonction des teneurs massiques en silicium, est représentée sous forme de courbe (**Figure V.12**).

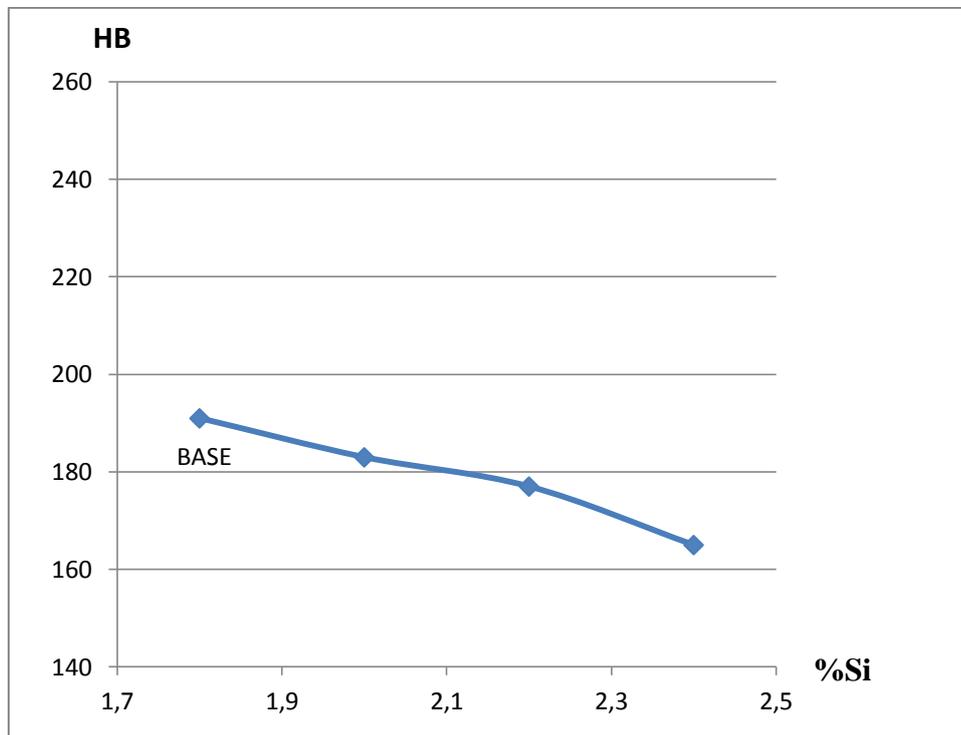


Figure V.12 : variation de la dureté en fonction de teneurs massiques en silicium.

On remarque bien que la dureté diminue avec l'augmentation du taux de silicium. Ceci est dû, à l'apparition dans la microstructure des plages d'une phase ferritique moins dure, ce qui diminue la dureté globale de la matrice.

c. variation en taux de manganèse :

Les valeurs de la dureté de la fonte, pour les variations en teneur massique de manganèse, sont données dans le tableau suivant :

Tableau V.5 : les valeurs de la dureté de la fonte, avec les différentes variations en teneur en manganèse.

La variation en %Mn	Base	Base + 0,2 %Mn	Base + 0,4 %Mn	Base + 0,6 %Mn
Dureté (HB)	191	214	241	255

La variation de la dureté totale de la fonte en fonction des teneurs massiques en manganèse, est représentée sous forme de courbe (**Figure V.13**).

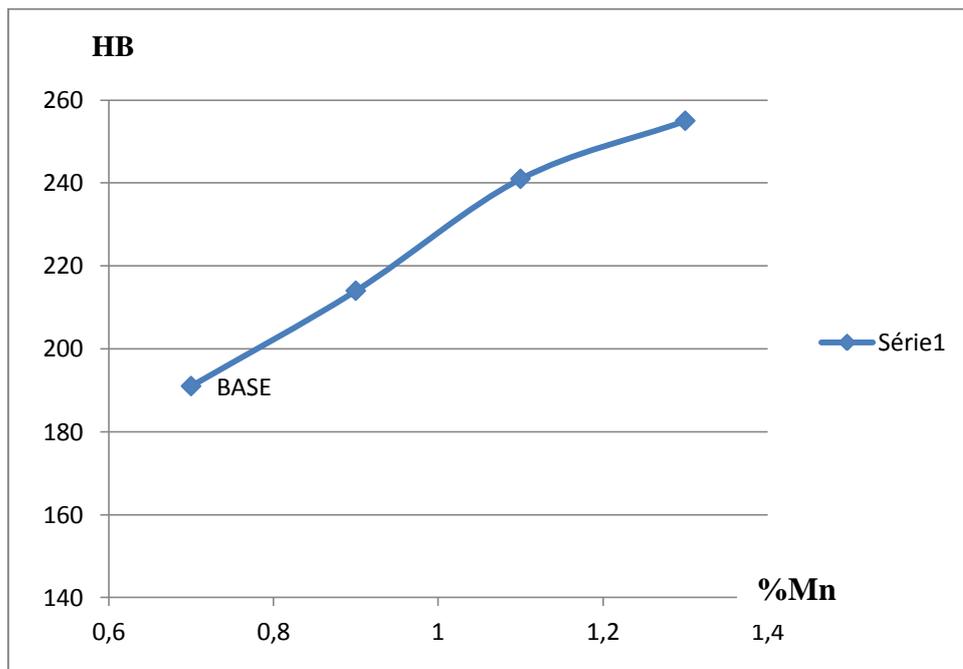


Figure V.13 : variation de la dureté en fonction de teneurs massiques en manganèse.

