REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE Dr. YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté Des Sciences et De La Technologie

Département de Génie de la Matière

2 eme Année Master Génie Mécanique

Option : Science des Matériaux

THEME

Caractérisation mécanique et métallographique d'une fonte grise à graphite lamellaire FGL20

Réalisé par :

BOUKFOUSSA Aboubaker .

Hamida hacene.

Dirigé par :

Mr .EL Mohri .A.

Promotion 2014-2015

Etude Bibliographique

Chapitre I

I. Etat d'art

I-1-Historique de la fonderie …… .1

I-2-Introduction générale…… 2

I-3 -FONTES GRISELAMELLAIRES……3

I -3-1-Intruduction ……..3

I -3-2-Fontes blanches……..4

I -3-3-fontes grise……..4

I -3-4-Les fontes malléables…… 4

I -3-5-Les fontes à graphite sphéroïdal (GS) …… .4

I -3-6-Fonte GV (graphite vermicular)…….. .4

I -3-6-Fonte GL (graphite lamellaire)…… .4

I -3-7-Carbone equivalent …… 5

I -4-Composition chimique:…… 6

I -4-1- Facteurs determinant la structure et les proprieties…… .6

I -4-2-Manganese. Soufre. Phosphore …… 6

I -4-3-Influence du phosphore …… 7

I -5Elaboration de la fonte ……..7

I -5 -1-Les fontes de premièrefusion……..7

I -5 -2-Les fontes de deuxième fusion ……....7

I -5 -3-Le four induction ……..8

1. Lecreuset …… 8

2. L'inducteur …… 9

3. Les écans magnétiques /ouculasses …… 9

4. La carcasse …… 9

5. Lecouvercle …… .9

6. Equipments annexes …… 10

a. Captage des fumes …… 10

b.Décrassage …… ..10

C. Systèmes de chargement et depréchauffage …… 10

7. Installation de puissance électrique …… .10

I -5 -3-1- Schema des operations deliberation de lafonte…….. 11

I -5 -4-Préparation du lit de fusion …… 12

I -5 -4-1-Exemple de lit de fusion pour FGL 20 …… 12

I -5 -4-2-Fusion des charges …… 13

I -5 -5-Présentation du cubilot …… 13

I -6- Diagramme d'equilibre …… 14

I -6-1- Étude du refroidissement d'un alliage hyper eutectique (système métastable) …… 19

I -6-2- Diagramme stable fer-graphite …… 19

I -6-2-1-Étude du refroidissement d'un alliage hypoeutectique (system stable) …… 21

I -6-2-3-Système fer-carbone-phosphore: …… 21

I -6-2-4-Propriétés et rôle des constituants …… 23

I -6-2-4-1matrice …… 23

a. Ferrite :…… 23

b. perlite :…… .23

c.cémentite……24

d.graphite……25

I -6-2-5-Types de graphites:……25

A: graphite en lamelles……25

B: graphite en rosettes ……25

C: graphite en lamelles et amas……26

D: graphite interdendritique……26

I -6-MOULAGE DE FONTE GRISE LAMELLAIRE (FGL)

I -6- 1- AUTRES PROPRETES ET PRINCIPALES UTILISATION DES FONTE ……27

MOULAGE EN MOULE NON PERMANATE

I -6-2 MOULAGE EN MOULE NON PERMANENT ……27

I -6-2-1- MOULAGE EN SABLE A VERT……28

I -6-2-1-1- LE MOULAGE A VERT A LA MAIN……28

I -6-2-1-1-1 MATERIAU DE MOULAGE ……28

I -6-2-1-1-2- ANALYSE DE SABLE……29

a- Humidité ……29

I -6-3-MODLAGE ……29

I -6-4- NOYAUTAGE……30

I -7-DEFAUT DE FENDERIE DE FONTE GRISE LAMELLAIRE 20

Introduction……31

Les defaults..……31

I -7-1-BAVURE……31
I -7-2 GALES……32
I -7-3 GALESD'ANGLES……32
I -6-4 GERCED'ANGLE……32
I -7-5 SOULEVEMENT DE MOULE……33
I -7-6 DEFONCEMENT……33
I -7-7 MOULE FONDU……33
I -7-8 FORÇAGE……34
I -7-9 CHUTE DESABLE……34
I -7-10 SOUFFLURE D'ANGLE, EFFETLEONARD……34
I -7-11 PIQEURESSUPERFICELLES……34
I-7-12 SOUFFLURES AU VOSINAGE DE PIECES INSEREES……35
I -7-13 RETASSURE……35
I -7-14 REPRISE……36
I -7-15 DEFORMATION……36
I -7-16 VARIATION……36
I -7-17 BULLE……37
I -7-18 NON VENU……37
I -7-19 MANQUE……38
I -7-20 POINTSDURS……38
I -7-21 INCLUSION DESABLE……39
I -7-22 DEFAUT MOULE……39

Chapitre II

II .Caractéristique mécanique et métallographique

II.1 Caractéristiques mécaniques FGL……40
II .1-1 Resistance a la traction……40

II .1-2La dureté ……41

II .1- 3 La résilience :……42

II -4 Les caractéristique mécanique d'épandant des trois

facteurs :……42

A) Graphite ……42
b) Structure de la matrice……42
c)l'épaisseur :……42

II.2.Caractérisation métallographique …… 43

II.2.1.Introduction ……43

1- *Polissage ……43*
2- *Attaque chimique ……43*

Chapitre III

III. SUIVIE D'UNE COMAGNE (POVAL)

III.1 ELABORATION FGL20……44

III.1.2 PREPARATION DU LIT DE FUSION……44

III.1.2.1 PARC A FERRAILLES ……44
III.1.2.2 PARC DES MATI7RES D'ADDITION……44
III.1.3 FUSION DES CHARGES……44

III.1.3.1 ADDITIONS DE FIN DE FUSION……44
III.1.3.2 Autres opérations de fin de fusion ……44
-Le Ferro- manganese (Fe-Mn) : riche en Mn……44
III.1.4 COULEE DES ECHANTILLONS……45
III.2 ESSAIS MECANIQUE……45
III.2.1ESSAI DE TRACTION……46
III.2.2ESSIA DE DURETE……47
III.2.3 ESSAI BRINELL…… 47
III.3 MICROGRAPHIE……48
III.3.1 LE RESULTATD'ANALYSE……49
III.4 LA COULEES……49
a) moule……50
b) métal liquide……50
c)Coulée……52
III.5. SABLE A NOYAUX……51
III.5.1 LES CORPS DE REFROIDISSEMENT……57
III.5.9 OPERATIONS D'EXECUTION MANUELLE D'UN MOULE EN SABLE ……58
III.6 Caractérisation mécanique et métallographique pour chaque Compagnes……59
III.6.1 tête de bouche a clé ……59
III.6.2Caractérisation mécanique (Tète de bouche à clé)……60
III.6.2.1Essai de dureté……61
III.6.2.2 Résistance à la traction Rm ……61
III.6.3Caractérisation métallographique……61
***3-** Polissage ……61*

4- Attaque chimique ……62
III.6.3.1Observation microscopique ……62

III.6.4Cadre « SDC » ……63

III.6.5 Caractérisation mécanique Cadre « SDC » ……65
III.6.5.1 Essai de dureté……65

III.6.5.2 Résistance à la traction Rm ……65

III.6.6 Caractérisation métallographique Cadre « SDC »……66

1- Polissage ……66
2- Attaque chimique ……66
III.6.6.1Observation microscopique ……66

III.6.7 .Contre poids ……67

III.6.8 .Caractérisation mécanique (Contre poids)……68

III.6.8.1 Essai de dureté……68

III.6.8.2 Résistance à la traction Rm ……68

III.6.9.Caractérisation métallographique ……68
1- polissage ……68
2- attaque chimique ……68
III.6.9.1Observation microscopique……69

III.7.Control de qualité (les défauts de fonderie) ……70

III.7.1 Tète de bouche à clé ……70

1) BAVURE……70
2) 1)INCLUSION DE SABLE……70
3) BULLE;……71
III.7.2.Contre poids……71

1. GALES……71
III.7. 3.Cadre « SDC »……71

1 NON VENU……71

Chapitre IV
IV. Résultats et discutions

IV .1. L'influence des éléments d'additions sur la résistance à la traction 72

IV.1.1 influences de teneur de manganèse Mn et le soufre S sur la résistance à la traction ……72

IV.1.2 influences de teneur de silicium Si et la saturation de carbone Sc sur la résistance à la traction ……..72

IV .1.3 . L'influence de la teneur de carbone C sur la dureté……73

IV .2.Les résultats micrographie des échantillons(POVAL)……74

V. Conclusion générale……...78

Sommaire

Sommaire

Sommaire

Partie théorique

Chapitre I

Figure I-1 : diagrammed'équilibre et tupes des fontes ……...3

Figure I -2: Influence de quelques éléments d'additionsur la dureté de la ferrite ……..…..7

Figure I -3- Four électrique à induction. Schéma type [5]…….9

Figure I -4-: Opérations d'élaboration

de la fonte de moulage[6]……...11

Figure I -4.a) – Schéma d'un cubilot……14

Figure I -5 – Diagramme métastable FeFe3C……15

Figure I -6 – Diagramme stable fer-graphite ……..16

Figure I -7– Diagrammes métastable et stable superposes……16

Figure I -8 – Aspect schématique de l'alliage hypoeutectique dans le système métastable, un peu avant d'atteindre le solidus……18

Figure I -9– Aspect schématique après de l'alliage hypoeutectique dans le système métastable, un peu le passage du solidus ……...18

Figure I -10-transformation a l'etat solide d'une fonte grise …20

Figure I -11– Coupe pseudobinaire du diagramme

Fe-C-Si, à 2, 4 % Si ……...22

Figure I -12: Diagramme d'équilibre ternaire

Fe-Fe3P-Fe3C simplifié ……23

Figure I-13: graphite laméllaire ……25

Figure I-14: graphite en rosettes ……...26

Figure I-15 graphite en lamelles et amas de graphite ……26

Figure I- 16 graphite interdendritique ……....27

Figure I-17 graphite de surfusion……....27

Figure I -18-Schema de la fabrication de piece fonderie ..….31

Figure I- 19: bavure ……32

Figure I- 20: Gales……..……32
Figure I-21: Gales d'angle……...32

Figure I-22: Gerce d'angle……...33
Figure I-23: Soulèvement de moule……..33

Figure I-24: Moule fondu……..34

Figure I-25: Chute de sable……...……...34
Figure I-26: Retassure……...35

Figuire I- 27 Reprise……..36

Figure I-28: bulle……...36

Figuire I- 29Variation…….....37
Figuire I- 30: Bulle …….……37
Figure I- 31non venue ……38
Figuire I-32: Manque……...38
Figure I-33: point dure……38
Figure I-34: inclusion de sable……....39
Figure I-35: Défaut moule ……..39

Chapitre II

(Figure II.1) Exemple : Microstructure d'un échantillon par microscope optique…….43

Partie expérimentale

Chapitre III

Figure III.1: moule des échantillons ……...45
Figure III.2: méthode de coulée échantillons……...45
Figure III.3: Abaque permettant de calculer la résistance à la traction d'un élément de pièce moulée, connaissant sa dureté, ainsi que la résistance et la dureté d'une pièce ou éprouvette de la même fonte, servant de référence……47

Figure III.4: Microscope utilisé pour l'étude

métallographique……..48

Figure III.5: la coulée. (POVAL)……50

Figure III.6: le châssis ……51

Figure III.7 La mise en place des modèles de bois ……....53

Figure III.8: la partie supérieure et inférieure du moule…….56

Figure III.9:LES CORPS DEREFROIDISSEMENT……..57

(Figure III.6.1.a)Tète de bouche à clé FAGICO BEJAIA……59

Figure III.6.1.b) La plaque modèle ……..59

Figure III.6.1.c) Les emprunts du moule avec pose du noyau..59

Figure III.6.1.d) La coulée ……..60

Figure III.6.4.a) Cadre « SDC »La plaque modèle…….63

Figure III.6.4.b) Les emprunts du moule avec pose du noyau .64

Figure III.6.4.c La pièce brute……64

Figure III.5.a Cadre « SDC »……...65

FigureIII.6.7.a) contre poids ……...67

FigureIII.6.7.b La plaque modèle ……...67

FigureII.7.1.a BAVURE……...70
FigureII.7.1.b INCLUSION DE SABLE ……...70
FigureIII.7.1.c BULLE ……...71
FigureIII.7.2.a La gale ……....71

FigureIII.7.3.a non venu ……71

Chapitre IV

(Figure .IV. a) Résistance à la traction RM d'une fonte grise en fonction de sa teneur de manganèse %Mn et le soufre %S……..…72

(Figure .IV .b) Résistance à la traction RM d'une fonte grise en fonction de sa teneur de Silicium %Si et la saturation de carbone %Sc……..73

(Figure .IV. c) Dureté HB d'une fonte grise en fonction de sa teneur de carbone C ……73

Figure IV. 2.a) Les structures métallographie des échantillons de POVAL ……77

Partie théorique :

Chapitre I

Tableau .I-1 Propriétés de la ferrite en fonction de la teneur Si…..24

Tableau.I-2 Influence du carbone total sur la dureté

d'une fonte blanche……..25

Tableau.I-3 – Humidité……29

Tableau.I-4 Essais de perméabilité, compression et cisaillement…..29

Chapitre II

Tableau II -1 : classification d'après essai sur barreau coulé a part..40

Tableau II -2: dureté d'échantillons de fonte graphite lamellaire rendus ferritiques par traitement thermique ……41

Partie expérimentale

Chapitre III

Tableau III.1: analyse chimique et mécanique……50

(Tableau III.6.3.a)La microstructure de l'échantillon (POVAL) traité Tète de bouche à clé……..62

Tableau III.6.6.a) La microstructure de l'échantillon (POVAL) traité Cadre « SDC »……..66

(Tableau* III.6.9.a)*La microstructure de l'échantillon (POVAL) traité Contre poids ……..69

Chapitre IV

Tableau IV. A) les résultats micrographie de l'échantillon

(CONTRE POIT)……81

Tableau IV. B) les résultats micrographie de l'échantillon

(Cadre 'SDC')……82

Tableau IV. c) les résultats micrographie de l'échantillon

(Tète de bouche à clé)……...83

Abréviation

FGL : fonte grise à graphite lamellaire
Fe : Fer
C : Carbone
Si : Silicium
P : Phosphore
S : Soufre
Ti : Titan
Cu : Cuvier
Ni : Nickel
Cr : Chrome
Mo : Molybdène
Céq : Carbone équivalant
Ct : Carbone total
Sc : L'indice de saturation
K : Coefficient de graphitisation
HB : La dureté du BRINELL
Rm : Résistance maximal
Rr : Résistance de la rupture
Re : Limite élastique
S : La surface
Tc : Température de fusion de carbone

I-1Historique de la fonderie

Le terme fonderie définit aussi bien les installation métallurgique dans lesquelles on fond les métaux et ou on les coule dans des moules pour leur donne la forme des objets a fabrique, que l'ensemble des opérations nécessaires a leur production. c'est tout a la fois , un art et un métier dont les origines remontent a plusieurs millénaires avant notre ère utilisant et mettant en œuvre des technique aussi diverses que variées ,comme le moulage, le noyautage, la métallurgie ,la fusion et la coulée des métaux et alliages métalliques ,les traitement thermique ,la finition ,les parachèvement des pièces ,etc.

La fonderie c'est aussi une industrie produisant des pièces de toutes natures finies ou semi-finies, en tout quantité de la façon la plus économique a partir de métiers premiers brutes (métaux, ferrailles, déchets de tôles, bocages), contrairement a certain techniques concurrentes (forgeage, mécano, soudage …) utilisant des produits semi-finis comme les tôles neuves et billettes en acier de toues, élabores par la sidérurgie.

On s'adresse a elle soit pour la fabrication des pièces de formes compliquées qu'il serait difficiles ou impossible de réaliser par tout autre procède ;soit pour de production des prix de revient plus intéressants de pièces simples ,soit encore pour profiter de propriétés physique ou d'utilisation (dilatation ,corrosion , frottement ,usures, basses et hautes températures)et des propriétés mécanique des divers métaux et alliages coules, soit enfin pour couler des alliages non corrodables ou difficilement usinable .

De plus, la fonderie est une industrie économe en énergie, grâce a l'utilisation immédiate du métal liquide dont l'élaboration peut nécessiter, par exemple 650 kWh/t pour la fonte grise au gros four a induction basses fréquence.

A cela s'ajouter les progrès fait en fonderie notamment dans les domaines de la précision dimensionnelle, qui entraine souvent une réduction des dépeuss de finition (diminution ou suppression de l'usinage par exemple).

I-2-introduction général :

Les fontes sont des alliages fer carbone qui contiennent le plus souvent entre 2,8 et 4 % de carbone. Elles se distinguent des autres alliages par leur excellente coulabilité (ce terme regroupe l'inertie thermique et la fluidité de l'alliage en fusion).

Ces alliages sont obtenus par solidification, et ont des caractéristiques qui dépendent des différentes phases qui les constituent (phases semblables à celles des aciers dans lesquelles vient s'insérer le graphite). L'apparition de ces phases s'explique à partir des phénomènes physiques liés à la solidification : la germination et la croissance.

Les pièces en fonte à graphite lamellaire sont obtenues à partir des technologies de moulage les plus répandues pour les alliages à haut point de fusion. Le moulage en sable à vert, associé aux différents procédés de noyautage, est le plus souvent utilisé pour l'obtention des pièces en fonte grise. Ce procédé, avec sa précision dimensionnelle, permet un passage rapide au produit fini en limitant les opérations d'usinage. Cette technologie de faible coût de transformation permet d'associer dans une même pièce plusieurs fonctions d'un système complexe en adaptant les formes et les dimensions. Ces considérations fonctionnelles sont également associées à l'optimisation de l'esthétique. [19]

Toutes ces aspects apportent aux produits moulés en fonte à graphite lamellaire un avantage économique dû :

- au faible coût des matières utilisées pour l'obtention des fontes liquides,
- aux nombreux moyens de fusions disponibles pour l'obtention de ces fontes liquides (hauts-fourneaux, cubilots, fours à induction, etc.),
- à la complexité des formes fonctionnelles que l'on peut obtenir avec cet alliage,
- aux propriétés particulières induites par la présence du graphite au sein du matériau.

I-3 -FONTES GRISELAMELLAIRES

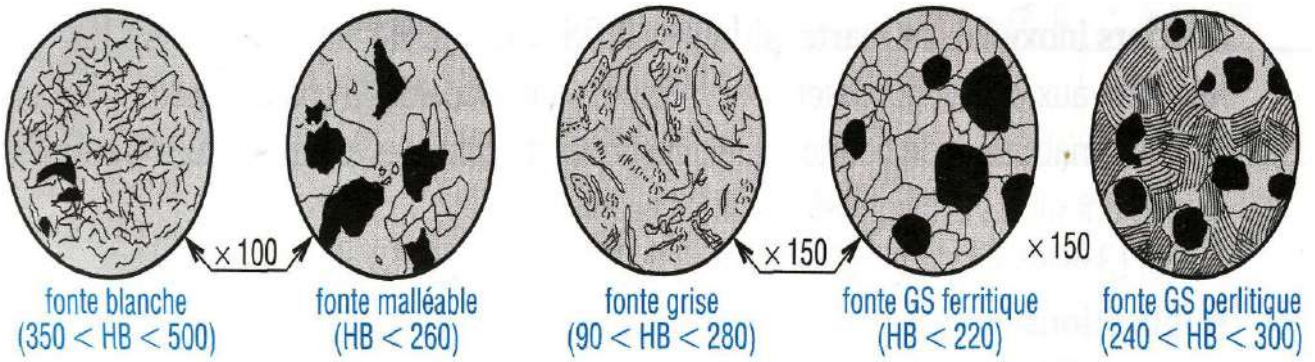
I-3-1-Introduction

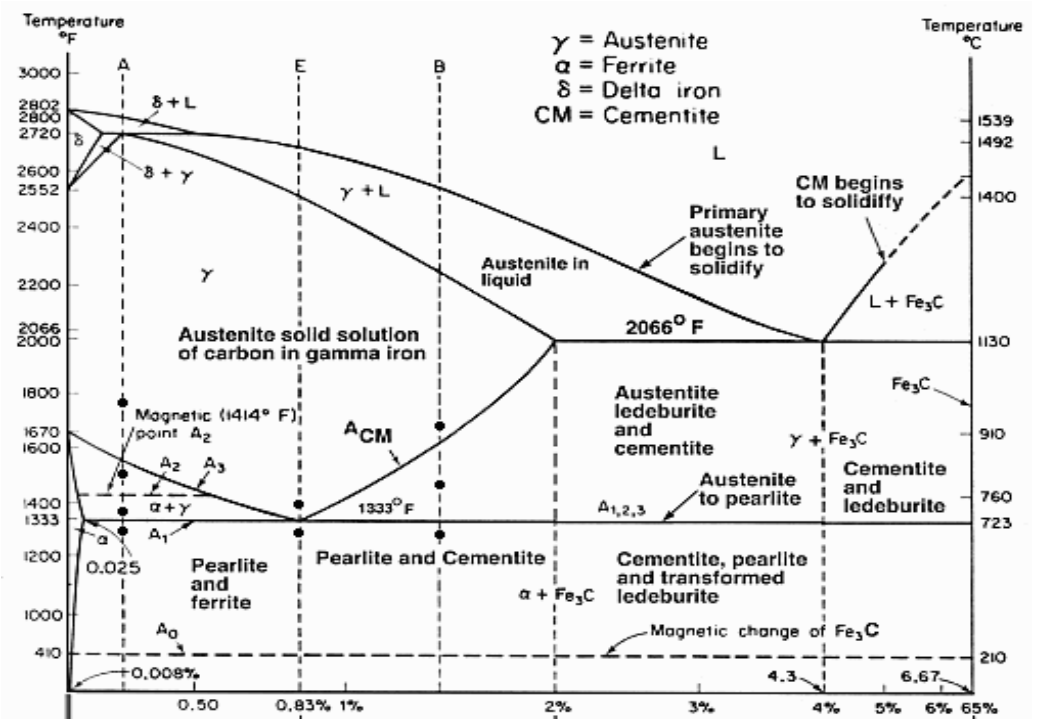
Les fonts sont des alliages dont la teneur en carbone est supérieure à 2% en masse.
Les fontes subissent toujours la transformation eutectique (vers1140°C).

Fontes blanches:

Carbone se retrouve toujours sous forme de cémentite. . [20]

Fontes grises:
Carbone se retrouve sous forme de graphite libre (carbone pur) [20]





Fontes (2% < %mC < 6, 67%)

Figure I-1 : diagramme d'équilibre et types des fontes

- La dénomination de fontes concerne un grand nombre d'alliages de fer don't les microstructures et les propriétés physiques sont très diverses.
- La teneur en carbone est supérieure à 2%.

Elles peuvent être classées en :

I -3-2-Fontes blanches :

Solution de perlite et de cémentite.le carbone des fontes blanches est principalement combiné pour former la cémentite $_{Fe3C}$ elles présentent une très grande dureté, entraînant une très grande résistance à l'abrasion. [20]

I -3-3-Fontes grises

Famille des fontes où le carbone se trouve sous forme de graphite. La structure graphitique du carbone est obtenue par un refroidissement très lent de la fonte, ou l'ajout de composants graphitisants comme le silicium [20]

I -3-4-Les fontes malléables

Coulées sous forme Blanche, elles acquièrent par des recuits appropriés, des caractéristiques de déformation et d'allongement très supérieures à celles des fontes grises lamellaires, ce qui en permet l'emploi pour des pièces soumises à des efforts importants (pièces de sécurité, par exemple). On distingue:

— Les malléables à cœur blanc(dites malléables européennes) obtenues par décarburation des pièces, ce qui limite leur épaisseur.

— Les malléables à cœur noir (dites malléables américaines) obtenues par un traitement thermique de précipitation du graphite sousforme de nodules.

I -3-5-Les fontes à graphite sphéroïdal (GS)

L'obtention de la fonte GS (apparue vers 1948) se fait par un traitement approprié de la fonte liquide avant sa coulée en moule.La solidification du graphite se produit alors sous forme des phéroïdes qui suppriment les effets d'entaille du graphite lamellaire, conférant ainsi à la fonte des caractéristiques mécaniques comparables à celles de l'acier. Elles sont utilisées pour des pièces de sécurité ou fortement sollicitées (vilebrequins de moteurs, bras de suspension, tuyaux centrifugés, etc.)

I -3-6-Fonte GV (graphite vermiculaire)

Fonte dans laquelle le graphite se trouve sous forme comprise entre les lamelles et les sphères. Cette microstructure particulière est obtenue par l'ajout de magnésium à teneur plus faible que pour les fontes à graphite sphéroïdal (généralement aux environs de 0.020 % contre 0.035 % mini pour les FGS).

I -3-6-Fonte GL (graphite lamellaire)

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 résistance à la corrosion et à la déformation à chaud ;

• très bonne absorption des vibrations ;

• stabilité dimensionnelle (réalisation de machine outil silencieuse et stable géométriquement) ;

• excellente coulabilité ;

• prix du métal peu élevé ;

Les principaux défauts:

• relativement fragile comparé aux aciers et au fonte GS

Les principales utilisations:

• toutes pièces mécanique (différentes grades de résistance) ;

• bâtis de machines outils, bonne résistance aux vibrations

I -3-7-Carbone equivalent

L'équivalent en carbone est un titre fictif qui permet d'apprécier rapidement si, en principe, une fonte donnée est hypoeutectique, eutectique, ou hypereutectique.L'équivalent en carbone Céq.est défini comme suit dans lanorme NF A 32-101 (annexe B) de juin 1987:**[1]**

Céq= C+1/3(si+p)

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

Céq=C+1/4 Si+1/2 P ou oncore C éq=C+1/4,5 Si+1/2 P

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

I -4-Composition chimique:

I -4-1- Facteurs déterminant la structure et les propriétés

Les propriétés des fontes sont déterminées avant tout par leur structure, laquelle dépend d'une série de facteurs de fabrication qu'il appartient au fondeur de fixer compte tenu de sa technique propre.

Le plus souvent, même la structure n'a pas à être précisée par l'utilisateur qui peut se contenter d'un contrôle (normalisé le cas échéant) des caractéristiques mécaniques essentielles ; a fortiori, la composition chimique, qui est un facteur de fabrication parmi d'autres, n'apas à être imposée au fondeur : nous espérons le faire comprendre dans la suite de ce paragraphe, rappel de considerations développées dans les articles Élaboration des fontes (hormis fontes

Malléables)[M 760] et Élaboration des fontes malléables[M 770] dans ce traité

Carbone et silicium:

Les deux éléments (carbone et silicium) ont une influence directrice essentielle sur le passage de la forme métastable à la forme stable de la solidification

il était impossible de caractériser les propriétés mécaniques d'une fonte en se fondant sur la composition chimique. Toutefois il convient de noter les points suivants qui restent valables pour toutes les fontes ordinaires

Influence des élément normauex

I -4-2-Manganèse. Soufre. Phosphore:

Le manganèse et le soufre se combinent en partie pour constituer des inclusions de sulfures de manganèse (et de fer) dont l'influence sur les propriétés est négligeable [2] . teneur en manganèse des fontes ordinaires est généralement inférieure à 1 %. Il est souhaitable que la teneur en soufre ne dépasse pas 0,12 %. Le phosphore des fontes ordinaires qui en contiennent suffisamment (plus de 0,30 %). L'influence du phosphore est complexe, car la répartition de l'eutectique phosphoreux varie considérablement suivant la vitesse de refroidissement . Lorsque celle-ci est grande (épaisseur des pièces voisine de 10 mm dans la coulée en sable), l'eutectique phosphoreux est réparti en un réseau continu délimitant complètement les cellules eutectiques dès que la teneur en phosphore atteint 0,4 %. L'existence d'un tel réseau contribue à diminuer sensiblement la résistance à la traction

Au contraire, dans des conditions de refroidissement normales, l'eutectique phosphoreux est réparti uniformément dans toute la pièce et joue un rôle sensible, mais nettement moins défavorable. au-delà d'un taux de phosphore de 0,3 % environ, une augmentation de la teneur en phosphore de 1 % accroît la dureté Brinell de 30 à 40 points, diminue le module élastique de 10 000 MPa. Par ailleurs, il exerce une influence défavorable sur la résistance au choc des fontes). Sur la résistance à la traction, l'effet est variable. L'ensemble des cinq éléments C-Si-Mn-S-P constituent les éléments principaux que le fondeur dose couramment par voie chimique ou spectrographique.

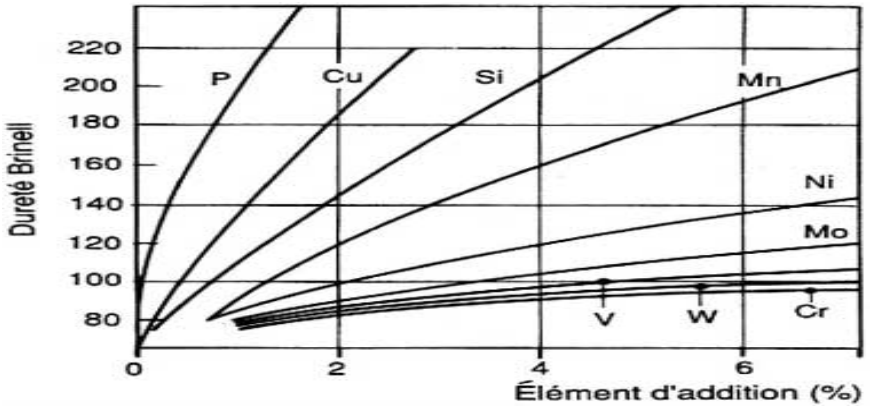


Figure I -2: Influence de quelques éléments d'additionsur la dureté de la ferrite

I -5Elaboration de la fonte

On distingue deux types de fontes selon leur mode d'élaboration et leurdestination.

I -5 -1-Les fontes de première fusion

Elles sont élaborées à partir duminerai de fer au haut-fourneau (HF) à coke.Ce sont pour 90% des fonts blanches destinées à la transformation en acier par affinage et pour 10% des fontes grises destinées directement soit au moulage de grosses pièces (tuyaux..) soit au moulage de gueuses qui eront ultérieurement refondues, en fonderie ,au cubilot ou dans des fours électriques.[3]

I -5 -2-Les fontes de deuxième fusion

Elles sont élaborées en fonderie par refusion d'un lit de fusion constitué de gueuses de première fusion,de fonts ourejets de fonderie de deuxième fusion, de ferrailles ou aciers de récupération. Ces ont soit des fonts grises, soit des fonts à graphite sphéroïdal (G.S) soit des fonts blanches destinées aux traitements de malléabilisation. Elles servent au moulage de tout espièces mécaniques.

Les appareils de refusion principalement utilisés sont:

-1) Lecubilot
-2) Le four à induction
-3) Le four à arc HEROULT à garnissage basique.

Les petites fonderies qui limitent leur fabrication aux fontes utilisent des cubilots.

Les fours à arc servent de préférence à l'élaboration d'aciers fin sou d'aciers alliés.Certaines fonderies les utilisent pour l'élaboration de fontes dites «électriques» à très basse teneur en soufre dont le graphite est très régulièrement distribué.

Les fonderies modernes produisant un fort tonnage s'équipent de préférence en fours à induction polyvalents .La métallurgie du four à inductions'apparent à celle de l'ancien procédé dit «au creuset». Elle consiste à fondre les charges nécessaires formantunlit de fusion à l'abridetoutepollution extérieure. Quelques additions judicieuses permettent d'obtenir la composition finale souhaitée.

I -5 -3-Le four àinduction

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

les pertes au feu sont réduites et constantes,

les risques d'oxydation et d'absorption des gaz très diminués, sauf en fours à arcs,

l'obtention des hautes températures est plus facile, ce qui est favorable auxréactions chimiquesd'affinage,

En fin, les nuisances au poste de travail et la pollution de l'environnement sont engéné rallimitées (sauf pour les fours à arcs bruyants et polluants),

Mais l'énergie électrique est en général plus chère à l'emploi malgré le meilleur rendementdes fours.Parmil es types des fours électriques, [4]

La fusion est assurée par la circulation de courant électrique induit qui par court les ferrailles constituant la charge.Le creuset est ent ouré par un solénoïde par cour u par un courant alternatif de haute fréquence qui crée un flux magnétique alternatif. Les variations de flux magnétique àtravers la charge créent des courants électriques induits (courantdeFoucault) qui génèrent la fusion. Du point devue électrique, ces fours peuvent être assimilés à des transformateurs dont les econdaire, constitué par la charge, serait en court-circuit.

La pénétration des courants de Foucault à l'intérieur d'un conducteur étant d'autant plus faible

Un four à induction se compose principalement des éléments suivants:

1) Le creuset

Le creuset comporte un garnissage réfractaire destiné à recevoir la charge métallique autour duquel est montée une bobine inductrice refroidie à l'eau. Un système de rotation autour d'un axe situé près du bec de coulée permet de vidanger le four (figure1).

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

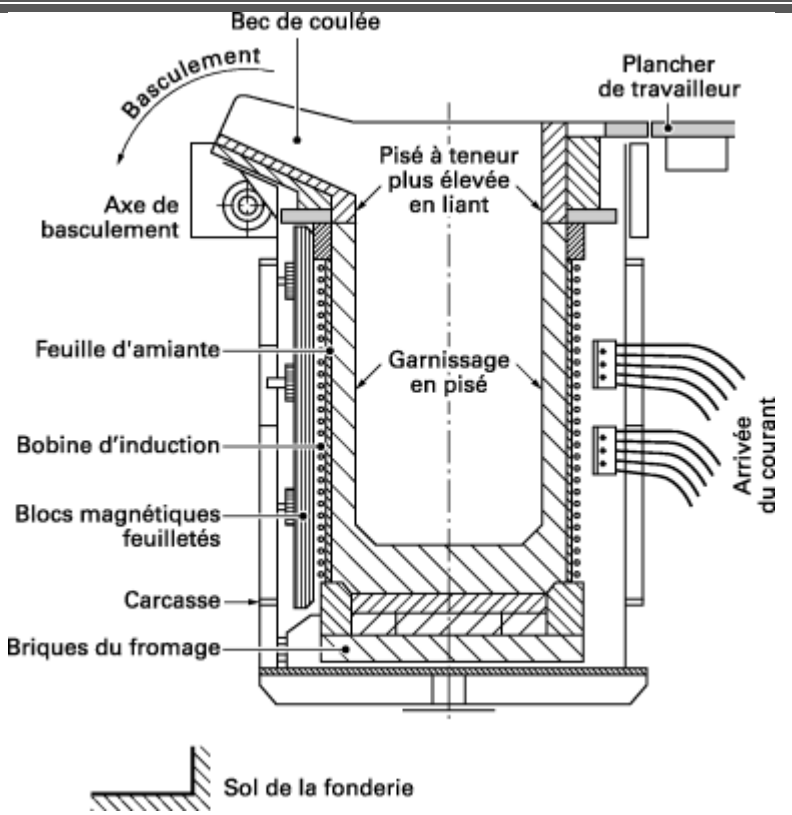


Figure I -3- Four électrique à induction. Schéma type [5]

2) L'inducteur

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

3) Les écrans magnétiques /ouculasses

Pour réduire les fuites magnétiques et éviter l'échauffement de la carcasse métallique, des écrans magnétiques constitués généralement de fibres isolantes sont intercalés entre la bobine et la carcasse.

4) La carcasse

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

5) Le couvercle

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

6) Equipments annexes

a. Captage des fumées

Dans le cas des fours électriques à induction, les emissions de fumes pollutant essont beaucoup plus faibles que dans le cas des fours à arcs puisqu'il n'y a pas d'opération d'affinage qui génèreles gros debits de CO et entraîn différents oxydes. aussi les équipement s retenussont plus légerset moins coûteux. Ils comportent:

- Soit une hotte de captage située au-dessus du four qui integer le bec de coulee azonede décrassage et de chargement;
- soit une enceinte fermée incluant le système de chargement continu et la coulée enpoche.

b.Décrassage

Les gros fours à induction sont souvent equips de manipulateurs de décrassage oud'unbecde décrassage (diamétralement opposé au bec de coulée) qui permettent d'éliminer, rapidementetsans effort manuel, le laitier.

C.Systèmes de chargement et de préchauffage

Les fours de fortes capacités sont souvent équipés de système de chargement continu avecbandes transporteusesetcouloirsvibrantsquialimententdirectementlefour.dans certainscas,un tunnel depré chauffage avec des brûleurs alimenté spardugaz naturel est placéau-dessus ducouloir vibrant.

7) **Installation de puissance électrique**

En marche courante, les fours alimentés en basse fréquence électrique (50 Hz en Europe)

Fonctionnent par transmission de la chaleur à partir du bain liquide.Il est donc nécessaire

De conserver une partie du métal liquide de la coulée précédente (pied debain).
L'utilisation d'une fréquence supérieure ou égale à 250 Hz (moyenne fréquence MF) est suffisante pour assurer l'amorçage sur charge solide. En plus de la flexibilité apportée par l'absence de pied de bain, la montée en fréquence permet d'augmenter la puissance spécifique des creusets, de diminuer lacompensation de puissance réactive et deréduire les coûts d'investissements.actuellement,la plupart des fours de fusion d'acier fonctionnent en moyenne [5]

I -5 -3-1- Schéma des opérations d'élaboration de lafonte

Afin de bien comprendre la fabrication il est indispensable de présenter le schémades opérations tel qu'il peut se présenter pour l'élaboration des fontes et des aciers moulésdans une fonderie moderne (Figure I -4)

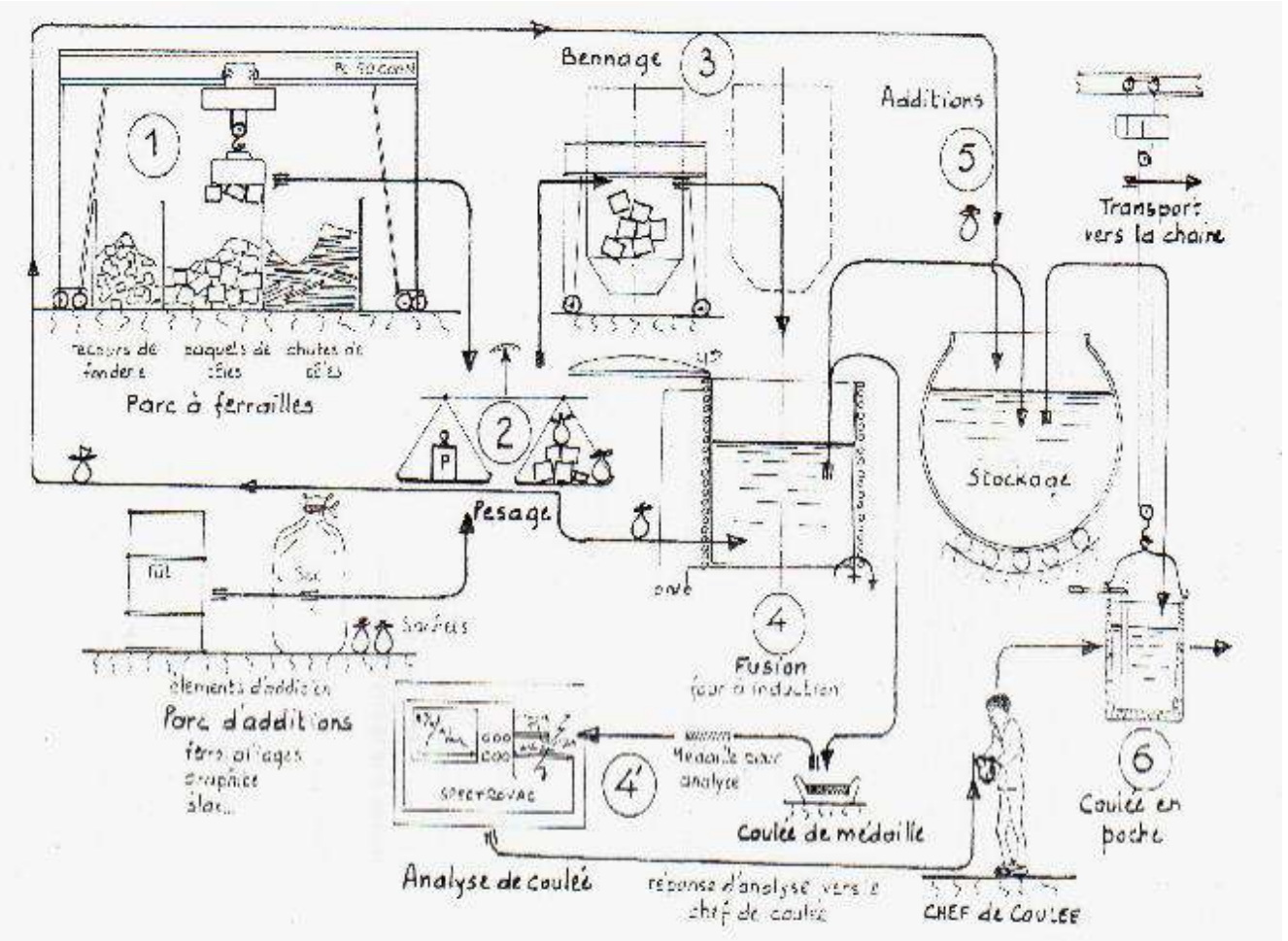


Figure I -4-: Opérations d'élaboration de la fonte de moulage [6]

On distingue les étapes suivantes:

1. Préparation des matières premières (ferrailles +additions),
2. Pesage précis,
3. Bennage des ferrailles vers les fours de fusion,
4. Fusion au four à induction et analyse d'un prélèvement,
5. Additions dans la poche de coulée et parfois nouvelle analyse d'un prélèvement,
6. Transport des poches de coulée vers la chaine de moulage.