Il y a une augmentation importante de la dureté avec l'ajout de manganèse ; à cause de la précipitation d'une cémentite proeutectoïde plus dure, au cours de refroidissement. En fait, l'austénite eutectique ne se décompose pas entièrement en austénite secondaire et en graphite proeutectoïde, au cours de refroidissement, comme dans le cas de diagramme stable, mais plutôt, à une certaine température, la fonte continue à suivre le diagramme métastable, avec dépôt d'une cémentite proeutectoïde au lieu de graphite proeutectoïde.

Aussi l'augmentation de la dureté est due à l'effet carburigène de manganèse, qui a tendance à stabiliser les carbures dont l'eutectique binaire phosphoreux, ces cristaux ont une dureté plus grande que la matrice.

d. variation en taux de cuivre :

Les valeurs de la dureté de la fonte, pour les variations en teneur massique de cuivre, sont données dans le tableau suivant :

Tableau V.6: les valeurs de la dureté de la fonte, avec les différentes variations en teneur en cuivre.

La variation en %Cu	Base	Base + 0,2 %Cu	Base + 0,4 %Cu	Base + 0,6 %Cu
Dureté (HB)	191	205	213	235

La variation de la dureté totale de la fonte en fonction des teneurs massiques en cuivre, est représentée sous forme de courbe (**Figure V.5**).

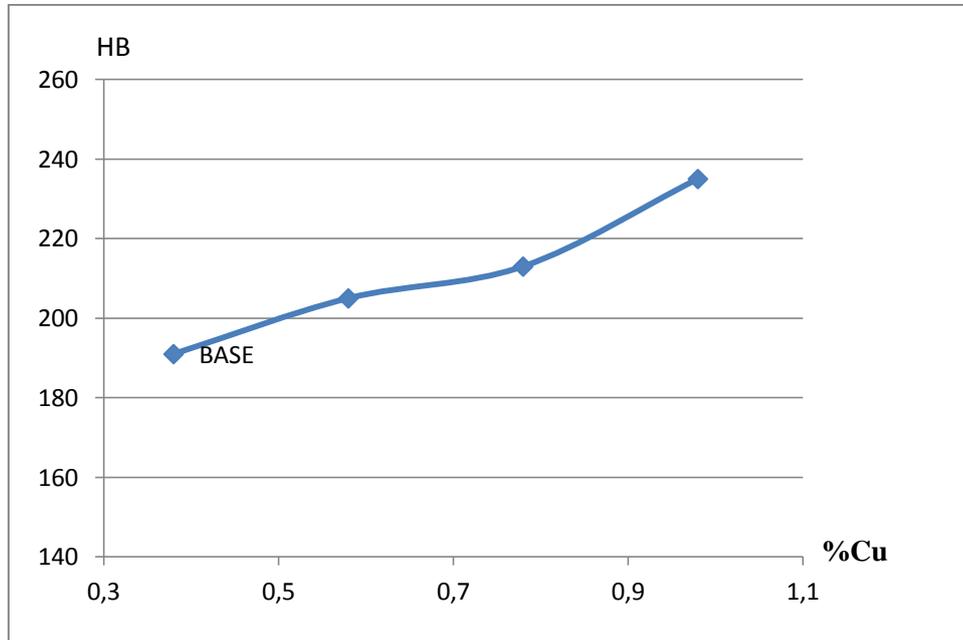


Figure V.14 : variation de la dureté en fonction de teneurs massiques en cuivre.

On remarque une augmentation de la dureté, en raison de l'effet de cuivre qui abaisse la température de palier eutectoïde et affine la perlite, et stabilise celle-ci. En effet, la valeur de la dureté mesurée pour une variation de 0,6% Cu (235HB), se rapproche de celle d'une perlite très fine (250HB).

A la lumière des résultats obtenus pour les quatre éléments, on peut dire que :

- Les inclusions de graphite influence peu sur la dureté dont les valeurs sont déterminées essentiellement par la nature de la matrice métallique de la fonte : perlite ; ferrito-perlite ;
- La finesse ou non des lamelles de la perlite (cas de cuivre) ;
- la présence ou non de cémentite libre, ainsi que les carbures formées et dispersées dans la matrice (cas de manganèse).

V.4.2.2. influence sur la résistance à la traction :

a. variation en taux de carbone :

Les résultats obtenus lors de l'essai de traction sur les éprouvettes en fonte avec les différentes variations en teneur massique de carbone, sont représentés dans le tableau V.7 :

Tableau V.7 : les valeurs de la résistance à la traction de la fonte, avec les différentes variations en teneur en carbone

la variation en %C	Base	Base+ 0,2%C	Base+ 0,4%C	Base+ 0,6%C
La charge à la rupture (KN)	81	65	62	57
La résistance à la rupture (MPa)	258	207	196	183

La variation de la résistance à la traction en fonction des teneurs massiques en carbone, est représentée sous forme de courbe (**Figure V.15**).