I -5 -4-Préparation du lit de fusion:

Les charges sont puisées dans les stocks de matièrespremières.

Au parc à ferrailles où sont classés, par type et analyse chimique:

- Les retours de fonderie constitués par des pièces rebutés, des masselottes, des jets de coulée….
- Les chutes de tôles en vrac, d'acier doux et mi-doux;
- Des paquets de tôles d'acier extra douxcompacté.

-Au parc des matières d'addition où sont observées, en sacs ou fûts, toutes lesadditions susceptibles d'être opérées à la fusion ou en poche de coulée. Citons: les ferro-alliages, legraphite, l'aluminium en barre, le bismuth, le slax, le mischmétal,l'étain…
Ces charges sont pesées avec précision demanière à obtenir par le calcul du lit de fusion,une analyse d'alliage fondu voisine de celle souhaitée [6]

I -5 -4-1-Exemple de lit de fusion pour FGL 20:

Lit de fusion

2.514% de graphite

1.120% de Fe-Si à 65% à grains gros

0.734% de Fe-Mn à 76%

41.666% d'acier extra doux

35.898% de retour de fonte grise

18.068% de fonte hématite

Puis la poche est décrassée en y jetant 0.5 % de slax et en écréman

I -5 -4-2-Fusion des charges

Les charges sont bennées vers le four de fusion, à induction, dans lequel elles sont versées.Elles sont introduites dans un bain résiduel de la précédent coulée. Le creuset du four n'est en effet jamais complètement vidé lorsqu'on réalise une « compagne ». Par exemple on laissera, dans le fond d'un four de capacité quatre tonnes environ, une à deux tonnes du bain liquide résultant de la précédente fusion. de la sorte on:

- Assure production plus homogène;
- Evite les chocs thermiques et mécaniques sur le revêtement réfractaire du creuset;
- Utilise l'inertie thermique du four ce qui diminue les temps de fusion

Pour obtenir les caractéristiques demandées au métal par lecahier des charges,le fondeur doit maîtriser:

-la composition chimique de l'acier (ou de la fonte) requise par le client et/ou les normes applicables. Elle est obtenue par la composition de la charge métallique à laquelle il faut intégrer les pertes au feu;

-la température de coulée qui doit être déterminée avec précision car ce paramètre est de terminant pour assurer le remplissage des moules,la santéinterne des pièceset également pour obtenir des conditions de solidification et une structure métallographique correcte.

Contrairement aux four sà arcs,les fours à inductions prêt entmal aux opérations métallurgiques de type décarburation ou brassage métal/laitier car, d'une part, le lait iernon conducteur électrique reste froid donc inefficace et,d'autre part ,les conditions hydrodynamiques rapport surface /hauteurd'acier liquide sont très défavorables. enfait,ces fours sont considérés comme des simples engins de fusion oùl'analyse finale est obtenue à partir du lit de fusion et des pertes au feu. L'absence d'opération métallurgique conduit à sélectionner avec soin les ferrailles et les ferro alliages et à utiliser des charges plus nobles donc plus coûteuses que dans le cas des fours à arcs [5].

I -5 -5-Présentation du cubilot

Le cubilot est un appareil simple [21] constitué principalement d'une virole cylindrique garnie de réfractaire (**Figure I -4.a)**. On distingue les principales parties constitutives suivantes :
— le creuset, garni de réfractaire, muni des sorties de fonte et de laitier ;
— les tuyères raccordées au circuit d'air ;
— le fût, ou colonne, garni de réfractaire ;
— le gueulard;
— la cheminée. On introduit :
— par le gueulard sous forme de charges alternées : les matières métalliques à fondre, le coke, le fondant ;
— par les tuyères : l'air, éventuellement l'oxygène.
On en retire ou il en sort :
— par les orifices prévus dans le creuset : la fonte, le laitier ;
— par la cheminée : les fumées.

On définit, d'une part les facteurs de marche (masse et qualité des charges métalliques, de coke et de fondant, débits d'air et d'oxygène), d'autre part les résultats de marche ou critères de marche (production, température, composition et propreté de la fonte, quantité et composition du laitier et des fumées).

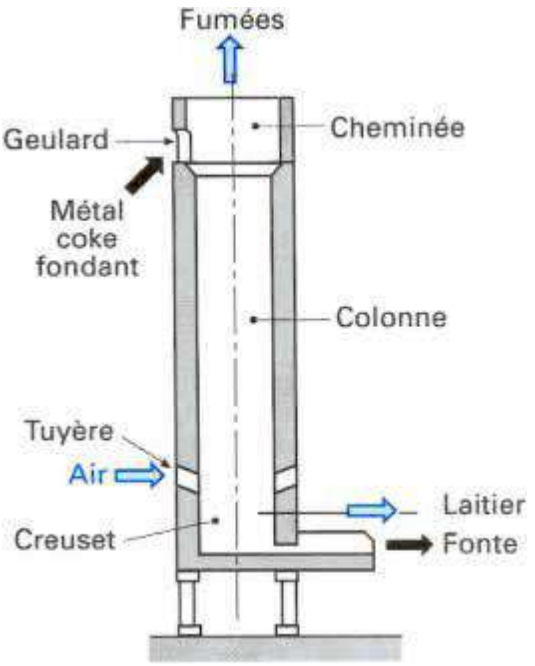


Figure I -4.a) – Schéma d'un cubilot

I -6-Diagramme d'equilibre:

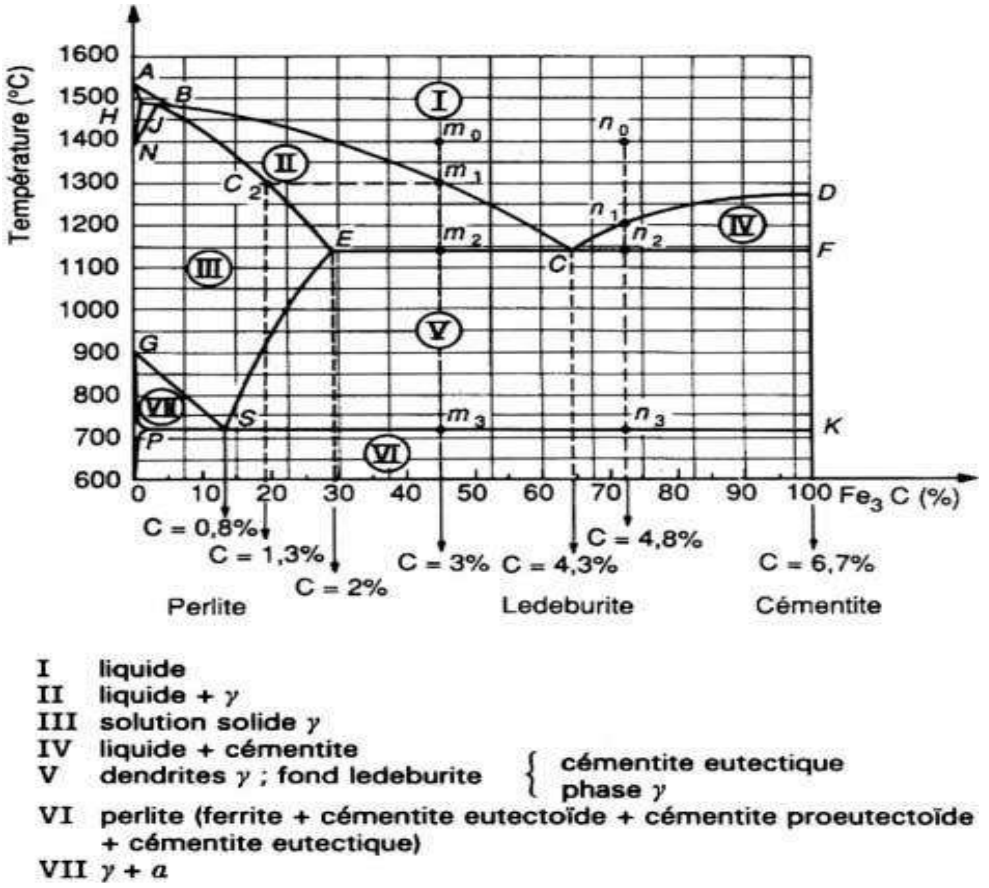
Le double diagramme d'état binaire Fe-C a fait – et fait encore – l'objet de très nombreux travaux.
La solidification selon le système fer-graphique est le mode normal de formation des structures graphitiques, bien qu'exceptionnellement
– dans des régions de transition entre structures graphitiques et structures carburiques, par exemple – le graphite puisse paraître se former indirectement par décomposition de la cémentite [1]
Les tracés des diagrammes Fe-Fe3C et fer-graphite sont par conséquent d'une importance pratique et théorique fondamentale.
On les représente soit séparément (figures **I -5** et **I -6)**, soit sur un même graphique
(figure **I -7**).

La détermination expérimentale du premier (figure **I -5**) présente la difficulté due au fait que le carbure Fe3C est une phase métastable.
Toutefois, on sait que la courbe de liquidus correspondante aboutit au point *D* (C = 6,67 % ; θ = 1 252 oC), valeur obtenue par calcul thermodynamique.
La détermination expérimentale du second diagramme (figure **I -6**) présente une incertitude différente due à la ségrégation du graphite par densité dans le voisinage du liquidus hypereutectique ; on peut toutefois estimer que la courbe de saturation correspondante, beaucoup plus inclinée que dans le diagramme métastable, passe par le point *D* ' (C = 6 % ; θ = 1 790 oC).
Bien entendu les deux diagrammes ont en commun les parties ne mettant en jeu ni le graphite ni la cémentite (figure **I -7**), la thermodynamique montre que les courbes de dépôt de graphite sont

nécessairement à gauche des courbes de dépôt de cémentite ; il en résulte que les températures et compositions des deux eutectiques sont légèrement différentes :

— eutectique graphique : C = 4,25 %, θ = 1 153 C ;

— eutectique carburique : C = 4,30 %, θ = 1 147 C.



I liquide
II liquide + γ
III solution solide γ
IV liquide + cémentite
V dendrites γ ; fond ledeburite { cémentite eutectique / phase γ
VI perlite (ferrite + cémentite eutectoïde + cémentite proeutectoïde + cémentite eutectique)
VII γ + α

Figure I -5 – Diagramme métastable FeFe3C

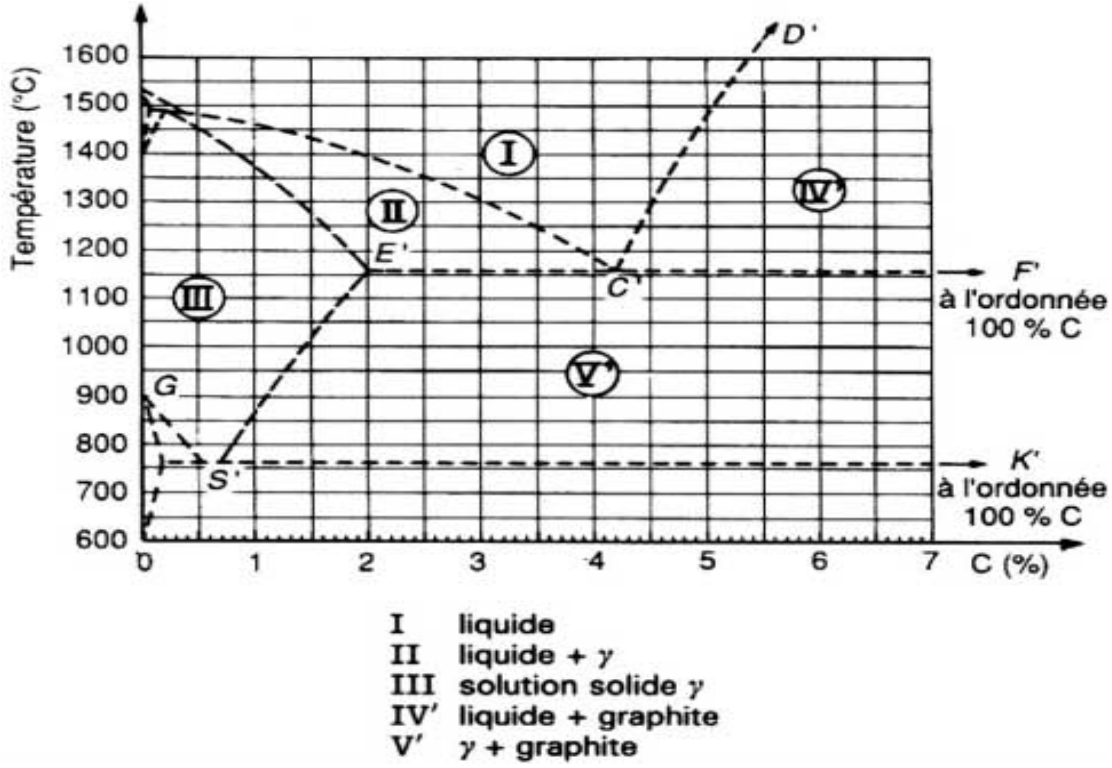


Figure I -6 – Diagramme stable fer-graphite

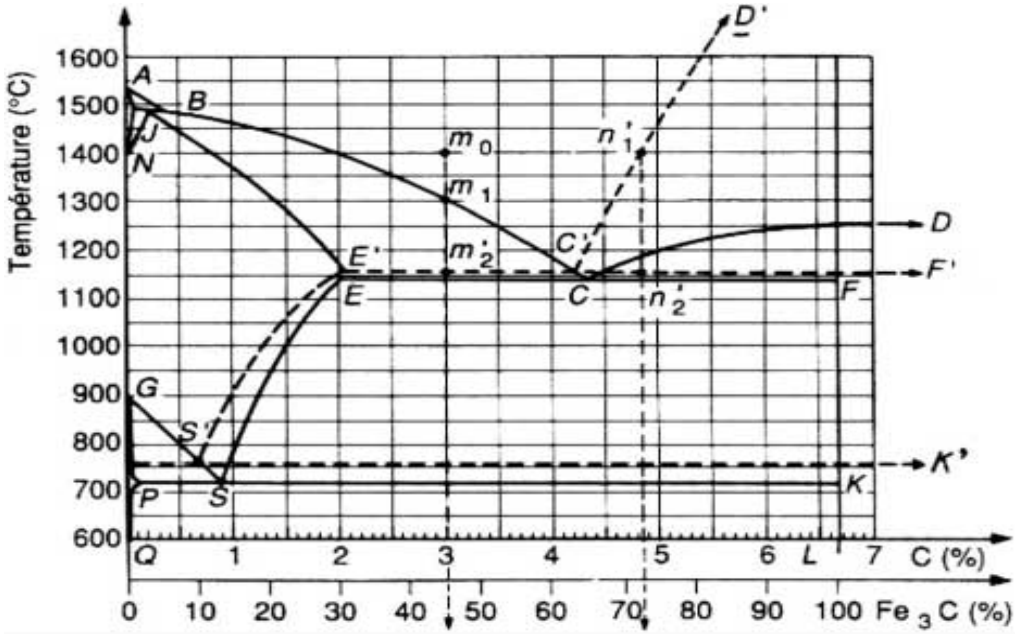


Figure I -7– Diagrammes métastable et stable superposes

En *m*1 , la solidification commence ; une solution solide se dépose sous forme de dendrites dont la teneur en carbone est celle du point *C*2 (environ 1,3 % de C).
Entre 1 300 et 1 147 oC (horizontale *EF*), la solidification se poursuit ; les dendrites s'épaississent par dépôt de couches successives de plus en plus riches en carbone, au

détriment de la phase liquide qui s'enrichit également en carbone. La diffusion du carbone étant très rapide, la solution s'homogénéise plus ou moins au fur et à mesure du grossissement des dendrites.
Juste avant 1 147 oC (*solidus*) l'alliage (figure **I -8**) comprend une partie solidifiée sous forme de dendrites de solution solide γ à 2 % C, baignant dans un liquide contenant 4,3 % de C suivant le rapport massique :

Solution solide γ / liquide = *m*2*C* /*m*2*E*

À 1 147 oC la partie liquide se solidifie pour donner un *eutectique* (*ledeburite*) formé d'un agrégat d'îlots de solution solide à 2 % Csur un fond de cémentite Fe3C à 6,7 % C.
Comme précédemment, on a : solution solide γ /eutectique = *m*2*C* /*m*2*E*
Pour l'eutectique on a : solution solide γ /cémentite eutectique = *CF* /*CE*
soit (6,7 – 4,3)/(4,3 – 2) = 1,04.
C'est dire que l'eutectique est constitué approximativement par parties égales de solution solide γ à 2 % C et de cémentite eutectique à 6,7 % C.
L'écart de température *m*2*m*1 au cours duquel s'est effectuée la solidification représente ce qu'on appelle l'*intervalle des olidification.*
Plus la fonte est pauvre en carbone, plus cet intervalle est grand, et plus les dendrites de solution solide γ sont volumineuses.
À une température légèrement inférieure à 1 147 oC, la fonte à 3 % C est entièrement solidifiée et comprend (figure **I -9)** :
— une solution solide γ à 2 % C, soit en dendrites, soit eutectique ;
— de la cémentite eutectique à 6,7 % C, dans le rapport :

$$\frac{\text{solution solide}\gamma\ (\text{dendrites}\ +\ \text{eutectique})}{\text{cémentite eutectique}} = \frac{m2F}{m2E}$$

À partir de cette température, les transformations qui vont apparaître au cours du refroidissement seront des transformations à l'état solide.
Pendant le refroidissement de *m*2 à *m*3 , la proportion de solution solide γ diminue au bénéfice de la cémentite puisque le rapport (solution solide γ /cémentite) passe de *m*2*F* /*m*2*E* à *m*3*K* /*m*3*S* qui est plus faible.

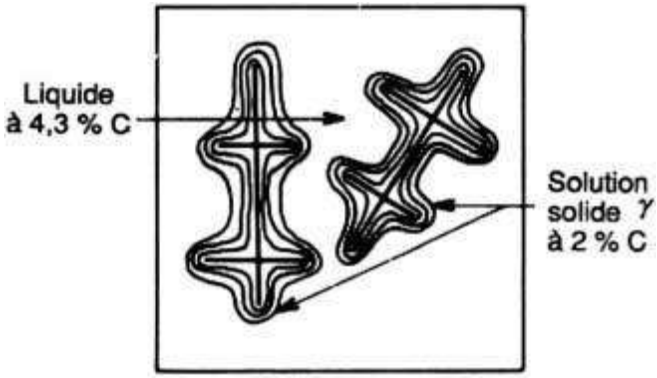


Figure I -8 – Aspect schématique de l'alliage hypoeutectique dans le système métastable, un peu avant d'atteindre le solidus

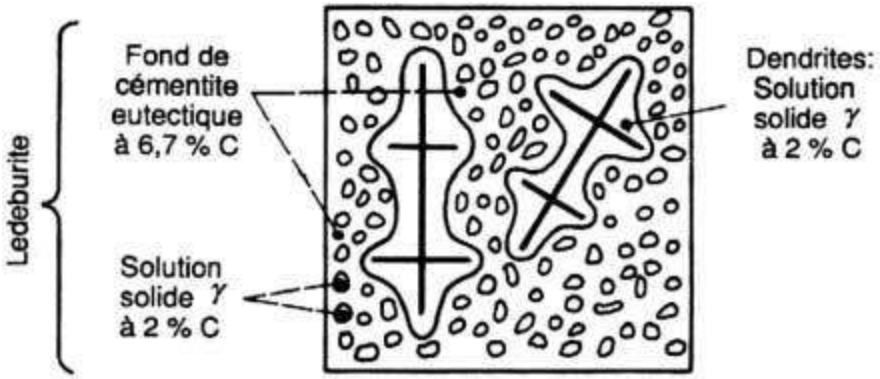


Figure I -9– Aspect schématique après de l'alliage hypoeutectiquedans le système métastable, un peu le passage du solidus

Cela provoque la formation de cémentite *proeutectoïde* sur les contours du domaine de la solution solide γ avec un appauvrissement de cette dernière en carbone (de 2 % à 0,8 % C). À 723 oC apparaît le phénomène *eutectoïde* qui transforme toute la solution solide γ à 0,8 % C en un agrégat appelé *perlite* et constitué par la juxtaposition de lamelles de fer α alternant avec des lamelles de cémentite.
On a :

perlite/cémentite = $m_3 K/m_3 S$ et pour la perlite :
Fe α/cémentite eutectoïde = SK/SP = (6,7 – 0,8)/0,8 = 7,4 c'est-à-dire qu'il y a alors de 7 à 8 fois plus de fer α ou *ferrite* que de cémentite eutectoïde.
Il est à noter que l'apparition de l'eutectoïde brouille le dessin des dendrites du début de la solidification.
Aussitôt passée la température eutectoïde, la fonte à 3 % C comprend essentiellement du fer α ou ferrite et de la cémentite sous les trois formes : eutectique, proeutectoïde et eutectoïde, dans le rapport :

fer α/cémentite = m_3K /m_3P

Au-dessous de m_3, la fonte continue à se refroidir sans autre transformation et, à froid, la structure comprend essentiellement des plages de perlite sur un fond de cémentite (eutectique et proeutectoïde).
C'est la structure caractéristique des fontes blanches ainsi nommées en raison de la couleur de leur cassure.

I -6-1- Étude du refroidissement d'un alliage hypereutectique (système métastable)

En raisonnant comme pour le cas précédent, on constate au refroidissement,
à partir de n_0, de n_1 à n_2 (figure I -5) une solidification progressive par dépôt de cristaux de cémentite *proeutectique* (ou *primaire)* avec appauvrissement en carbone du liquide restant.
À 1 147 oC, il y a solidification de l'eutectique à 4,3 % C avec : cémentite proeutectique/eutectique = *n*2*C*/*n*2*F*
Et :

$$\frac{\text{ferrite}}{\text{cémentite}} = \frac{n3K}{n3P} \quad \text{ET} \quad \frac{\text{ferrite}}{\text{cémentite}} = \frac{n3K}{n3S}$$

I -6-2- Diagramme stable fer-graphite:

I -6-2-1-Étude du refroidissement d'un alliage hypoeutectique (système stable)

Comme précédemment (figure **I -6**) l'alliage est pris à 1400 oC, le point figuratif étant en m_0 **(figure I -7)**.a 1300 oC, début de solidification en m1sous forme de dendrites de solution solide γ; à 1 153 oC (au point) l'eutectique se solidifie en agrégat de lamelles de graphite dit eutectique dans une solution solide γà 2 % C.l'alliage solidifié comprend à ce moment :

— des dendrites de solution solide γà 2 % C ;

— du graphite en lamelles qui se dépose dans la solution solide γde l'eutectique.

a partir de ce moment et au cours du refroidissement qui suit,quatre possibilités peuvent se présenter.
1re possibilité: si la vitesse de refroidissement et les facteurs d'élaboration sont tels que l'alliage continue à suivre le diagramme stable ; on aboutit en S' (**Figure I -10**) ; de E' à la solution solide s'est appauvrie en carbone jusqu'à 0,7 % avec dépôt de graphite dit proeutectoïde (ce graphite se dépose sur les lamelles existantes).

Ace moment, l'alliage correspond à un acier à 0,7 % C contenant2,3 % de graphite séparé sous forme de lamelles.

On doit admettre que c'est à cette température S' que l'alliage rejoint le diagramme métastable et se refroidit suivant S'S la solution solide s'enrichit en carbone jusqu'à 0,8 % et il se forme dela ferrite.

En S, l'eutectoïde apparaît exactement comme dans le cas précédent en donnant laperlite.

Ala température ambiante, la fonte à 3 % de carbone, suivant le processus qui vient d'être décrit, doit comprendre:

_perlite et ferrite correspondant à un acier hypoeutectoïdeà 0,7 % C ;

_ graphites eutectique et proeutectoïde.

2eme**possibilité** : si les conditions sont différentes, le passage peut se produire plus tôt, par exemple à la verticale du point **E**, c'est-à-dire aussitôt après la formation de l'eutectique.

En **E'1**, l'alliage rejoint le diagramme métastable et, le refroidissementcontinuant, il y a dépôt de cémentite proeutectoïde aux dépens de la solution solide γ dont la teneur en carbone baisse jusqu'à 0,8 %

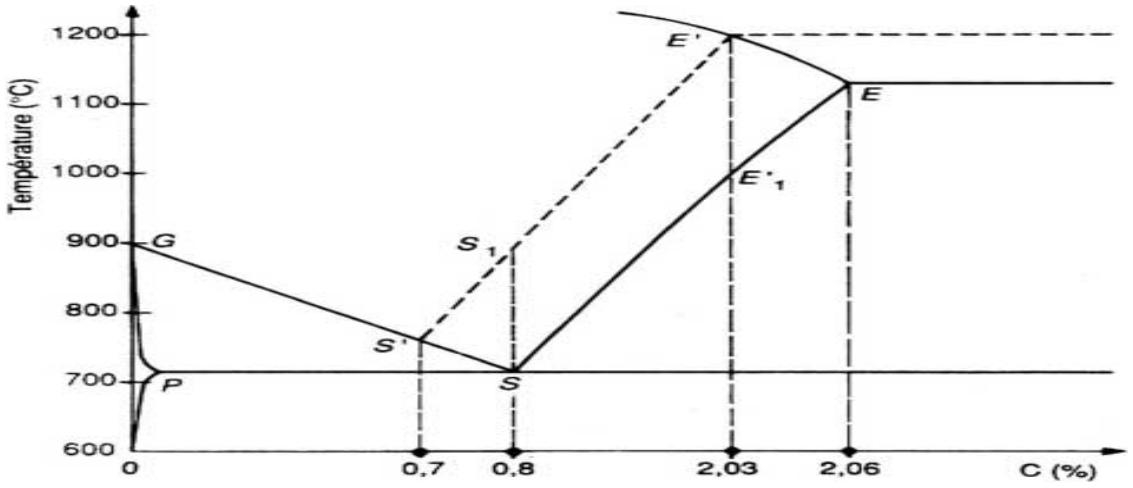


Figure I -10-transformation a l'etat solide d'une fonte grise

En S, l'eutectoïde se forme comme précédemment et la structure finale comprend:

_Perlite et cémentite proeutectoïde, correspondant à un acierhypereutectoïde à 2 % C ;

_Graphite eutectique

3eme**possibilité**: entre les deux cas qui viennent d'être examinés, lepassage d'un diagramme à l'autre peut se faire en un point quelconque situé sur E'S'.

Si le passage se fait en S1, sur la verticale de S, il y aura dépôtde graphite de E' à S1; partant de S1, le refroidissement amèneral'alliage directement en Savec formation de l'eutectoïde perlite (sans ferrite ou cémentite proeutectoïde).

A 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 perlitiquealors que les précédentes sontdites respectivement à ferriteà gauche de la ligne S1S, et à cémentiteà droite de cette même ligne.

4epossibilité: enfin, la vitesse de refroidissement au voisinagede 720 oC est assez faible et le graphite assez fin, l'alliage peutachever complètement ses transformations suivant le diagrammestable (figure 2). Quand son point représentatif atteint S', l'austénite à 0,7 % de carbone se décompose en ferrite et graphite (ce dernier précipitant sur les lamelles préexistantes), de telle sorte que la structure ne présente plus en définitive que ces deux phases

I -6-2-2-Étude du refroidissement d'un alliage hypereutectique (système stable):

Une telle fonte se différencie de la précédente uniquement pendant la durée de la solidification. En arrivant en (figure 3), La solidification commence par un dépôt de graphite ; à partir de le dépôt augmente en formant grosses lamelles de graphite dit primaire.

En la solidification eutectique se produit avec un dépôt de graphite nettement plus fin, comme dans le cas précédent

À partir de ce moment tout se passe comme pour les fontes hypoeutectiques pendant refroidissement.

Finalement, la structure est celle qui correspond aux fontes hypoeutectiques avec, plus, du graphite primaire en grosses lamelles.L'essentiel à retenir de cet examen sommaire des diagrammesd'équilibre, c'est que, pour une même fonte, suivant les vitesses derefroidissement et les facteurs d'élaboration, les structures finalespourront être très différentes, avec toutes les conséquencespossibles sur les propriétés mêmes de l'alliage

I -6-2-3-Système fer-carbone-phosphore:

Dans les fontes industrielles courantes, la teneur en phosphoreest comprise entre 0,03 et 1,2 % ce qui amène, par analogie avecla classification des producteurs de fonte neuve, adistinguer entreles fontes hématites(P < 0,15 %), les fontes phosphoreuses (P > 1 %)et les qualités intermédiaires qu'on pourra dire semi-hématitesousemi-phosphoreusesselon qu'elles seront plus proches de l'une oude l'autre des catégories précédentes.

L'introduction du phosphore dans un système fer-carbone modifie profondément le mécanisme de solidification.

Nous donne rons pour illustrer l'influence de cet élément, la projection du diagramme ternaire Fe-Fe3C-Fe3 P (**Figure I -12**), étant entendu que, dans sa partie utile ici, le diagramme stable Fe- Pgraphite en est probablement très peu différent.

L'important est la formation d'un eutectique ternaire à bas point de fusion (953 oC) et contenant 6,9 % P et 2,4 % C (en E1). Or, en raison de la faible solubilité du phosphore dans l'austénite, le constituant dit eutectique phosphoreuxou steaditeapparaît effectivement (quoiqu'en quantité négligeable dans les fontes hématites) dans toutes les fontes industrielles sous la forme d'un agrégat de phosphure de fer Fe3P, d'austénite (transformée ultérieurement

en ferrite ou en perlite) et, dans certains cas, de carbure de fer Fe 3 C. Si, en raison de la graphitisation naturelle, le carbure de fer ne se forme pas, ou s'il est décomposé artificiellement par recuit, l'eutectique phosphoreux ne contient plus que Fe 3P et l'austénite transformée : il est dit alors pseudobinaire, pour ne pas le confondre avec l'eutectique binaire du système Fe-P (à 10 % de phosphore celui-là ; température 1 020 o C).

La bonne connaissance du double diagramme Fe-C ainsi que de la forme générale des diagrammes Fe-C-Si stable et Fe-C-P est indispensable pour l'interprétation des propriétés essentielles des fontes grises. On peut admettre que les influences de silicium et du phosphore

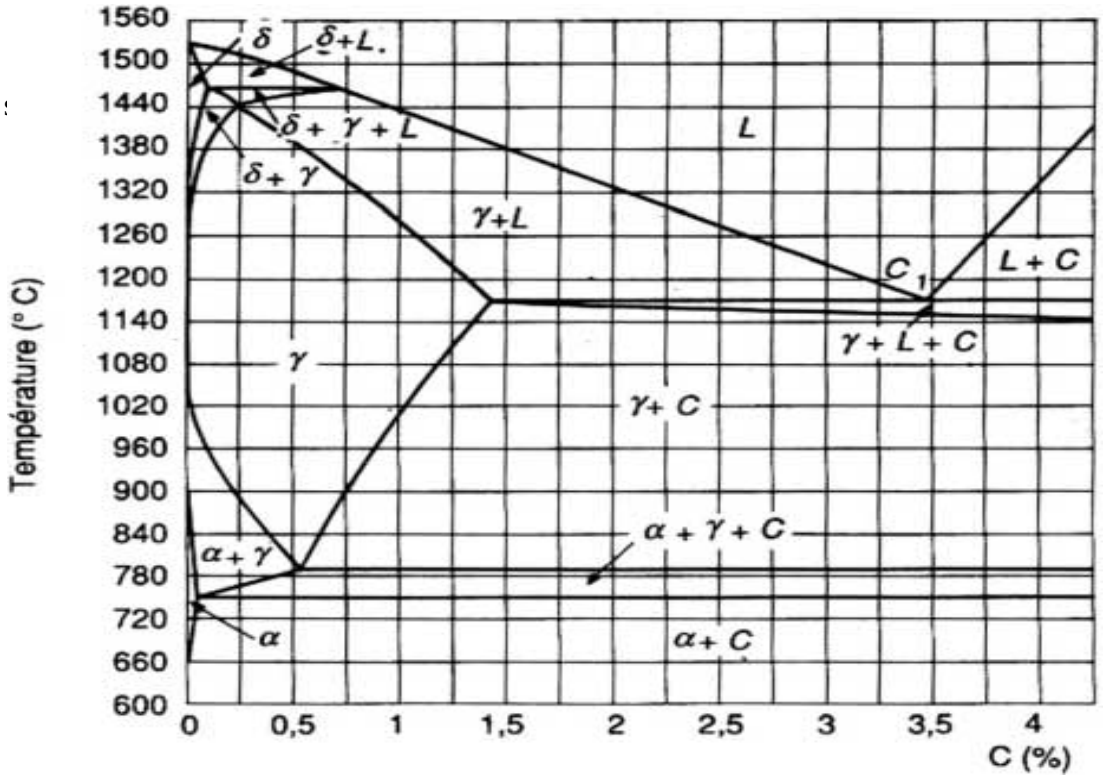


Figure I -11– Coupe pseudobinaire du diagramme Fe-C-Si, à 2, 4 % Si

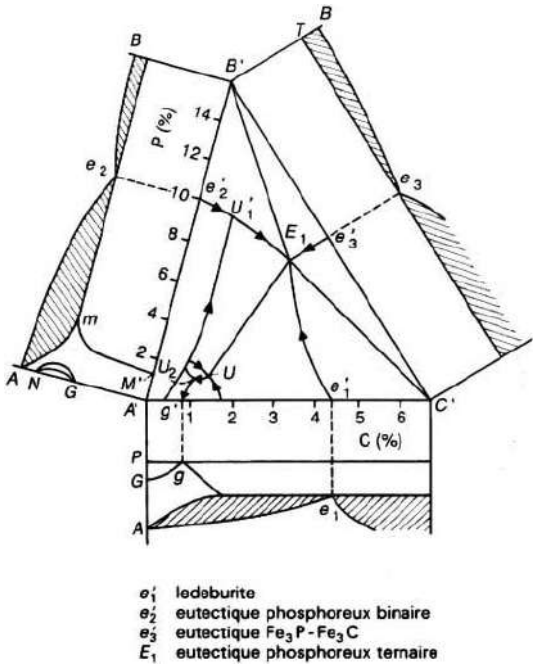


Figure I -12: Diagramme d'équilibre ternaire Fe-Fe3P-Fe3C simplifié

I -6-2-4-Propriétés et rôle des constituants

Comme nous l'avons rappel dans l'introduction, les fonts grises non alliées sont constituées d'une matrice où se trouvent mêlées des particules de graphite en forme de lamelles, des cristauxd'eutectiques phosphoreux et d'autres inclusions secondaires dont le role est généralement négligeable

(Sulfures de fer et de manganèse–carbonitrures detitane).

I -6-2-4-1Matrice :

a)Ferrite :

les propriétés de la ferrite dépendent de la taille du grain mais aussi de la nature et de la quantité des éléments qui peuvents'y trouver en solution.

le plus important d'entre eux, le **silicium**, toujours present en quantité notable dans les fontes, modifie les caractéristiques de la ferrite ainsi qu'il est indiqué au

(**TableauI-1)**.Dans les fonts grises ferritiques à graphite lamellaire,cette influence du silicium peut être masquée par celle du graphite.

b)Perlite

Les caractéristique smécaniques de la perlite dépendent avant tout des finesse.Sa dureté Brinell varie entre 200 et 300.Belaieff a donné une formule empirique liant la finesse de la perlite à sa dureté ,qui peut être considérée comme valable en première approximation dans le cas de la matrice perlitique des fontes :

$HB \cdot \Delta_0 = 80$

avec HB dureté Brinell,

Δ_0 (µm) : distance entre deux lamelles consécutives de cémentite.

Δ_0 varie entre 0,26 (HB voisin de 300) dans les structures très fines et 0,38 (HB voisin de 200) dans les structures grossières.

Type de ferrite	**Caractéristique mécanique**		
	Résistance à la traction	**Allongement** (%)	**Dureté Brinell**(HB)
Ferrite pure.....Ferrite à0,82%Si..... Ferriteà2,28%Si..... Ferriteà3,4%Si.....	275 309 437 530	61 50 43 28	75 88 124 150

TableauI -1 – Propriétés de la ferrite en fonction de la teneur en Si [16] [17]

Comme en outre il existe, dans un acier recuit, une relation entre résistance et dureté avec R_m (MPa) résistance à la traction, HB dureté Brinell.On voit que l'espacement Δ_0 détermine le principales caractéristiques d'une perlite ne contenant pas d'éléments en solution dans la ferrite ou la cémentite.

Dans le cas des fontes, même non alliées, il existe toujours des éléments en solution dans la matrice perlitique. Leur influence propre sur les caractéristiques de la ferrite et de la cémentite existe,mais est moins importante que celle résultant des modifications de finesse de l'agrégat perlitique.

ainsi Cu-Ni-Cr-Mo-V-Mn affinent la perlite, tandis que le silicium en produit le relâchement et la ferritisation.

c) Cémentite

La caractéristique essentielle de la cémentite est sa dureté très élevée (HB de l'ordre de 700 à 800). Celle-ci peut être augmentée par addition d'éléments spéciaux tels que le chrome mais cette influence est toujours se condaire. En effet ,quand on ajoute un élément spécial à une fonte blanche, celle-ci durcit évidemment ,mais l'augmentation de dureté globale résult eplutôt du durcissement de la matrice (action sur la perlite elle-même ou formation d'autres constituants de trempe) que de l'augmentation de dureté des carbureseux-mêmes.notons au passage qu'un procédé efficace pour augmenter la dureté d'une fonte blanche consiste à augmenter le carbone total ,donc la proportion de carbures, cela étant obtenuaux dépens de la résistance auchoc (article Fontes spéciales alliée

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

Ct: carbone total

TableauI-2 – Influence du Carbone total sur la dureté d'une fonte blanche [8]

D) Graphite

Dans les fonts ordinaires, le graphite est plus ou moins ramifié, plus ou moins fin, plus ou moins abundant enfunction de divers facteurs.il en résulte une influence importante sur l'effetd'entaille dans la matriceet par consequent sur les propriétés physiques et mécaniques.