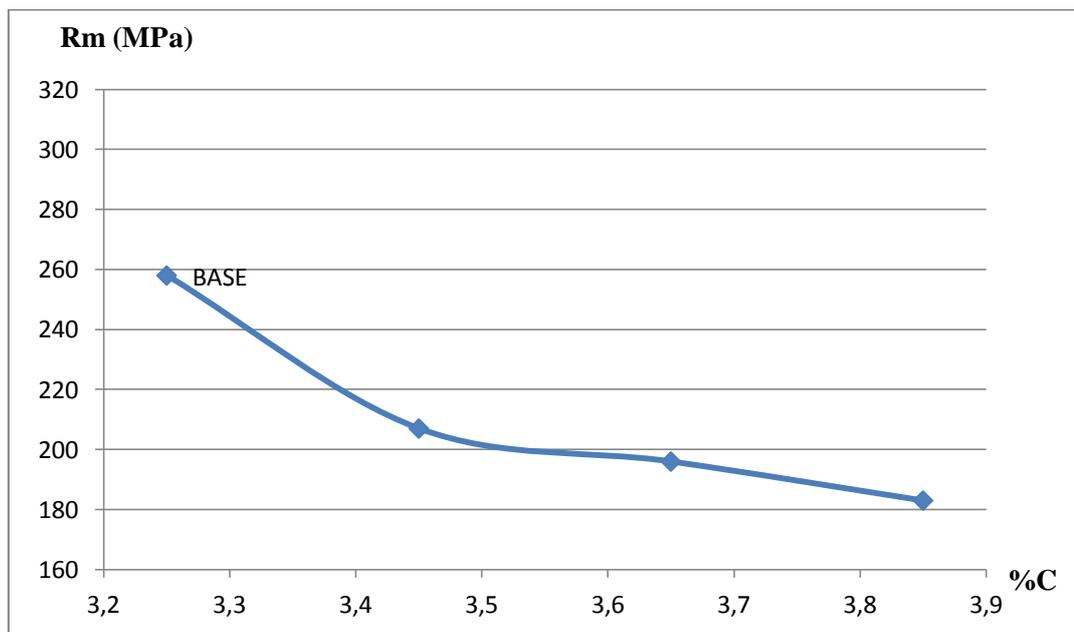


Figure V.15 : variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur massique en carbone.

On remarque que les valeurs de résistance diminuent quand la teneur en carbone total augmente, ceci est dû à la précipitation des lamelles de graphites grossières, ces dernières affaiblissent la capacité de résistance de la fonte aux efforts de traction par effet d'entaille et effet de striction.

b. variation en taux de silicium :

Le tableau V.8 donne les résultats obtenus lors de l'essai de traction sur les éprouvettes en fonte Ft25, avec les différentes variations en teneur massique de silicium.

Tableau V.8 : les valeurs de la résistance à la traction de la fonte, avec les différentes variations en teneur en silicium.

la variation en %Si	Base	Base+ 0,2%Si	Base+ 0,4%Si	Base+ 0,6%Si
La charge à la rupture (KN)	81	69	63	58
La résistance à la rupture (MPa)	258	218	201	184

La variation de la résistance à la traction en fonction des teneurs massiques en silicium, est représentée sous forme de courbe (**Figure V.16**).

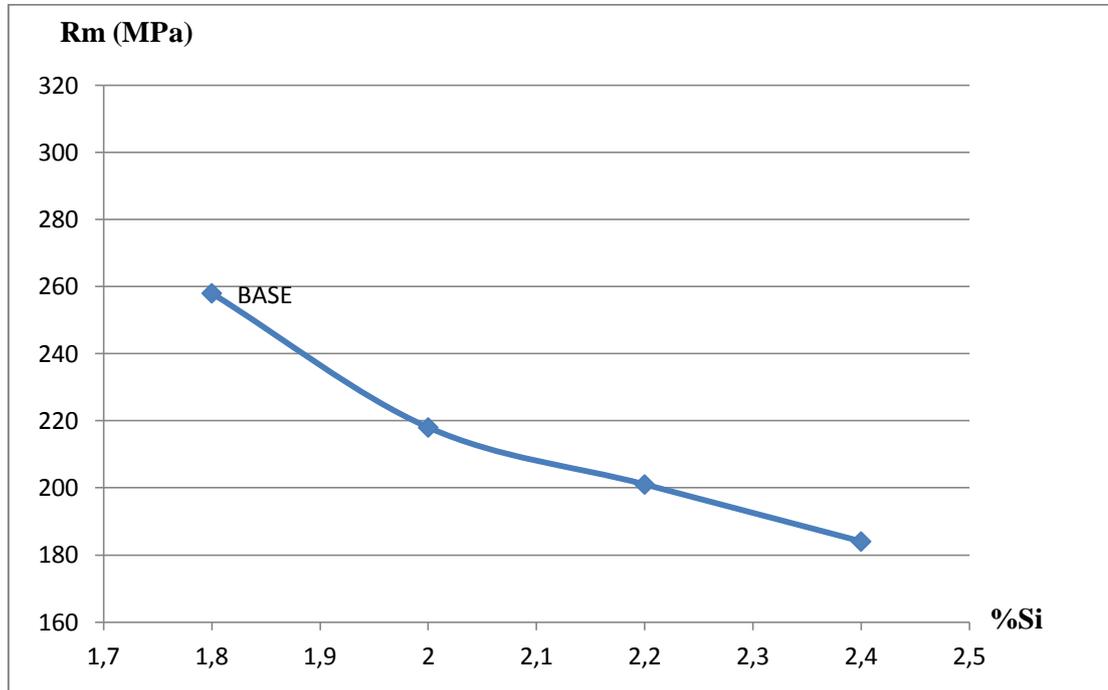


Figure V.16 : variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur massique en silicium.

On remarque une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation de taux de silicium, car le silicium agit sur la matrice en tant qu'un élément favorisant l'apparition d'une phase ferritique moins résistante que la phase perlitique. Aussi, le silicium diminue la résistance d'une fonte par son effet graphitisant, c'est-à-dire il augmente le taux de graphite.

c. variation en taux de manganèse :

Le tableau V.9 donne les résultats obtenus lors de l'essai de traction sur les éprouvettes en fonte Ft25, avec les différentes variations en teneur massique de manganèse.

Tableau V.9 : les valeurs de la résistance à la traction de la fonte, avec les différentes variations en teneur en manganèse.

la variation en %Mn	Base	Base+ 0,2%Mn	Base+ 0,4%Mn	Base+ 0,6%Mn
La charge à la rupture (KN)	81	88	96	90
La résistance à la rupture (MPa)	258	281	306	287

La variation de la résistance à la traction en fonction des teneurs massiques en manganèse, est représentée sous forme de courbe (**Figure V.17**).

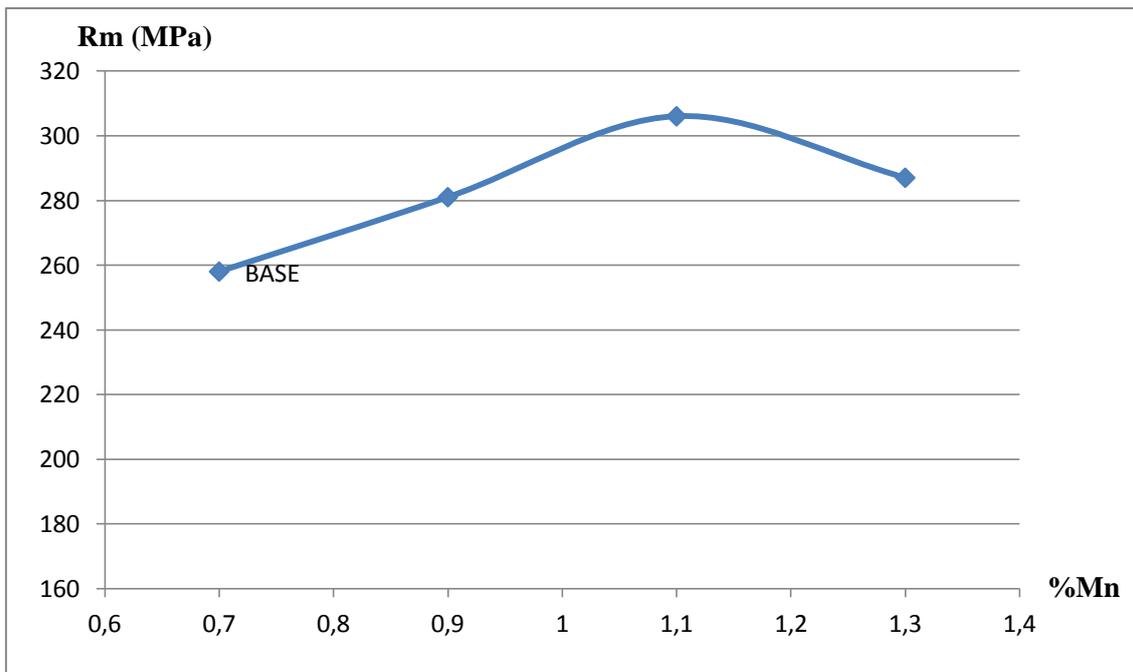


Figure V.17 : variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur massique en manganèse.

La résistance à la rupture augmente avec l'ajout de manganèse qui est un élément carburigène, donc il diminue le taux de graphite, par conséquent améliore la résistance de la fonte.

On remarque une chute de la résistance à la traction pour la variation de 0,6%Mn, ceci est dû à une fragilisation probable par excès de cémentite libre.

d. variation en taux de cuivre :

Le tableau V.10 donne les résultats obtenus lors de l'essai de traction sur les éprouvettes en fonte Ft25, avec les différentes variations en teneur massique de cuivre.

Tableau V.10 : les valeurs de la résistance à la traction de la fonte, avec les différentes variations en teneur en cuivre.

la variation en %Cu	Base	Base+ 0,2%Cu	Base+ 0,4%Cu	Base+ 0,6%Cu
La charge à la rupture (KN)	81	88	93	100
La résistance à la rupture (MPa)	258	277	292	318

La variation de la résistance à la traction en fonction des teneurs massiques en cuivre, est représentée sous forme de courbe (**Figure V.18**).