I -6-2-5-Types de graphites:

A : graphite en lamelles réparties uniformément C'est la distribution normale quel'on rencontre dans les pièces d'épaisseur moyenne coulées en sable, lorsque la fonte est voisine de l'eutectique ou légèrement hypoeutectique (le plus souvent : épaisseur supérieure à 20 mm dans la coulée en sable ;carbone équivalent 4,0 à 4,4 %).

A



Figure **I-13: graphite laméllaire**

B: graphite en rosettes cette structure se rencontre dans le cas de pièces refroidies rapidement (épaisseur voisine, par exemple, de 10 mm dans le cas de la coulée en

sable) lorsque les teneurs en silicium et surtout en carbone sont élevées (silicium souvent voisin de 2, 5 %, carbone au moins égal à 3, 3 %).C'est la structure type de toutes les pièces en fonte mince

B



Figure **I-14: graphite en rosettes**

C: graphite en lamelles et amas de graphite on n'observe cette structure que dans le cas de fontes hypereutectiques refroidies assez lentement (Céq.4,5 épaisseursdépassant 20 à 30 mm, coulée en sable).les gros amas de graphite sont constitués par du graphite hypereutectique déposé avant l'eutectique graphite-austénite,les lamelles plus fines font partie de l'agrégat eutectique. Les gros amas de graphite ne se déposent effectivement que si le caractère hypereutectique de la fonte n'est pas masqué à la solidification par une surfusion importante

C

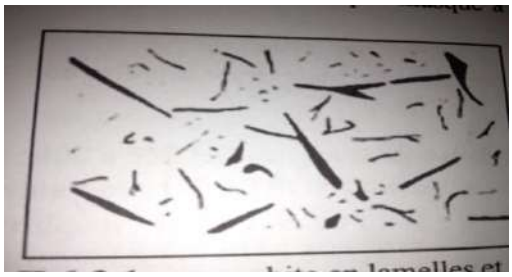
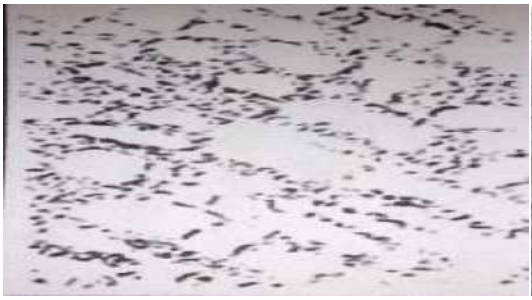


Figure **I-15** graphite en lamelles et amas de graphite

D: graphite interdendritique sans orientation préférentielle ou graphite de surfusion Cette forme de graphite s'observe toujours dans le cas de pièces refroidies très rapidement et, en particulier, au voisinage de la surface dans le cas de pieces coulées en coquille

D



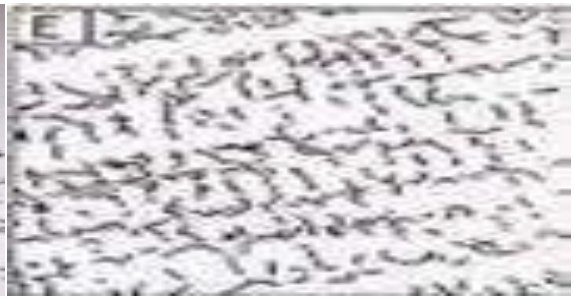


Figure **I- 16** graphite interdendritique Figure **I-17** graphite de surfusion

I -6-MOULAGE DE FONTE GRISE LAMELLAIRE (FGL)

Le moulage en sable consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte du moule en sable, réalisée d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir.

Le moulage en sable est le procédé le plus ancien et convient presque pour tous les métaux et alliages de moulage. Il s'adapte bien aux petites séries de production et surtout pour les pièces de grandes dimensions.

I -6- 1- AUTRES PROPRETES ET PRINCIPALES UTILISATION DES FONTE

MOULAGE EN MOULE NON PERMANAT

Le moule réalisé avec (les matériaux à structure granulaire, Comprend une ou plusieurs parties.

L'empreinte est faite avec un modèle donnant aux matériaux de moulage tout ou partie des formes de la pièce.

Un système d'attaque permet le remplissage de l'empreinte et vin système d'alimentation augmente la compacité de la pièce.

L'extraction de la pièce nécessite la de struction du moule, les matériaux: du moule étant généralement recyclés.

Le procédé utilisé est le moulage à vert à main. [10]

I -6-2 MOULAGE EN MOULE NON PERMANENT

Un moule non permanent est une structure principalement réalisée en matériaux de moulage (généralement en sable), composée d'une ou de plusieurs parties et offrant après assemblage un évidement appelé empreinte finale. Cette empreinte correspond à la pièce brute (en tentant compte du retrait) et aux systèmes de remplissage et d'alimentation.

Après coulée de l'alliage, cette structure est désagrégée (décochage) pour extraire la pièce brute. Chaque partie du moule correspondant à une forme de la pièce constitue une empreinte partielle. Une empreinte donne généralement les formes extérieures de la pièce.

Un noyau donne généralement les formes intérieures de la pièce.

I -6-*2*-1- MOULAGE EN SABLE A VERT

Le sable silico-argileux naturel de carrières ou synthétique humidifié afin de donner à l'argile la plasticité nécessaire pour faire épouser au sable les formes extérieures de la pièce. [9]

D'une façon générale, le moulage à vert s'adresse à des pièces ni très hautes, ni très épaisses.

Le sable à vert étant compressible, le retrait du métal coulé s'opère sans difficultés et il y'a peu de risques criques dans les pièces.

Le refroidissement du métal est rapide, mais apporte parfois une légère dureté superficielle que l'on peut atténuer, si non faire disparaitre, par certains artifices de modelage.

I -6-*2*-1-1- LE MOULAGE A VERT A LA MAIN

Toutes les opérations de serrage du sable, de démoulage du modèle de finition de l'empreinte et de remoulage des noyaux sont réalisées à la main. [10]

I -6-*2*-1-1-1 MATERIAU DE MOULAGE

- Sable de remplissage.

- Nous avons utilisés un vieux sable.

- Vieux sable ……..32.65%

- Sable neuf de carrières étuvé à 150°C……40.81%

- Argile ……..24.4%

- EAU.....2.4%

Noir minéral

I -6-2-1-1-2- ANALYSE DE SABLE

a- Humidité

Le sable est séché pendent 8 minutes dans un appareille de séchage à rayon infrarouge.

Nature de sable	Masse avant séchage mi (g)	Masse âpres séchage mf (g)	Humidité (%) H= m – mf / mi
Vieux	20	18.35	8 .25
contact	20	8 .66	6 .72

TableauI-3 -Humidité

b- Essais de Perméabilité, Compression et Cisaillement

Nature de sable	Dimensions de l'éprouvette D = h (mm)	Poids de l'éprouvette (g)	Perméabilité v = volume/temps	Compression MPas	Cisaillement MPas
Vieux	50	150	88	97	53
Contact	50	150	112	128	95

TableauI-4-Essais de perméabilité, compression et cisaillement

I -6-3-MODLAGE

Le modèle est une représentation sous forme d'une pièce ou ensemble de pièces de l'objet à fabriquer et permettant la confection de l'empreinte du moule en sable.

Il est exécuté en bois ou en métal d'après le dessin de fabrication, c'est à dire le matériau utilisé pour la confection du modèle dépend essentiellement du procédé de moulage (manuel ou mécanique).

Un modèle doit posséder :

- Une bonne résistance contre les contraintes mécaniques.

- Une bonne résistance contre les contraintes chimiques (humidité, liant du sable, gaz etc.).

- Une bonne résistance contre les contraintes thermiques (échauffement du modèle dans les différents procédés de moulage).

- Une précision de la forme et des dimensions.

- Bas prix de revient.

Le bois reste depuis longtemps la matière essentielle pour la confection des modèles. Pour chaque type de bois en trouve des propriétés différentes. On utilise surtout des bois traités, sans fissures et sec (moins de 10% d'humidité) pour prévenir leur déformation au cours du séchage.

I -6-4- NOYAUTAGE

Pour obtenir le contour intérieur de la pièce on emploie les noyaux, qui sont placés dans le moule. Le moulage avec noyau s'impose lorsque les pièces présentent des évidements qu'il serait difficile ou même impossible d'obtenir par moulage au naturel.

Le noyau est confectionné en sable auto-siccatif, dans un moule appelé boite à noyau en bois et se compose de deux parties assemblées par des groupes de repérage.

Lorsque le sable est serré ce dernier prend la forme du moule. Le noyau est sorti de la boite sans détérioration, ensuite il est séché (cuit) à F étuve pour lui donner une solidité lui permettant de résister à l'érosion du métal en fusion et aux efforts de compression qu'il subit lors du refroidissement de la pièce.

L'incorporation de certaines résines synthétiques au sable du noyau permet :

- Soit un moulage du noyau dans une boite métallique chauffée modérément et dans laquelle

le sable est injecté. Le durcissement dure alors moins d'une minute. Un dispositif pneumatique porté par la machine assure l'ouverture et la fermeture de la boite.

- Soit un moulage à la main et un durcissement à froid moins rapide, mais qui dispense de l'étuvage habituel (séchage thermique ou durcissement chimique).

Les dimensions du noyau sont établies comme celles du modèle, en tenant compte des surépaisseurs d'usinage, du retrait et de la dépouille éventuellement. Pour la fabrication des pièces en petites série, on utilise les noyaux perdus, qui sont confectionnés à partir du sable siliceux et liant. Ces noyaux sont détruits lors de l'extraction de la pièce coulée.

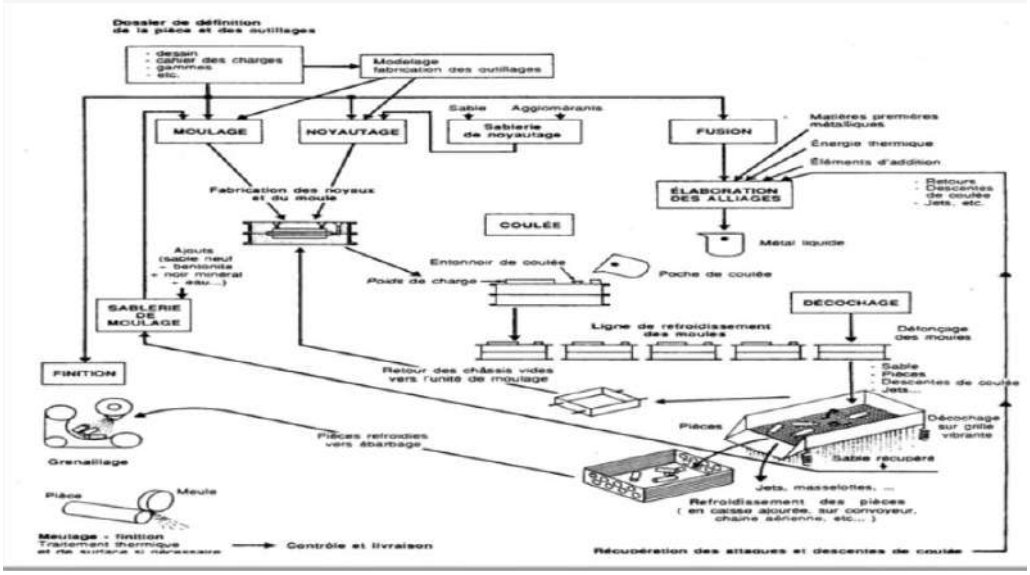


Figure I -18-Schema de la fabrication de piece fonderie [11]

I -7-DEFAUT DE FENDERIE DE FONTE GRISE LAMELLAIRE FGL 20

Introduction

L`objet de présent du travail est d`apportes une contribution à l`élévation constantedu niveau de la qualité en fonderie.

A cet effet, il doit facilite la suppression des défauts et pour cela, les fairemieux connaitre, en recherches les cause possible et propose les mesures propres à leur élimination.

Ce travail comprend ; une classification une étude de chaque défaut, une bibliographie et unindex. [20]

Les défauts:

I -7-1-BAVURE

Excroissance plate, de largeur irrégulière, de profil souvent dentelé,généralement

normale à une des faces de la pièce. Elle se trouve le long d'un joint du moule, d'une portée de noyau ou de toute surface de séparation entre les éléments constituant lemoule.

Les dimensions principales, en particulier l'épaisseur, ne sont pas affectées.

Les bavures peuvent accélérer le refroidissement des parties voisines et provoquerdes criques ou, s'agissant de fonte, des zone strempées.



Figure *I- 19:* ***bavure***

I -7-2 *GALES*

Excroissances en forme de veines, généralement perpendiculaires à surface ,isolées ou en réseau et non situées le long des joints. En moulage à vert ellesapparaissent souvent au voisinage des angles et en mêmetemps.



Figure *I- 20:* ***Gales***

I -7-3 GALES D'ANGLES

Excroissance métallique ayant la forme d'une lame mince de contour irréguliersituée

Dans des angles rentrants, de coins ou au voisinage d'arêtes, à une distance de 2 à 5 mm dela surface et parallèlement à celle-ci. Lorsqu'elle est située du côté inférieur du moulage, elleest toujours accompagnée de queues derats.

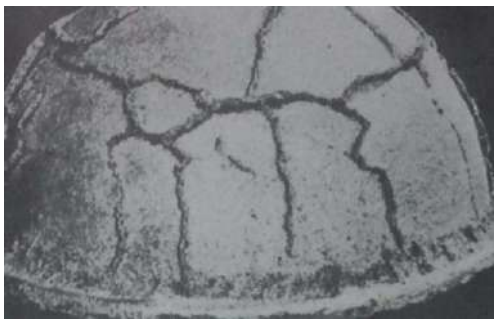


Figure **I-21**: Gales d'angle.

I -7-4 GERCED'ANGLE

Excroissance en forme de lame mince divisant en deux un angle rentrant du moulage; elle n'est donc ni parallèle, ni perpendiculaire à une face dumoulage.

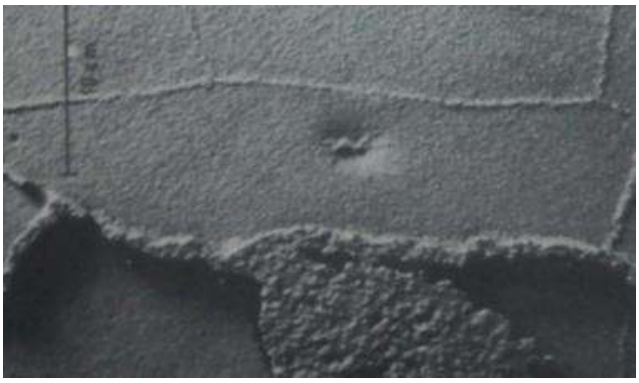


Figure *I-22*: *Gerce d'angle.*

I -7-5 SOULEVEMENT DE MOULE

Elle se trouve le long des joints dumoule.

A. Cause:

- Excès de pression, statique en dynamique du métal liquide qui produit unsoulèvement de la partie de dessus si la charge n'est pas suffisante eu si le crampage estdéfectueux.

B. Remèdes:

- Proportionner la chagga à la poussée eu assuré un crémage correct si c'estpossible réduire du jet decoulée.

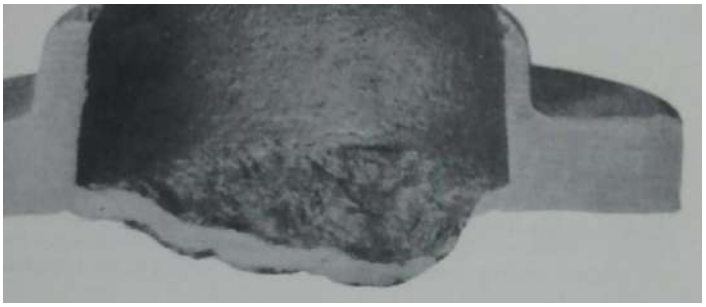


***Figure* I-23**: Soulèvement de moule

I -7-6 DEFONCEMENT

Excroissance en forme de voile irrégulier, plus en moins épais surface rugueuseet irrégulier, portant en général des inferieurs du moulage, en angleobtus.

I -7-7 MOULE FONDU

Moulage de précision à modèle perdu se produit à la surface et passe par une zonede moindre résistance dumoule

.

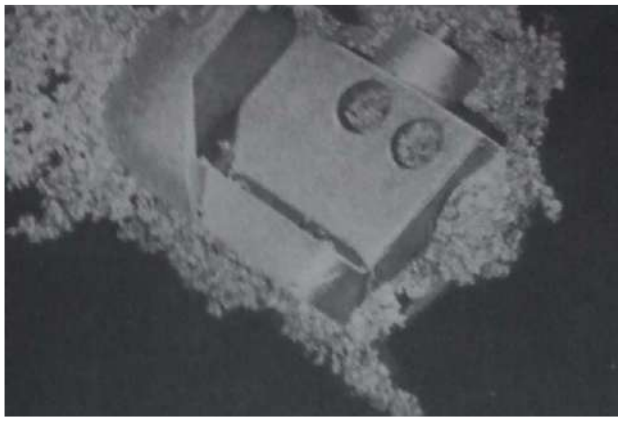


***Figure* I-24**: Moule fondu

I -7-8 FORÇAGE

Massives et irrégulières sur les faces Int et Ext et sur les arrêtés du moulage, étendueset rugueuses souvent en combinaisons avec les défauts (rugosité, pénétration, etgerces).

I -7-9 CHUTE DE SABLE

Excroissance irrégulière, massive à apparence de Saussure sur la face supérieuredu moulage, on général sa contrepartie sous forme d'inclusion de sable ou manque dematière.



Figure *I-25**: Chute de sable.***

I -7-10 *SOUFFLURE D'ANGLE, EFFET LEONARD*

Cavités dans l'angle rentrant d'un moulage se développent versl'intérieur.

I -7-11 PIQEURES SUPERFICELLES

Petites coutés quelques fois de la dimension d'une d'épingle situé à le surfaced'un moulage.

I -7- 12 SOUFFLURES AU VOSINAGE DE PIECES INSEREES

A. Causes :

Pièces métalliques humides ouoxydées.

Absence de protection métallique telle que zingage oucuivrage.

Condensation sur les pièces métallique par suite de part, le moule et les noyauxd'autre parte.

Pièces insérées ou refroidisseurs souillés, hurleur ou recouverts depoteyage susceptible de libérer lesgaz.

B. Remèdes:

Employer que des pièces insérées galvanisées ou cuivrées bien nettoyer, sécherles pièces métalliques avant de les placer dans lemoule.

Eviter que le moule ou essaya noyaux aient un temps, supérieure à celle despièces métalliques destinée à être insérées dans lemoule.

Enduire les refroidisseurs d'huile de lin et les sécher dans une enture à noyaux, dansle cas de moulage estivé, mettre une coudre de noir sur les surfaces ainsipréparées.

Utiliser des refroidisseurs dont les surfaces de contact estcannelée.

I -7-13 RETASSURE

Retassure communiquant avec l'extérieur généralement située à la partie supérieuredes moulages ou de leurs parties massives forme générale d'entonnoiréventuellementprolongé par des cavitésisolées.

Cavité débouchant dans des angles rentrants du moulage, aux attaquesde coulées ou d'une façon plus générale aux points singuliers de la surfacese caractérisant par une solidificationtardive.