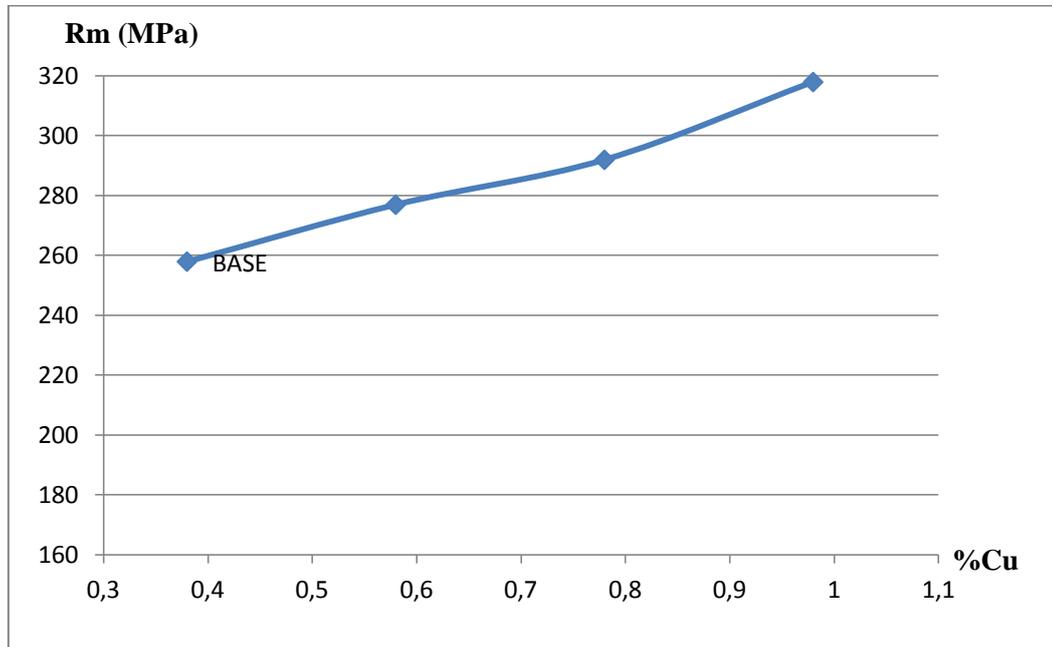


Figure V.18 : variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur massique en cuivre.

La résistance à la traction augmente avec l'augmentation en taux de cuivre, à cause de l'affinement et la dispersion de graphite par cet élément.

A la lumière des résultats obtenus pour les quatre éléments, on peut dire que :

- Les lamelles de graphite diminuent brusquement la résistance à la rupture ;
- La résistance de la fonte est d'autant plus grande que la quantité des inclusions graphitiques est plus petite, qu'elles sont plus fines, et plus isolées, comme dans le cas de cuivre et de manganèse.
- l'addition de carbone ou de silicium favorise la graphitisation (augmentation de rapport de C_g/C_c), donc, des lamelles de graphite en gros qui joue le rôle des entailles affaiblissant la matrice métallique.

V.4.2.3. influence sur la résistance à la compression :**a. variation en taux de carbone :**

Le tableau V.11 donne les résultats obtenus lors de l'essai de compression sur les éprouvettes en fonte Ft25, avec les différentes variations en teneur massique de carbone.

Tableau V.11 : les valeurs de la résistance à la compression de la fonte, avec les différentes variations en teneur en carbone.

la variation en %C	Base	Base+ 0,2%C	Base+ 0,4%C	Base+ 0,6%C
La charge à la rupture (KN)	245	238	225	217
La résistance à la rupture (MPa)	780	757	716	690

La variation de la résistance à la compression en fonction des teneurs massiques en carbone, est représentée sous forme de courbe (**Figure V.19**).

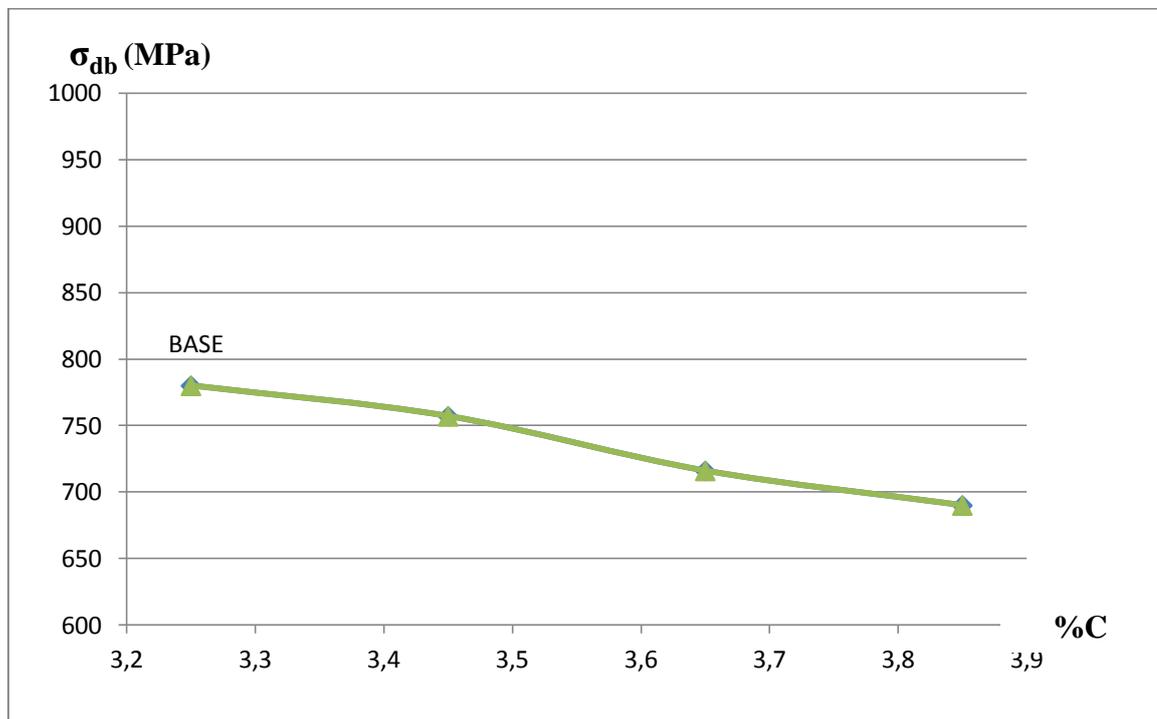


Figure V.19 : variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur massique en carbone.

On remarque que l'augmentation de la teneur massique en carbone diminue la résistance à la compression de la fonte, car les lamelles de graphite grossières affaiblissent la résistance à la compression de la fonte par effet de striction.

b. variation en taux de silicium:

Le tableau V.12 donne les résultats obtenus, pour chaque teneur en Silicium:

Tableau V.12 : les valeurs de la résistance à la compression de la fonte, avec les différentes variations en teneur en silicium.

la variation en %Si	Base	Base+ 0,2%Si	Base+ 0,4%Si	Base+ 0,6%Si
La charge à la rupture (KN)	245	235	230	212
La résistance à la rupture (MPa)	780	748	732	675

La variation de la résistance à la compression en fonction des teneurs massiques en silicium, est représentée sous forme de courbe (**Figure V.20**).

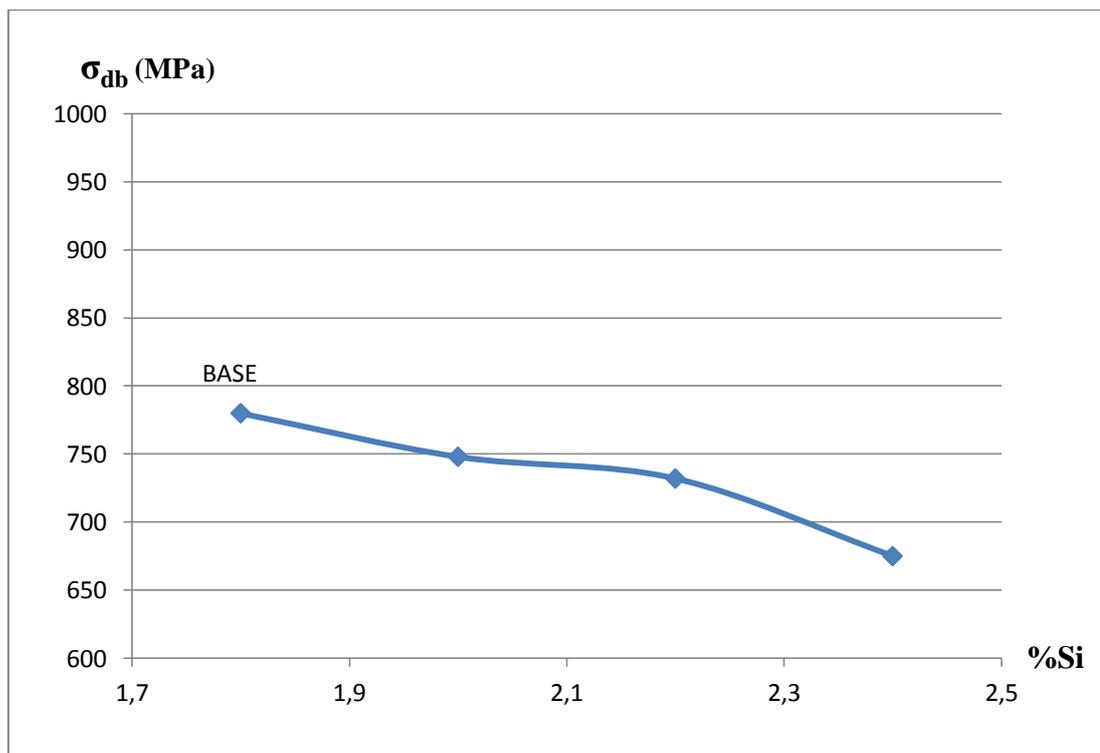


Figure V.20 : variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur massique en silicium.

D'après la figure V.20, l'augmentation de la teneur massique en silicium diminue la résistance à la compression de la fonte, ceci est dû aussi à l'apparition de la phase ferritique. La présence de la ferrite dans la structure, sans augmentation de la plasticité et de la ductilité, diminue la résistance à la compression.

c. variation en taux de manganèse :

On représente dans le tableau V.13, la résistance à la rupture des différentes éprouvettes avec les différentes variations en teneur massique en manganèse.

Tableau V.13 : les valeurs de la résistance à la compression de la fonte, avec les différentes teneurs en manganèse.

la variation en %Mn	Base	Base+ 0,2%Mn	Base+ 0,4%Mn	Base+ 0,6%Mn
La charge à la rupture (KN)	245	266	278	297
La résistance à la rupture (MPa)	780	846	885	945

La variation de la résistance à la compression en fonction des teneurs massiques en manganèse, est représentée sous forme de courbe (**Figure V.21**).