Elle peut se prolonger vers l'intérieur par des cavités isolées ou pardes zonesporeuses.

Les parois de ces cavités sont rugueuses, le plus souvent dendritiques saufdans certains alliageseutectiques



***Figure* I-26**: Retassure.

I -7-14 REPRISE

Solution de continuité a bords arrondis. Ce défaut**,** nettementcaractérisé, intéresse une partie ou la totalité de la section de la pièce et peut à la limitese

Réduire à un léger sillon à bords arrondis. Il peut être accompagné d'arêtesmal venue Il se produit sur les grandes surfaces ou dans les régions despièces d'accès difficile pour le métal liquide ou dans la zone de rencontre de deux nappes de métalliquide.



***Figure* I- 27** Reprise

I -7-15 DEFORMATION

La pièce présente dans l'ensemble ou localement des déformations par rapportau dessin**,** au modèle et nu moule, déformations qui peuvent sel répéter plus oumoins régulièrement surtout dans les régions comportant des différencesd'épaisseur.



***Figure* I-28:** bulle

I -7-16 VARIATION

Les deux parties des cavités du moulage formées par un noyau présentent dans le plan de joint du noyau une translation relative ; mais, prises séparément, elles correspondent bien au dessin en ce qui concerne la forme et les dimensions.



***Figure* I- 29** Variation

I -7-17 BULLE

Excroissances métalliques, à peu près sphériques à surface lisse. Sur lessurfaces libres des moulages (coulés à découvert oucentrifugés.

-Les «perles» ont généralement une composition chimique différente de celle dumétal debase.

-En moulage de précision, ce défaut apparaît, surtout dans les angles rentrants, lestrous borgnes et lesévidements.

Causes et remèdes:

L'eutectique qui se rassemble au joint des grains en fin de solidification peutêtre expulsé vers les espaces libres (surfaces découvertes de la pièce ou intérieur des tuyaux centrifugés), sous l'effet des pressions qui peuvent être engendrées par la graphitisation eutectique ou par le dégagement de gaz dissous ou par la contraction de la partiede piècesolidifiée.

Dans le cas de la fonte, ces gouttes sont généralement plus riches enphosphore que la masse de la pièce d'où leurnom.

Lorsque cette expulsion de liquide eutectique se produit à l'intérieur d'une souillureou autre défaut interne en général il n'est pas nécessaire de remédier à cesexcroissances.



Figure *I*- 30: ***Bulle***

I -7-18 NON VENU

La pièce est complète à l'exception des angles saillants qui sont plus oumoins arrondis. S'agissant de fonte, la surface est généralement brillante et se laissebien décaper.



Figure *I- 31**non venue***

I -7-19 MANQUE

Une partie de la pièce manque, généralement à la partie supérieure du moule ou dans une région éloignée des coulées. Les arêtes A i endroit du défaut sont arrondies. Les surfaces avoisinant le défaut en général sont brillantes. Les jets decoulée, chenaux, attaques sont bienremplis.



Figure *I-32**: Manque.***

I -7-20 POINTS DURS

Inclusions dures plus ou moins finement dispersées, quelque fois grossières, situées dans toute la pièce, dans le cas de moulage sous pression d'alliage léger. Elles se manifestent surtout à l'usinage ou au traitement desurface.



***Figure* I-33**: point dure.

I -7-21 INCLUSION DE SABLE

Inclusion de sable de forme irrégulière, le plus souvent compactes au voisinage dela surface supérieure du moulage. Souvent visibles sur le moulage brut de coulée, maispouvant n'apparaitre qu'à l'usinage. En général, il y a eu d'autres endroits de la pièce,des excroissances métalliques massives. Comme ci-dessus, mais il y a des cavités de 2à6mm d'épaisseur, plus ou moins développées, avec en général des inclusions de sableattenants.

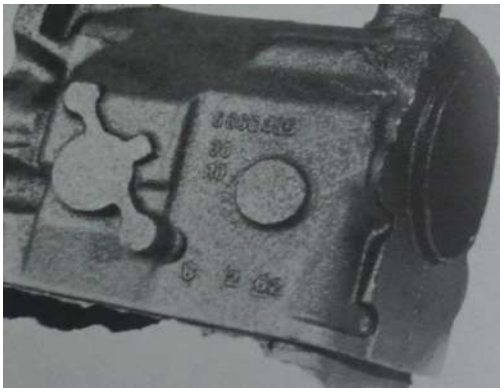


Figure *I-34:* *inclusion de sable.*

I -7-22 DEFAUT MOULE

Le moulage présente par rapport au dessin et au modèle des déformations générales ou locales non systématiques.



Figure* I-35*: Défaut moule

II.1. Caractéristiques mécaniques FGL20

Nous appellerons caractéristique mécanique fondamentales qui étant aisément mesurables, de n fait l'objet d'études nombreuses et approfondies et a partir desquelles on peut se faire une bonne idée du comportement mécanique générales de la fonte ;ce sont :

.La résistance a la traction basse de la normalisation des qualités de fontes grise non allies :

.Les duretés

.Les modules élastiques

II -1 .1 Resistance a la traction

Depuis l'application aux fontes a la métallographie, les caractéristique mécanique de ces matériaux et notamment leur résistance a la traction n'ont cesses de améliorer tout fois l'allongement de rupture reste très faible en raison de la morphologie des graphites et on ne le mesure pas en pratique (il est généralement inferieur a 1%)

après essai sur barreau coulé à part				
	Valeurs garanties	**Valeurs à titre indicatif**		
	Résistance minimale à la traction Rm **à obtenir sur éprouvette de 30 mm**	**Épaisseur de la pièce (mm)**		**Résistance à la traction probable sur pièce Rm**
		plus de	**jusqu'à et y compris**	
FGL200	**200**	**10** **20**	**10** **20** **40**	**205** **180** **165**

Tableau II -1 : classification d'après essai sur barreau coulé a part

II .1-2.La dureté

La dureté des fontes non alliées varie de la proportion très importante en fonction de la structure :

FONTES blanches :400a 550 HB suivants la teneur en carbones

Fontes grise perlitiques 170 270 HB suivantes la finesse de perlite

Fontes grise ferritiques 100 a150 HB

Fontes grise martensitiques 400 A 500 HB

Fontes grise baintiques 300 A 400

LA dureté globale des fontes dépand évidemment avant tout de la matrice dont la dureté propres varie dans la proportion considérable même dans le cas de fontes non allies a l'état brut de colée :

Dureté de la ferrite90a 150 HB dans les fontes non alliées ;

Dureté de perlite 200a 300 HB Suivant sa finesse mais on ne peut pas considérer la dureté d'une fonte complètement indépendante du graphite, celui-ci agissant par sa quantité et par ses démentions

Carbone %	Silicium	Dureté brinell (HB)
3 ,74	1,77	1,07
3 ,64	2,85	1,12
3,43	2,18	1,28
3,33	1,74	1,34
3,33	1,77	1,37
3,21	2,51	1,45

Tableau II -2: dureté d'échantillons de fonte à graphite lamellaire rendus ferritiques par traitement thermique

II .1- 3 La résilience :

Est la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie quand il se déforme sous l'effet d'un choc (déformation rapide). Il est utile de distinguer les matériaux métalliques, ou fragiles, des matériaux de type élastomères.

Dans le cas des matériaux "cassants" (aciers par exemple), la résilience est caractérisée par l'énergie nécessaire pour déformer et rompre le matériau lors d'un choc par un objet percuteur. Dans le cas des matériaux de type élastomères, l'éprouvette n'est pas rompue, la résilience est caractérisée par la proportion d'énergie restituée à l'objet percuteur qui rebondit à la suite du choc

II .1- 4.Les caractéristique mécanique d'épandant des trois facteurs :

a) Graphite :

Les lamelles de graphite diminuent considérablement la résistance a la traction de la matrice d'une part car elles section efficace et d'autre part car les lamelles du fait de leur forme créent un effet d'entaille

De ce fait lorsque 'un acier et une fonte présentent une dureté identique a la résistance a la traction de la fonte beaucoup plus faible que celle de l'acier

b) Structure de la matrice

L'influence de différents consistaient est identique à celle qu'elles auraient dans un acier mis appart les duretés de ferrite que est plus importante que dans l'acier (présence silicium) [18]

c)l'épaisseur :

Les caractéristique mécanique dépendent beaucoup de l'épaisseur des pièces car celle-ci fait varies la vitesse de refroidissement qu'elle-même a une grande influence sue la grosseur et la répartition graphites ainsi que sur la structure de la matrice

C'est ainsi que lorsque l'épaisseur des pièces diminue la résistance et la fragilité augment d'où la composition chimique des fontes devra êtres adaptes aux épaisseurs des pièces pour obtenir la caractérisation mécanique voulus.

II.2.Caractérisation métallographique

II.2.1.Introduction

Les fontes sont des alliages ferreux avec principalement de 2,5% à 4% de carbone et de 1 à 3% de silicium. Le carbone est soit présent sous forme de graphite dans les fontes grises, soit sous forme de carbure de fer et carbures d'alliage dans la fonte blanche. La difficulté de la préparation métallographique est de parvenir à préserver la forme et la taille véridiques du graphite dans sa forme lamellaire, nodulaire ou de recuit. Au cours du pré polissage, le graphite est beurré sur la matrice, et s'il n'est pas suivi d'un polissage diamanté soigneux, il n'apparaîtra pas dans sa forme vraie. Tout particulièrement les fontes avec une matrice ferritique tendre ont tendance au beurrage et sont facilement déformées et rayées. Le pré polissage plan sur papier SiC est recommandé, suivi d'un prépolissage fin et polissage diamanté. Un bref polissage final à la silice colloïdale est optionnel. Les fontes blanches sont très dures et une meule de tronçonnage à la nitrure de bore cubique représentera la meilleure option pour le tronçonnage. Noter: Ne pas utiliser de meules de tronçonnage diamantées! Le prépolissage plan, prépolissage fin et le polissage sont accomplis au diamant

-Pour la préparation de l'échantillon pour la structure métallographique, en prend les étapes suivent :

1- Polissage

polissage grossier avec papier émeri : 200-400-600
polissage fin avec papier émeri: 1000-1200
finition en utilisat un feutre et de la diamanté et lubrifiant approprié

2- Attaque chimique

l'attaque des fontes (traité)se fait avec un réactif au nital de composition:

-$HN0_3$ =5%
- CH_3 CH_2OH=95%

Example:



(Figure II.1) : Microstructure d'un échantillon

par microscope optique

III. SUIVIE D'UNE COMAGNE (POVAL)

Date de production et de contrôle : 01/04/2015……15/O5/2015

III.1ELABORATION FGL20

III.1.2 *PREPARATION DU LIT DE FUSION*

Les charges sont puisées dans les stockes de matières premières.

III.1.2.1 *PARC A FERRAILLES*

Ou sont classés, par type et analyse chimique :

1- les retours de fonderie constitués par des pièces rebutées, des masselottes, des jets de coulée…….

2- les chutes de tôles en vrac, d'acier doux et mi doux.

3- les paquets de tôles d'acier extra doux compacté.

4- des gueuses (hématite, semi hématite).

III.1.2.2 *PARC DES MATIARES D'ADDITION*

Ou sont conservées, en sacs ou futs, toutes les additions susceptibles d'être opéréesà la fusion ou en poche de coulée, citons :

1-les ferroalliages (Fe-Si ; Fe-Mn ; Fe-P ; Fe-Ti ; Fe-Cr……).

2-le graphite ; le cuivre en barre ou en fil ; le bismuth ; le SLAX ; le mis métal ; l'étain

III.1.3.1. Additions de fin de fusion :

Après fusion le bain d'alliage ne correspond pas exactement à l'analyse visée. Il ya eu des « **pertes au feu »** estimées approximativement par comparaison avec des coulées précédentes. Pour passer de l'analyse approximative à l'analyse exacte souhaitée, il est nécessaire d'opérer quelques additions de fin de fusion.

III.1.3.2. Autres opérations de fin de fusion :

Inoculer le bain lorsqu'on veut provoquer une cristallisation particulière (exemple :formation de graphite lamellaire dans les fonts GL 20

Les fonctions assurées par les éléments d'addition de fin de fusion sont :

- réajuster la composition du bain inoculé.

Rôle des éléments introduits :

- Dans le charger du four.
- Le Ferro-silicium (Fe-Si).

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

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

-De la rouille des charges.

-De l'oxydation du bain à son brassage au contact de l'air.

- Example : $2Fe0 + Si \rightarrow Si02 + 2Fe$

La silice montre à la surface du bain par différence de masse volumique.

Elle protège le bain d'une oxydation ultérieure et sera liée à du **SLAX** (poudre de silicates) puis éliminée par décrassage.

-Le Ferro- manganèse (Fe-Mn) : riche en Mn.

Le manganèse libéré dans le bain joue un double rôle :

réajuste le titre en Mn du bain à la valeur souhaitée et conférer de résistance, sans élever de trop le titre en carbone.

Désulfurer le bain, surtout dans le cas des fontes grises.

Le sulfure de manganèse passe en très grande partie dans la scorie à la surface du bain ,d'où il peut être éliminé par décrassage.

III.1.4. *COULEE DES ECHANTILLONS*

En vue de préparer nos échantillons destinés à la métallographie, la dureté nous avons procédé comme suit :

1 -Pulvérisation des ferroalliages dans un broyeur.

2 -Confection des moules en sable en résine furanique auto- durcissant à froid pour la coulée des éprouvettes cylindriques de diamètre 20 mm et de 300 mm de longueur (**Figure III.3**).

3 -Fusion de la fonte et addition des ferroalliages. L'inoculation de la fonte est faite dans le moule.

4 Découpage des échantillons en plusieurs parties pour différents essais.



Figure III.1: moule des échantillons

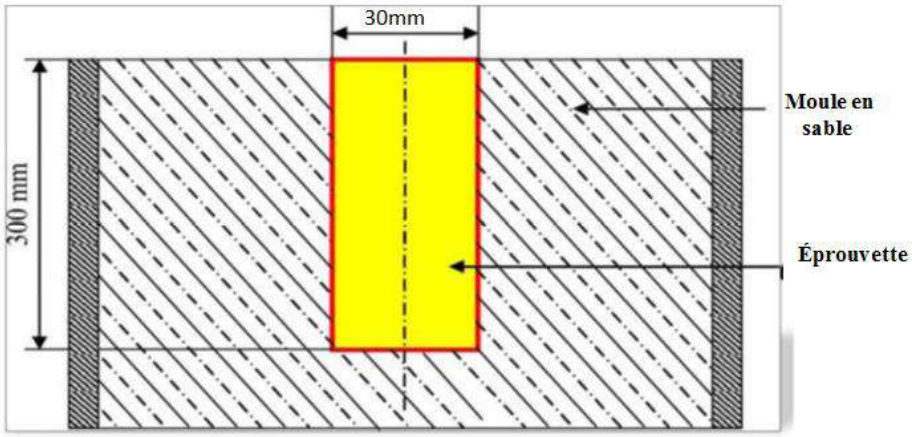


Figure III.2: méthode de coulée échantillons.

III.2. *ESSAIS MECANIQUE*

Les pièces moulées en fonte à graphite lamellaire sont constituée matériau caractérisé par la résistance à la traction mesurée sur des éprouvettes usinées soit dans des échantillons coulés à part, soit dans des blocs-échantillons attenant ou adhérent aux pièces.

Les essais mécaniques sont les plus pratiques pour la détermination des propriétés mécaniques des pièces coulées...

Les caractéristiques déterminées par les essais mécaniques Sont:

- L'aptitude à la déformation plastique ou élastique Pour essai de traction**.**
- La résistance à la pénétration d'une pièce dure soumise à une pression constante (dureté).

III.2.1 *ESSAI DE TRACTION*

L'essai de traction est effectué suivant les prescriptions de la norme NFA 03-151(sur une éprouvette usinée de 20 (mm) de diamètre (Figure III-3) pour les échantillons coulés à part, sur laquelle un effort croissant est exercé de façon continue suivant l'axe de cette Éprouvette jusqu'à rupture, en même temps en enregistrant la déformation de éprouvette.
L'essai de traction définit un ensemble de caractéristique dont les dont les principales sont**:**

_La limite élastique (**Re**): exprimée en(dan/mm^2).

C'est la contrainte minimale qui produit une déformation permanente du métal.

$Re = Fe / So$

_a charge de rupture (**Rr**): exprimée en (dan/mm^2).C'est la charge maximale atteinte au cours de l'essai L'allo $Rr = Fm / So$

_ l'allaugment après rupture(**A**):exprimé(%).

$$A(\%) = (Lu - Lo / Lo).100$$

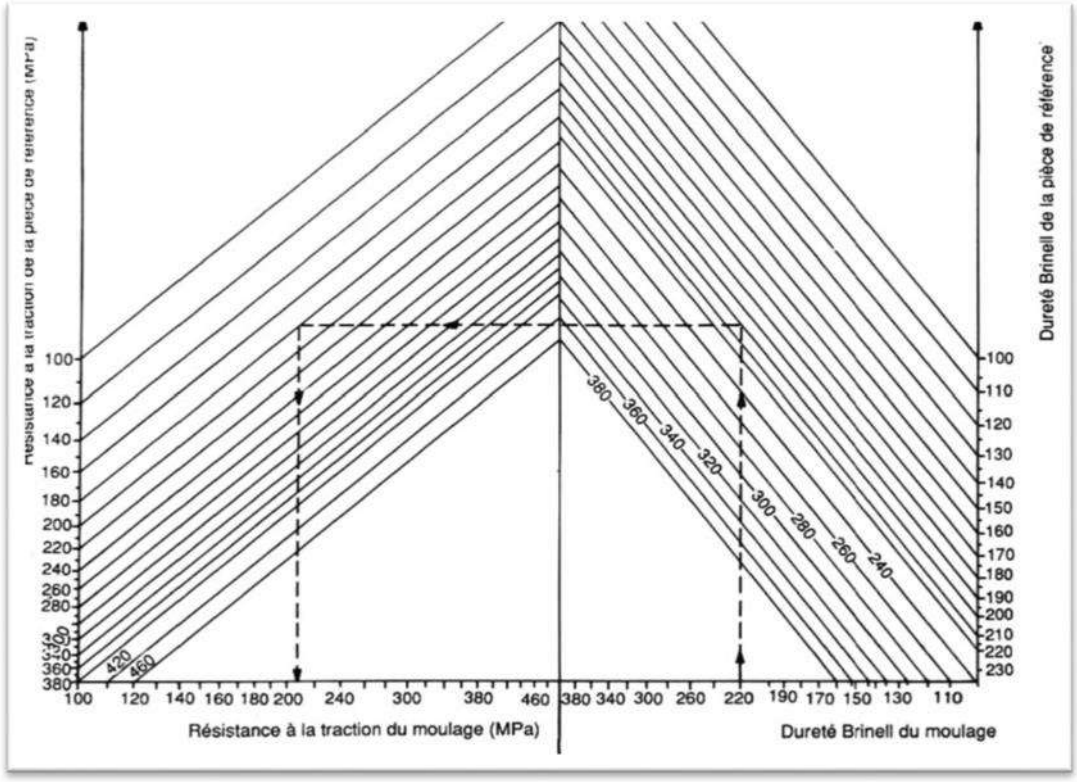


Figure III.3: Abaque permettant de calculer la résistance à la traction d'un élément de pièce moulée, connaissant sa dureté, ainsi que la résistance et la dureté d'une pièce ou éprouvette de la même fonte, servant de référence.

III.2.2 *ESSIA DEDURETE*

La dureté caractérise la résistance à la déformation.

L'essai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à essayer.la charge est constante ,on mesure la dimension de l'empreinte.

L'empreinte est d'autant plus grande que le métal est moule.

III.2.3 *ESSAI BRINELL*

L'essai consiste à imprimer dans la pièce à essayer une billeen acier ou en tungstène de diamètre "**D**" sous une charge "**P**" et à mesurer le diamètre "**d**" de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.