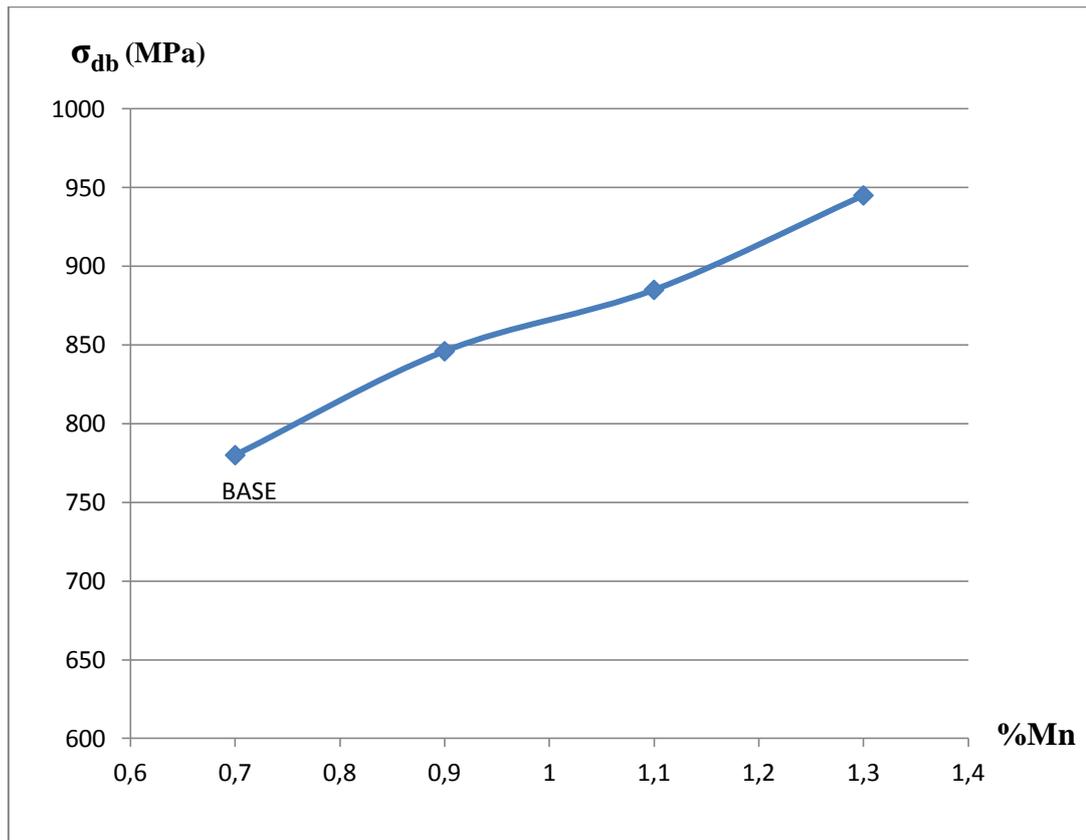


Figure V.21 : variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur massique en manganèse.

On remarque que le manganèse augmente la résistance à la compression, les effets qui conduisent à cette augmentation sont :

- l'effet de la cémentite libre dispersée dans la structure, considérée comme des barrières efficaces pour la progression des dislocations ;
- il en est ainsi du fait que le passage par une surface de séparation (cémentite) change l'orientation du plan de glissement ;
- l'effet de diminution de taux du carbone graphitique dans la fonte, considéré comme un effet secondaire.

d. variation en taux de cuivre :

Le tableau V.14 donne les résultats obtenus, pour chaque teneur en cuivre:

Tableau V.14 : les valeurs de la résistance à la compression de la fonte, avec les différentes variations en teneur en cuivre.

la variation en %Cu	Base	Base+ 0,2%Cu	Base+ 0,4%Cu	Base+ 0,6%Cu
La charge à la rupture (KN)	245	260	287	310
La résistance à la rupture (MPa)	780	827	914	986

La variation de la résistance à la compression en fonction des teneurs massiques en cuivre, est représentée sous forme de courbe (**Figure V.22**).

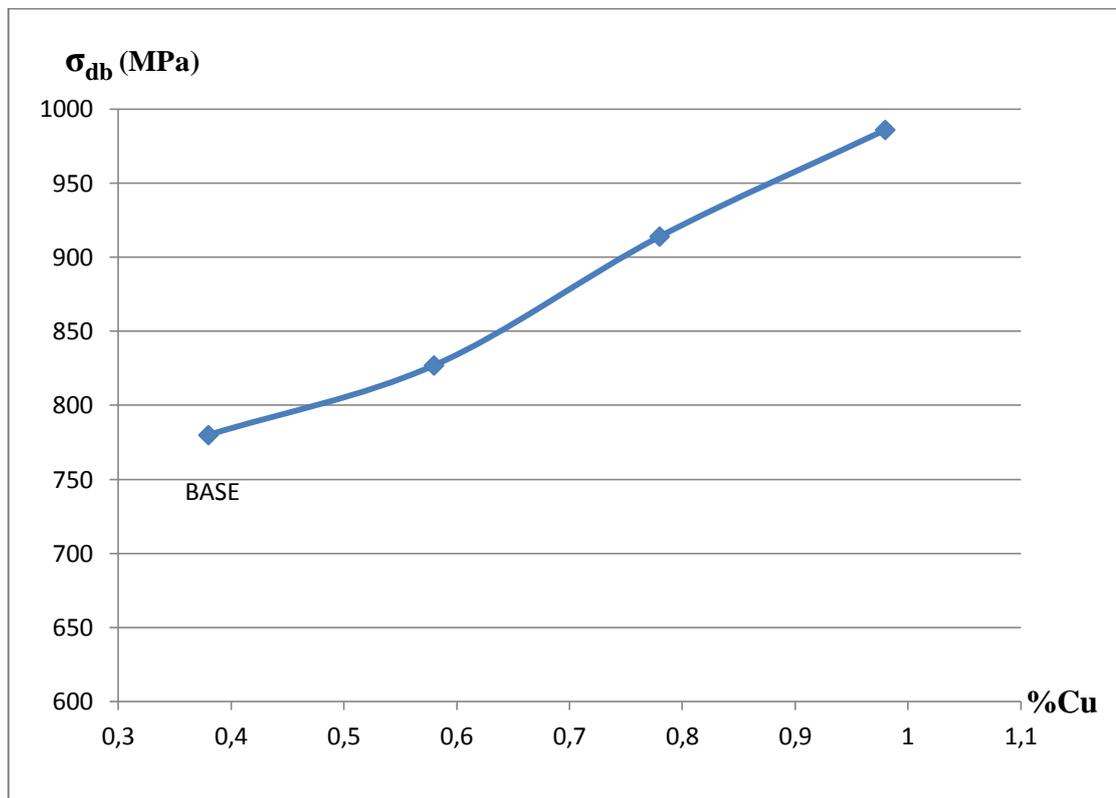


Figure V.22 : variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur massique en cuivre.