La dureté (**HB**) est un nombre proportionnel au rapport (**F/S)**:

$$HB = 2P/\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

III. 3 *MICROGRAPHIE*

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusion non métalliques lors de l'observation au microscope optique.

Pour l'observation de la surface d'examen on doit passe par les différentes étapes suivantes:

- Prélèvement del'échantillon:Ilfautéviterunemodificationdelastructuredumétalrésultantsoit d'un échauffement soit d'un dé formation (écrouissage).
- Enrobage: qui s'effectue avec la résine.
- Polissage: qui consiste à rendre la surface plane et brillante et ne présente aucune rayure.
- Attaque chimique: Elle se fait avec du NITAL 3 % pendant 20 secondes environ.

L'observation des échantillons a été faite par un microscope optique équipé d'une caméra vidéo marque «LEICA» assisté par ordinateur (figureV-4).L'ensemble des micrographies ont été prises avec un grossissement de 200.



Figure III.4: Microscope utilisé pour l'étude métallographique.

(POVAL)

III.3.1 *LE RESULTATD'ANALYSE*

	FGL20
Graphite	B et E admis
Matrice	Perlite
Dureté3000/10/30	187 à277
Rm (daN/mm^2)	>25
%Carbone	3.2 à3.5
%Silicium	1.6 à2.00
%Manganèse	0.70 à1.00
%Soufre	<0.10
%Phosphore	<0.15
%Magnésium	
%Cuivre	0.5 à0.8
%C.équivalent	3.7 à4.2
Autres elements chimiques	Traces

Tableau III.1: analyse chimique et mécanique.

III.4 LA COULEE

La coulée du métallique de dans un moule constitue la phase finale du processus de création de la pièce après la confection du moule et l'élaboration du métal.

Cette rencontre d'un métal à haute température et d'un moule, générale menât température ambiante, nécessite de prendre beaucoup de précautions pour garantir la bonne venue de la pièce et la sécurité du personnel.

On surveillera particulièrement les trois paramètres principaux de cette opération.



Figure III.5: la coulée.
(POVAL)

a) Moule :

Il devra être parfaitement sec et exempt de toute trace d'humidité qui pourrait entraîner des risques d'explosion, de soufflures ou de piqûres dans les pièces ,notamment lorsque les moules comportent des refroidisseurs .de nombreux systèmes existent pour séchere tréchauffer les empreinte savant la fermeture des moules (par exemple et séchage à la flamme d'un chalumeau à gaz, séchage par rayonnement de panneaux infrarouges, etc.).

b) Métal liquide:

En provenance des appareils de fusion, le métal liquide devra être à la bonne température, avoir une analyse correcte, être très propre, sans crasse ; sans peaux d'oxyde ni autres impuretés qui pourraient compromettre la santé de la pièce.

D'où la nécessité de bien décrasser le métal à chaque transvasement, et notamment dans la poche de coulée et au bec de celle-ci, à la naissance du jet de coulée, pour éviter tout entraînement de crasse dans le moule.

L'emploi de poche théière avec barrage est particulière mentre commandé pour assurer un bon décrassage du métal.

III.5. *SABLE A NOYAUX*

Les noyaux sont le plus souvent fabriqués en sable aggloméré. Ce mélange est réalisé dans un malaxeur muni d'une vis sans fin qui mélange les différents produits.

Les procédés les plus utilisés en POVAL dans le noyautage sont:

- Le furanique
- precede au silicate de soude
- Precede crooning

Le châssis

On a deux parties:

- Partie supérieure ou châssis de dessus.
- Partie inférieure ou châssis de dessous.



Figure III.6: les châssis

Fabrication d'un moule à la main

La fabrication d'un moule de sable nécessite la création d'une matrice enchâssée dans un cadre de bois composé de deux parties :la boîte du dessous ou première partie de cette matrice et la boîte du dessus ou seconde partie est aussi appelée la calotte. Ces deux boîtes sont ensuite maintenues ensemble au moyen de crampons.

Toutes les étapes de la fabrication du moule sont effectuées à la main en portant une grande attention au travail, car il suffit de peu pour échouer. Le tableau 1 illustre les différentes phases de la chaîne opératoire que doit suivre le mouleur pour exécuter un moule de sable.

Avant de commencer la production de moules, le mouleur organise son espace de travail de façon à avoir tout son outillage, appelé ici «moyens de travail», à portée de la main. Cette mise en place revêt de l'importance, car elle évite des déplacements inutiles qui pourraient causer une perte de temps, situation inadmissible au cours de certaines phases.

Le mouleur commence toujours son travail par la boîte de dessous qui reçoit la partie la plus volumineuse du modèle de pièce à mouler. Il dépose un panneau de bois sur le sol, puis il y dépose le premier châssis. Le châssis, fait de bois, possède une forme carrée. Deux de ses

Côtés se prolongent et s'amincissent pour servir de poignées et en faciliter le transport. Les dimensions du panneau et du châssis ont été préalablement déterminées par le mouleur en fonction de la grandeur de la pièce à produire.

L'ouvrier prend alors les modèles, en l'occurrence deux roues d'engrenage et il les dépose bien à plat sur le panneau, séparées l'une de l'autre tout en veillant à ce qu'elles ne touchent pas les parois du châssis. Cette disposition où les pièces ne sont pas contiguës permet au mouleur de les recouvrir entièrement de sable. Mais avant de procéder à cette phase, il étend une couche de poudre blanche relativement épaisse sur les modèles ainsi que sur le fond du châssis. Cette pellicule a pour effet, au moment du dégagement, d'empêcher le sable d'adhérer aux modèles ou au fond du châssis. Pour procéder à cette opération, on utilise une poche de toile contenant la poudre blanche que l'on étend uniformément sur toute la surface.



Figure III.7 La mise en place des modèles de bois

A l'étape suivante, on dépose une certaine quantité de sable sur les modèles sans les déplacer.

Deux types de sable sont employés dans la fabrication du moule exécuté ici et ce, pour atteindre des buts différents. Le premier est constitué d'un mélange de sable fin additionné d'une colle forte ou colle animale; ce mélange est ensuite gelé au gaz carbonique, d'où le nom de «C02 » que lui donnent les ouvriers de la fonderie. Il s'agit là d'une pratique moderne de durcissement du sable ayant la propriété de rendre l'objet de fonte plus résistant, tout en lui donnant un fini plus lisse. On a recours à ce sable pour produire des objets à la surface particulièrement dure et unie. Le deuxième type de sable couramment utilisé est le sable des fondeurs, un minerai glaiseux que l'on importe directement des États-Unis

Autre fois, on employait un sable vert qui, une fois bien tassé, donnait un fini très résistant à l'objet de fonte car à l'époque, on ne gelait pas les moules.

Le mouleur prend le sable dans ses mains et il en recouvre délicatement le modèle. Il presse ensuite très doucement le sable afin de ne pas laisser de vide. On n'utilise que les mains pour cette opération, car l'emploi de n'importe quel outil risquerait de déplacer les modèles.

Par la suite, le mouleur, à l'aide d'un tamis et d'un geste très rapide, étend une mince couche de sable des fondeurs sur tout le fond du châssis.

On recouvre délicatement les modèles de sable à l'aide d'une pelle. Puis, on foule le sable à l'aide des pieds ou de la poignée de la pelle faisant fonction de pilon. Notons que le mouleur doit exercer une pression suffisante avec ses pieds pour bien tasser le sable, sans toute fois déplacer les modèles enfouis dans le châssis.

Après ce premier foulage, on répète l'opération avec quelques pelletées de sable qui seront tassées avec les pieds. On rajoute une pelletée de sable qui sera foulée avec le petit rameur,

Communément appelé un tapeur. Cet outil constitué d'une simple barre de métal repliée à une extrémité mesure près de 93 cm.

Les coups du petit rameur sont appliqués en succession serrée et selon une méthode particulière permettant d'obtenir un plus grand impact sur la masse foulée. Le mouleur remplit encore une fois la boîte de sable qu'il tasse avec ses pieds pour la combler de nouveau. Cette fois, il tasse le sable avec le gros rameur en répétant les mêmes gestes que ceux posés précédemment avec le petit rameur. Le gros rameur ressemble au tapeur. À cette différence près que l'extrémité de la tige teste droite et se termine par une masse de métal rectangulaire d'une épaisseur d'environ 5 cm. Comparé au petit rameur, la masse du gros rameur permet d'accroître la violence de l'impact sur le sable.

Pour une boîte de grande dimension, le mouleur peut avoir recours à un marteau pneumatique afin de tasser plus efficacement le sable et d'économiser du temps. Cependant, l'emploi du marteau pneumatique pour le moulage d'une pièce de dimensions moyennes risquerait de faire éclater la boîte sous la pression du sable.

On dépose ensuite sur le haut du châssis un panneau de bois de même dimension que celui du fond de la boîte. Deux crampons, un de chaque côté de l'ensemble formé par le châssis, le fond et le couvercle sont «posés en chicane» et resserrés à l'aide d'un marteau afin de donner plus de solidité à l'ensemble. Un deuxième mouleur vient prêter main-forte à son compagnon et ils retournent la boîte le plus délicatement possible. Le couvercle devient alors le fond et le fond devient le couvercle. On retire les crampons en frappant de très légers coups de marteau pour que le sable ne s'affaisse pas et pout que les modèles ne se déplacent pas à l'intérieur du moule. Cette opération terminée, on retire le couvercle de bois.

Le couvercle enlevé, la face opposée du modèle qui reposait sur le fond avant que la boîte ne soit retournée se tait jour. On enlève le sable recouvrant les dents de la roue d'engrenage à l'aide de la cuillère et on le jette au centre du modèle. Plus tard on utilisera une truelle pour l'enlever. Cet outil sert également à lisser les joints afin de produire un moule partait ainsi qu'à faire les réparations et le finissage nécessaires. On procède toujours en partant des parois extérieures du modèle pour revenir vers le centre et en exerçant le moins de pression possible. Quelques coups de soufflet assurent le nettoyage des modèles. Le jet d'air est projeté selon un angle d'environ 45 degrés à partir d'une extrémité de la boîte en direction du côté opposé

On emploie la truelle pour un modèle de grande dimension. Il en est tien même du boyau à air comprime pouvant remplacer le soufflet afin de nettoyer plus rapidement et plus efficacement de grandes surfaces.

Une épaisse touche de poudre blanche, mentionnée plus haut, est ensuite étendue sur

toute la surface du châssis. Elle empêchera l'adhésion du sable à l'autre cadre. Enfin, on nettoie

la surface des modèles de bois à l'aide d'un pinceau pour enlever toute particule. La partie supérieure du moule de sable:

Après avoir déposé la deuxième moitié des modèles sur la première moitié qui s'est fait jour suite à l'enlèvement du couvercle, on fixe une autre boîte, la calotte, sut la première boîte ou châssis. Ce second cadre, fait de planches, est séparé en trois sections et il est traversé de haut en bas par trois bâtons de bois dont l'un, le plus gros, une fois retiré, permer le passage du jet de coulée. Les deux autres bâtons, plus petits, créeront des vides, les évents, d'où s'échapperont les gaz provoqués par le métal en fusion. On étend une couche de sable tamisé sur le tond du deuxième bâri. On dépose des crochets ou équerres, préalablement trempés dans un mélange de glaise pour faciliter leur adhésion au sable, dans le fond du deuxième châssis et de biais pour ne pas empiéter sur les modèles de bois, (x-s équerres permettent aussi d'éviter un affaissement du sable à l'intérieur du moule).

Le mouleur jette délicatement une petite quantité de sable sut la base de ces crochets et sur les modèles. Il remplit les trois sections du châssis en prenant soin de ne pas faite bouger les bâtons de bois, ce qui leur ferait perdre toute fonction de soutien. On foule alors le sable le plus profondément possible, section par section, avec le petit rameur: d'abord tout près des bords, sans toutefois les touchers, et ensuite vers le centre. Cette méthode permet de durcir le

sable à tous les niveaux de façon égale..

On comble de sable le châssis à l'intérieur duquel on le tasse en utilisant le gros rameur, de la manière décrite antérieurement. On répète l'opération et on accumule l'excédent de sable,

vis-à-vis des traverses séparant le cadre en sections, en trois lisières. On les enfonce au petit rameur en veillant à éviter de frapper les bords du châssis, de toucher aux trois bâtons de bois ou de déplacer ces derniers. On rejette le surplus de sable avec une brosse. Les ouvriers appellent cette opération évasée. On s'abstient d'utiliser la règle à araser de crainte de faire bouger les bâtons de bois ou les bouts des crochets. Une fois la surface bien nettoyée, on retire délicatement les trois bâtons.

Le ventoir, une longue aiguille emmanchée, sert à percer toute la surface de la masse foulée, à tous les 10 cm pour créer une circulation d'air à l'intérieur du sable. On enfonce le ventoir dans le sable jusqu'à ce qu'on pique le modèle de bois. On maintient la tige du ventoir

en place par un «stopper» au cours de la prochaine opération où il faut retourner la calotte et la

déposer sur un échafaud de bois. On fait alors appel à un deuxième ouvrier.

Le mouleur humecte les contours du modèle de bois avec une poire-éponge ou faubert pour empêcher le sable de s'effriter. Il frappe délicatement avec le marteau la cheville de bois des deux modèles de la boîte, ce qui permet de tasser le sable sur le pourtour des modèles et de gagner les quelques millimètres nécessaires pour retirer les modèles sans créer de débris de sable. On retire les formes en les saisissants par leur cheville de bois et en tirant à la verticale.

Pour nettoyer la matrice et la raffermir, on jette un peu d'eau sut les bords du moule avec la poire-éponge, et on rabat légèrement avec les doigts les bavures aux arêtes saillantes des cavités laissées par le retrait des modèles.

Sur la face extérieurede ce châssis, le mouleur, à l'aide du chemin, petit instrument de tôle en forme de gouttière, agrandit la partie supérieure des évents et du jet de coulée, leur donnant ainsi la forme d'un entonnoir. Une foix remplis de fonte, ils prendront le nom de masselotte, soit la portion de métal en excédent qui adhère à une pièce de fonderie.

. Le mouleur laisse de côté ce châssis et reprend celui du dessous qui est resté au sol. Il introduit le «pin à râper» ou pointes à ballotter dans un trou pratiqué au centre de l'un des modèles, la tient de sa main gauche, et de son autre main, donne quelques coups de marteau sur cette tige de fer afin de faciliter le dégagement du modèle. Il répète les mêmes gestes avec le deuxième modèle. Cette opération peut aussi s'effectuer à l'aide d'une vrille vissée dans le modèle de bois.

Comme pour les modèles précédents, on humecte les arêtes saillantes et on rabat les bavures avec les doigts. On répète l'opération pour les tranches du chemin de coulée creusées à l'aide du chemin (petit instrument qui sert à agrandir). Les tranches du chemin de coulée permettront d'acheminer la fonte jusqu'au trou de coulée.

On doit procéder ensuite au gel du premier moule, celui du châssis inférieur fait d'un mélange de sable fin et décolle. Pour ce faire, le mouleur pose un cadrage de bois d'environ 5

cm de hauteur sur le châssis. Il dépose sur ce cadrage, vis-à-vis de la partie à geler, une planche de bois transpercée en son centre d'un trou de 2.5 cm de diamètre. Cette ouverture qui doit coïncider avec le milieu du moule servira à faire pénétrer le gaz carbonique (C02) envoyé à l'aide d'une bonbonne. On recouvre de coton la portion du châssis qu'on ne veut pas geler.

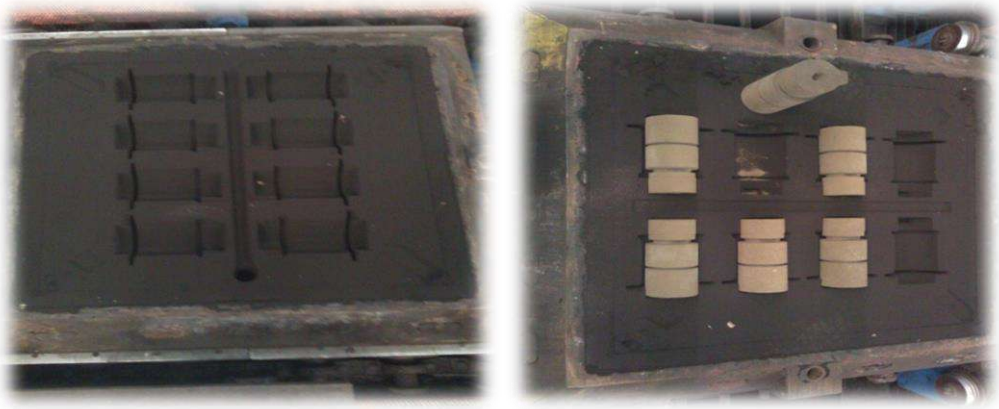


Figure III.8: la partie supérieure et inférieure dumoule

On applique quelques coups de soufflet pour nettoyer la surface du moule et on enduit les dents des roues d'engrenage d'une huile noire qui fermera complètement les pores formées par le sable tout en garantissant une surface lisse et dure.

On pose les corps ou prunes qui créeront un espace vide dans l'axe de l'objet moulé. Ces corps sont composés d'un mélange de sable blanc, de colle et d'huile inséré dans des moules de bois ronds et longitudinaux, puis ils sont gelés au gaz carbonique. Un seul ouvrier confectionne ces

noyaux qui peuvent adopter toutes les dimensions. Le diamètre du corps est fonction du vide que le mouleur désire obtenir à l'intérieur de l'objet fondu. Sa longueur est équivalente à la distance entre les extrémités des deux tenons du modèle de bois.

Bien que les corps soient gelés au gaz carbonique, les ouvriers font référence à cette opération en disant qu'ils sont «cuits». Ce terme rappelle la méthode en usage autrefois où il fallait cuire les noyaux dans un four chauffé au charbon de bois. Il s'agissait d'une opération délicate, car on devait déplacer régulièrement les pièces pour les empêcher de brûler et cela, tout en essayant de ne pas se brûler soi-même. Le four servant à cuire les corps existe encore à la fonderie de Saint-Anselme, mais il ne fonctionne plus depuis 1945; toutefois, la référence à une cuisson a survécu dans le vocabulaire des ouvriers.

Pour la dernière phase de la fabrication d'un moule de sable, on retourne la calotte sur le châssis inférieur puis, à l'aide de crampons «posés en chicane», on fixe solidement les deux châssis l'un à l'autre. Pour ce faire, le mouleur utilise un levier et une tige ronde, car les coups du marteau risquent de faire s'affaisser le sable dans les moules. Pour effectuer cette opération, le mouleur glisse le levier sous le crampon et en utilisant la partie recourbée de la tige ronde qu'il tourne à plusieurs reprises, il resserre le crampon sur les deux châssis. Le moule de sable est alors prêt à recevoir la fonte liquide.

III.5.1 LES CORPS DE REFROIDISSEMENT

les corps de refroidissement forment une certaine partie à la surface de la pièce coulée et sont destinés à absorber rapidement la chaleur du métal coulé.



Figure II.9:LES CORPS DE REFROIDISSEMENT

III.5.2 *OPERATIONS D'EXECUTION MANUELLE D'UN MOULE EN SABLE*

L'exécution manuelle d'un moule en sable comprend les opérations suivantes:

a) Confection de la partie inférieure du moule
b) Confection de la partie supérieure dumoule
c) Démoulage du modèle et dumandrin

Enlever le mandrin de coulée est d'évent.

 Séparer les deux châssis, que le sable blanc saupoudré sur la face des joints empêche d'adhérer l'un à l'autre.

 Sortir le modèle après l'avoir ébranlé doucement en utilisant un tire fond qui facilitera la prise du modèle.

 Exécuter et lisser à la spatule, le basin de coulée (masselotte) dans le dessus du châssis et le canal de coulée dans le dessous du châssis.