On remarque une augmentation importante de la résistance à la compression, plus de 200MPa pour une variation de 0,6%Cu, à cause de la tendance du cuivre à affiner la perlite.

A la lumière de ces résultats, on peut conclure que :

- Pour les éléments graphitisants (C et Si), les lamelles de graphite ont beaucoup moins d'influence sur les caractéristiques en compression que sur les caractéristiques en traction de la fonte ;
- La précipitation des carbures dans la structure augmente la résistance de la rupture à la compression (cas de Mn).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Compte tenue des résultats obtenus, pour les différents essais, on peut donc conclure que notre étude nous a permis de mieux comprendre l'effet des éléments chimiques sur les caractéristiques mécaniques et la morphologie structurale des fontes grises à graphite lamellaire :

1-En ce qui concerne la matrice, on peut penser a priori et notre étude montre que c'est la structure eutectoïde, c'est-à-dire celle de l'acier de résistance maximal, qui est à rechercher ;

2- En ce qui concerne le graphite, La **morphologie de graphite** qui, dans les fontes grises non alliées, est sous forme **lamellaire**, fortement interconnecté, joue le rôle essentiel sur la résistance à la traction. Le graphite est un constituant sans résistance mécanique et sa présence correspond à des «*vides*» dans la matrice sous forme de fissures naturelles. Du fait de sa morphologie lamellaire. Le graphite intervient :

- par diminution de la section efficace de la matière conduisant à une augmentation des contraintes moyennes matrice;
- par effet d'entaille conduisant à des concentrations de contrainte locales en bout de «*fissure*» (rupture fragile sans déformation apparente).

Donc, il vaut mieux, qu'il se présente en très petits et nombreux, et répartis de manière homogène, qu'en lamelles longues et épaisses, même si elles sont rares.

La fonte grise à graphite lamellaire Ft25 est largement utilisée, pour ses qualités et son prix peu élevé.

A la S.N.V.I on utilise la Ft25 pour la fabrication, des blocs-moteurs, des tambours de frein, des, etc. La résistance et la durée de vie de ces pièces peut être améliorées par ajout du Carbone, du Silicium, du Cuivre et du Manganèse..

Par exemple, pour la fabrication des blocs-moteur, le cuivre peut être ajouté afin d'améliorer l'amortissement aux vibrations de la fonte Ft25.

Références bibliographiques

- [1] **Michel Colombié et Coll**, << Matériaux métalliques >>, 2^e Edition; Dunod, Paris 2008.
- [2] **MICHELGERER**, << *Métallurgie de fonderie, (fontes grises) T2* >>, Edition EYROLLES, Paris 1978, (P. 150-155).
- [3] **Michel Dupeux**, << aide-mémoire science des matériaux >>, Edition Dunod, Paris 2004.
- [4] **WILLIAM D. CALLISTER, Jr**, << science et génie des matériaux >>, 5^e édition, Edition DUNOD, 2000.
- [5] **MICHEL Colombié**, << matériau industriel et matériau métallique >>, Edition DUNOD, 2008, p.309, 310.
- [6] **C.CHAUSSIN, G.HILLY**, <<Métallurgie, alliages métalliques tome I>>, DUNOD, Paris 1976, pages 126, 127, 129,135 247, 248.
- [7] **H.LE BRETON**, <<Manuel pratique du fondeur de fonte>>, Dunod, Paris 1966.
- [8] **Jean Barralis et Gérard Maeder**, << *Précis Métallurgie* >>., Edition Nathan VUEF, 9 rue Méchain, 75014. Paris (2002), (P. 59-67).
- [9] **I.LAKHTINE**, <<Métallographie et traitements des métaux >>, édition MIR, pages 33-34, Moscou 1986.
- [10] **Guy Murry**, << Aide-mémoire métallurgie, Métaux. Alliages. Propriétés >>, 2^e édition, DUNOD, Paris, 2004.
- [11] http://proxy2.angers.ensam.fr/ressources/Fondrie2006/pages/page_contituants_fontes.htm
- [7] **H.DE LEIRIS**, <<Métaux et alliages tome II>>, Masson, Paris 1971.
- [13]**J.C MARGERIE**, << Propriétés des fontes grises ordinaires >>, technique de l'ingénieur, M380.
- [14] **Gilbert BELLANGER**, << Conception et tracé des pièces moulées en fonte, guide pratique >>, Editions techniques des industries et de la fonderie (etif), p. 242, 243, 244, 245.
- [15] **J. C MARGERIE**, << élaboration des fontes (hormis les fontes malléables) >>, technique de l'ingénieur, M 760.
- [16] **P.BALCOUCHE**, << *Fonderie. " Mémento de métallurgie appliquée "* >>. (P. 50-73), Paris (1976).
- [17]: **JIS HAND BOOK**, << ferrous materials and metallurgy japeneese >>, standard association 669 JIS.

[18] **HENRI LAPLANCHE**, << Les fontes et leurs traitements thermiques >>, Tome 1, PYC-EDITION, DESFORGES 1975.