 Lisser légèrement l'empreinte et le saupoudrer de noir de fonderie qui donnera à la pièce des faces bien lisses.

d) remoulage

Il s'agit de la préparation du moule déjà exécuté en vue de la coulée du métal.

 Pose du noyau s'il y a lieu, on donne au noyau un appui par sa partie ou ses parties hautes, car à défauts lors de la coulée, il serait soulevé par la poussée du métal liquide (principe d'Archimède).

 Pose du châssis de dessus sur le châssis de dessous en vérifiant leur position relative et leur

contact. Le moule est posé sur un lit de sable.

 Placer sur le châssis supérieur des poids afin d'éviter son soulèvement lors de la coulée du métal qui forme une certaine pression.

e) Décochage

On commence le décochage de la pièce, seulement lorsque la température est assez basse c'est- à -dire : lorsque la pièce est totalement solidifiée.

Le système de coulée et éventuellement la masselotte sont séparés de la pièce a l'aide d'un marteau sans détérioration de cette dernière.

III.6 Caractérisation mécanique et métallographique pour chaque Compagne

II.6.1 ***Tète de bouche à clé***

N : 715000A

UNITE VANNE



(Figure III.6.1.a)Tète de bouche à clé

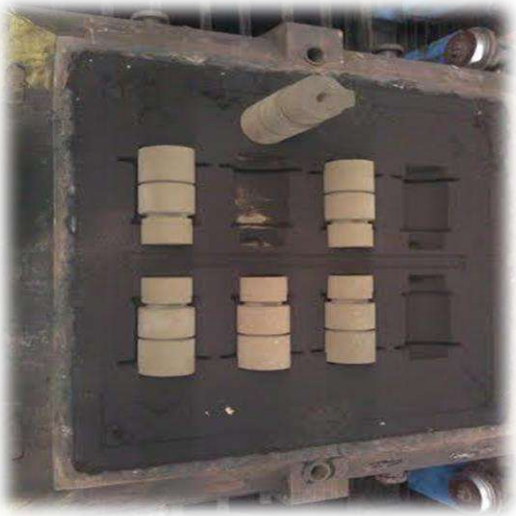


(Figure III.6.1.b)

La plaque modèle (08 pièces /moule) objet 6/5

(Figure III.6.1.c)

Remoulage





(Figure III.6.1.d)

La coulée



II.6.2 Caractérisation mécanique (Tète de bouche à clé)

15/04/2015

N : de la charge I366

Les compositions chimiques

%C = 3.52 % Si = 2.00 %Mn = 0.43 %P= 0.3%S= 0.069

Sc = $\frac{\%C}{4.30-(\%Si+\%P)/3}$ = 0.97 Céq = C$\frac{1}{(Si+P)}$ =3.95

III.6.2.1Essai de dureté

Les résultats obtenus après essai de dureté BRINELL (HB) sur l'échantillon trait :

HB= 200

III.6.2.2 Résistance à la traction Rm :

Les résultats obtenus après essai de traction :
Rm =20.2 N/mm

III.6.3Caractérisation métallographique

Pour la préparation de l'échantillon pour la structure métallographique, en prend les étapes suivantes:

1- Polissage

polissage grossier avec papier émeri : 200-400-600
polissage fin avec papier émeri: 1000-1200
finition en utilisat un feutre et de la diamanté et lubrifiant approprié

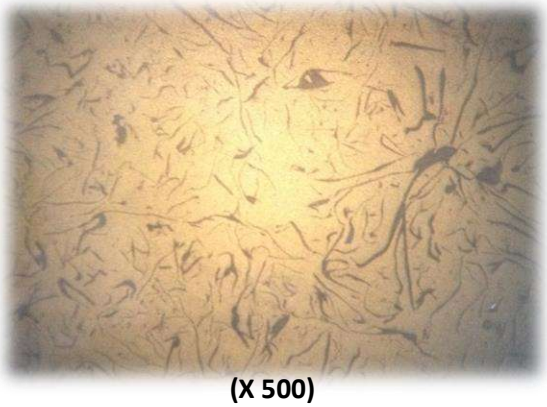
2- Attaque chimique

l'attaque des fontes (traité)se fait avec un réactif au nital de composition:

-$HN0_3$ =5%
- CH_3 CH_2OH=95%

III.6.3.1.Observation microscopique

En utilise le microscope optique pour la révélation de la composition de structure, et les résultats obtenus sont les suivant :

Echantillon de Tète de bouche à clé	**Composition**
 **(X 500)**	mousse de graphite perlite + eutectique phosphoreux Graphite(%) 10 à 15 Forme graphite

(Tableau III.6.3.a)La microstructure de l'échantillon (POVAL) traité Tète de bouche à clé

III.6.4*Cadre « SDC »*

DAWOO BOUGAZOULE



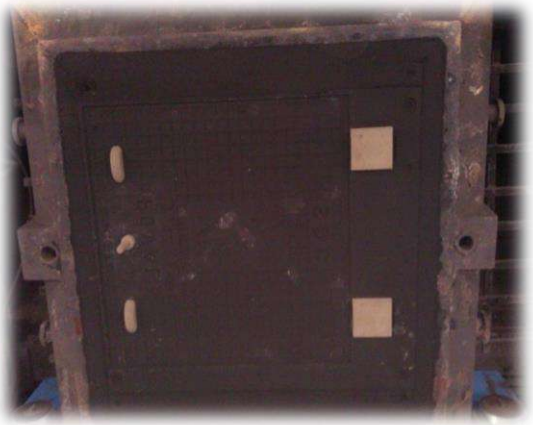


(Figure III.6.4.a)
Cadre « SDC »La plaque modèle



(Figure III.6.4.b)

Les emprunts du moule avec pose du noyau





(Figure III.6.4.c)
La pièce brute

III.6.5 Caractérisation mécanique

Cadre « SDC »



(Figure III.5.a) Cadre « SDC »

16/04/2015

N : de la charge I375

Les compositions chimiques

%C = 3.46 % Si = 2.05 %Mn = 0.41 %P= 0.3 %S= 0.067

$Sc = \frac{\%C}{4.30-(\%Si+\%P)/3} = 0.98$ $Céq = C\frac{1}{(Si+P)} = 3.88$

III.6.5.1 Essai de dureté

Les résultats obtenus après essai de dureté BRINELL (HB) sur l'échantillon trait :

HB= 221

III.6.5.2 Résistance à la traction Rm :

Les résultats obtenus après essai de traction :
Rm =19.7 N/mm

III.6.6 Caractérisation métallographique

Cadre « SDC »

Pour la préparation de l'échantillon pour la structure métallographique, en prend les étapes suivantes:

1- Polissage

polissage grossier avec papier émeri : 200-400-600
polissage fin avec papier émeri: 1000-1200
finition en utilisat un feutre et de la diamanté et lubrifiant approprié

2- Attaque chimique

l'attaque des fontes (traité)se fait avec un réactif au nital de composition:

-$HN0_3$ =5%
- CH_3 CH_2OH=95%

III.6.6.1.Observation microscopique

En utilise le microscope optique pour la révélation de la composition de structure, et les résultats obtenus sont les suivant :

Echantillon de Cadre « SDC »	Composition
 **(X 500)**	Inter dendritique +mousse de graphite perlite + eutectique Graphite(%) 10 à 15

Tableau III.6.6.a) La microstructure de l'échantillon (POVAL) traité Cadre « SDC »

III.6.7 .Contre poids

N : 6274607M

ATC .C



***(Figure*III.6.7.a) contre poids**



***(Figure*III.6.7.b)**

La plaque modèle

III.6.8 **.**Caractérisation mécanique (Contre poids)

19/04/2015

N : de charge I379

Les compositions chimiques

%C = 3.53 % Si = 2.09 %Mn = 0.39 %P= 0.3 %S= 0.065

Sc = $\frac{\%C}{4.30-(\%Si+\%P)/3}$ =

III.6.8.1Essai de dureté

Les résultats obtenus après essai de dureté BRINELL (HB) sur l'échantillon trait :

HB= 198 HB

III.6.8.2 Résistance à la traction Rm :

Les résultats obtenus après essai de traction :
Rm =19.3 N/mm

III.6.9.Caractérisation métallographique

Pour la préparation de l'échantillon pour la structure métallographique, en prend les étapes suivent :

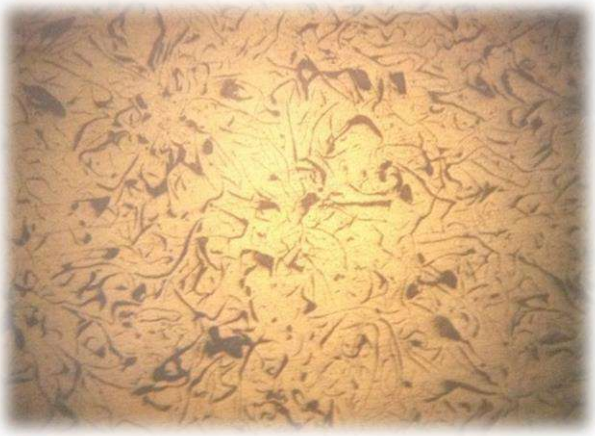
1- polissage
polissage grossier avec papier émeri : 200-400-600
polissage fin avec papier émeri: 1000-1200
finition en utilisat un feutre et de la diamanté et lubrifiant approprié

2- attaque chimique
l'attaque des fontes (traité)se fait avec un réactif au nital de composition:

-$HN0_3$ =5%
- CH_3 CH_2OH=95%

III.6.9.1 Observation microscopique

En utilise le microscope optique pour la révélation de la composition de structure, et les résultats obtenus sont les suivant :

Echantillon de contre poids	Composition
 **(X 500)**	Inter dendritique +mousse de graphite perlite + eutectique Graphite(%) 10 à 15

(Tableau* III.6.9.a)*La microstructure de l'échantillon (POVAL) traité
Contre poids

III.7.Control de qualité (les défauts de fonderie)

III.7.1 Tète de bouche à clé

1) BAVURE



***(Figure*II.7.1.a)BAVURE**

2) INCLUSION DE SABLE



***(Figure*II.7.1.b) INCLUSION DE SABLE**

3) BULLE



***(Figure*III.7.1.c) BULLE**

III.7.2.Contre poids

1) GALES



***(Figure*III.7.2.a) La gale**

*III.7. 3.*Cadre « SDC »

1) NON VENU



***(Figure*II.7.3.a) non venu**

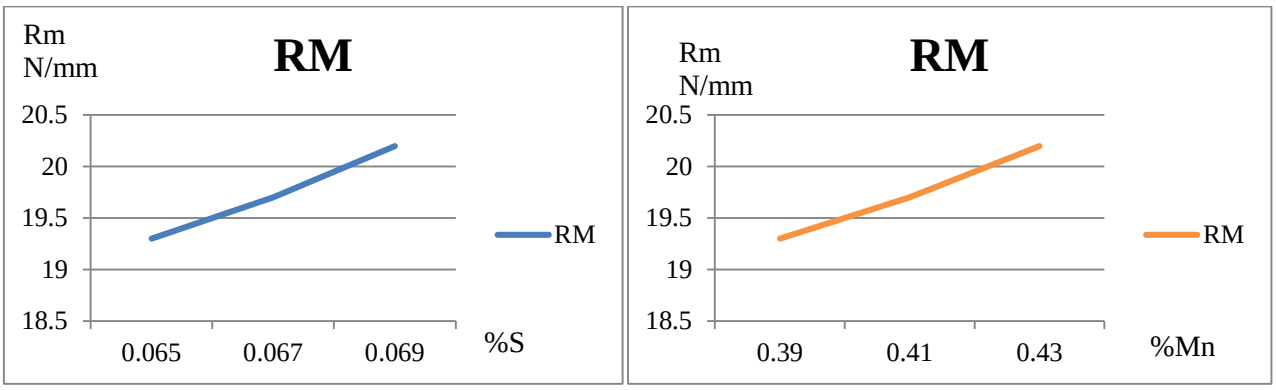
IV. Résultats et discutions

(POVAL)

IV .1. L'influence des éléments d'additions sur la résistance à la traction :

IV.1.1 influences de teneur en manganèse Mn et en soufre S :

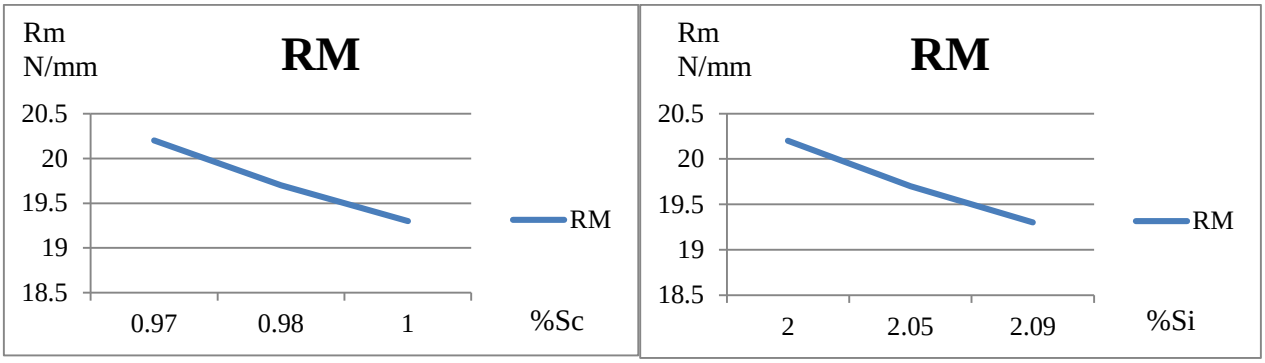
D'après ce graphe en remarque que la variation de la résistance de la traction (RM) d'une fonte grise lamellaire FGL20 est directement proportionnel à la teneur en manganèse %Mn et en soufre S ; se qu'explique l'augmentation de la résistance à la traction avec l'augmentation de teneur en manganèse %Mn et en soufre %S.



(Figure .IV.a) Résistance à la traction RM d'une fonte grise en fonction de sa teneur de manganèse %Mn et le soufre %S

IV.1.2 influences de teneur de silicium Si et la saturation de carbone Sc :

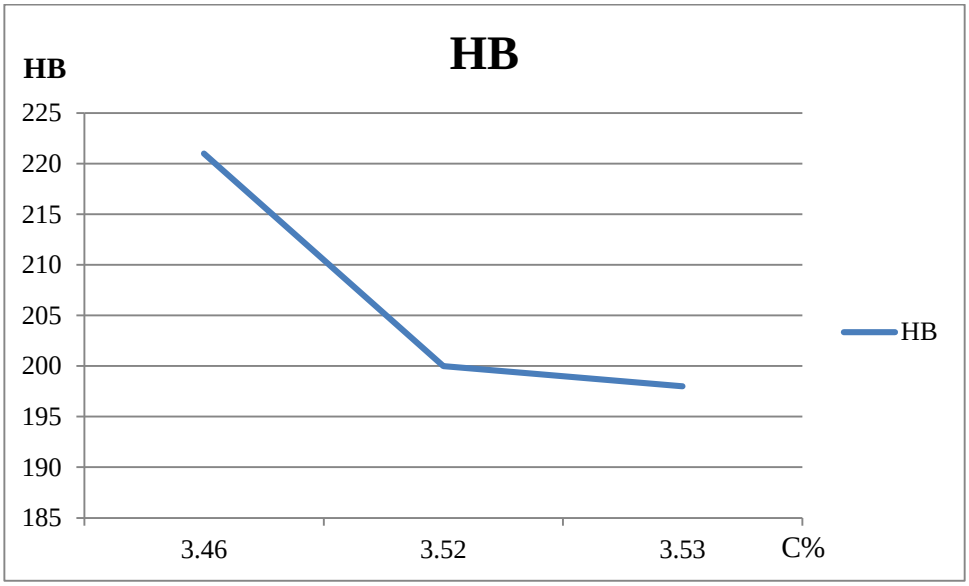
D'après ce graphe en remarque que la résistance à la traction RM d'une fonte grise à graphite lamellaire FGL20 en fonction de sa teneur de %Si et de saturation de carbone Sc en remarque que RM varie inversement proportionnel à la teneur en %Si et le Sc veut dire que lorsque le teneur en Si et Sc dans la fonte gris augmente la résistance à la traction de cette dernière diminue.



(Figure .IV .b) Résistance à la traction RM d'une fonte grise en fonction de sa teneur de Silicium %Si et la saturation de carbone %Sc

IV .1.3 . L'influence de la teneur en carbone C sur la dureté :

D'après des analyse chimiques faite sur des échantillons pour des produits (pièces types) concernant la fonte FGL 20, ainsi que leurs caractéristique mécaniques tel que la dureté on observe l'augmentation de teneur en carbone dans la fourchette influe sur la diminution de la dureté



(Figure .IV .c) Dureté HB d'une fonte grise en fonction de sa teneur de carbone C

IV .2.Les résultats de la micrographie des échantillons(POVAL)

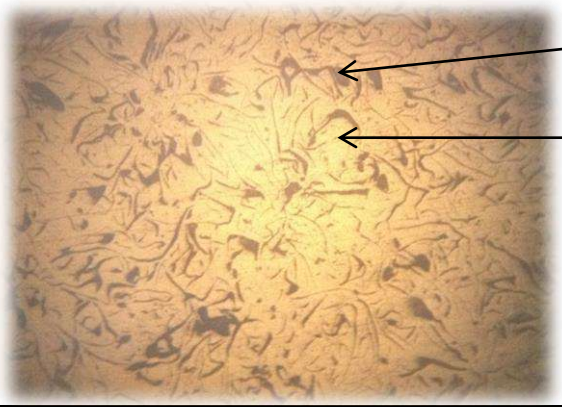
Indices	Echantillon (CONTRE POIT)
Graphite (%)	10 à15
	Graphite Perlit Inter dendritique +mousse de graphite Perlite +eutectique phosphoreux
Composition chimique	%C = 3.53 % Si = 2.09 %Mn = 0.39 %P= 0.3 %S= 0.065 Sc = 1,00 Céq = 3,95

Tableau IV. A) les résultats micrographie de l'échantillon

(CONTRE POIT)

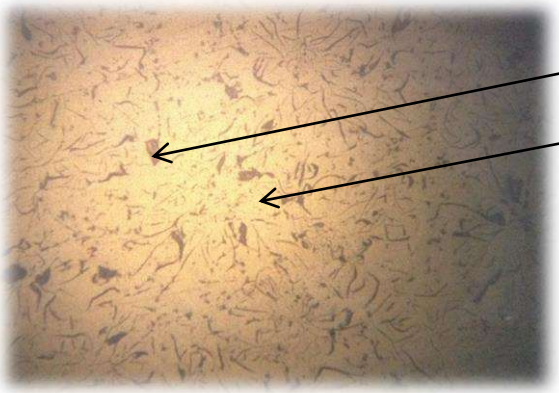
Indices	Echantillon (cadre 'SDC')
Graphite (%)	10 à15
	Graphite Perlit Inter dendritique +mousse de graphite Perlite +eutectique phosphoreux
Composition chimique	%C = 3.46 % Si = 2.05 %Mn = 0.41 %P= 0.3 %S= 0.067 Sc = 0.98 Céq = 3.88

Tableau IV. B) les résultats micrographie de l'échantillon

(Cadre 'SDC')

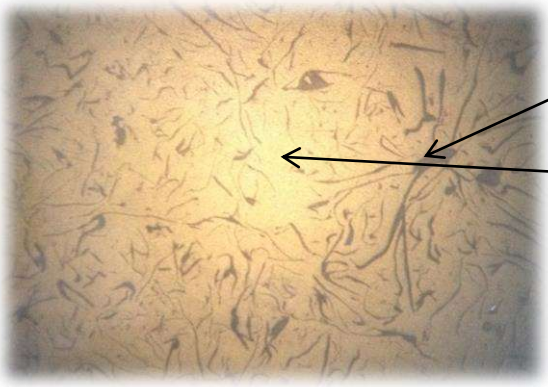
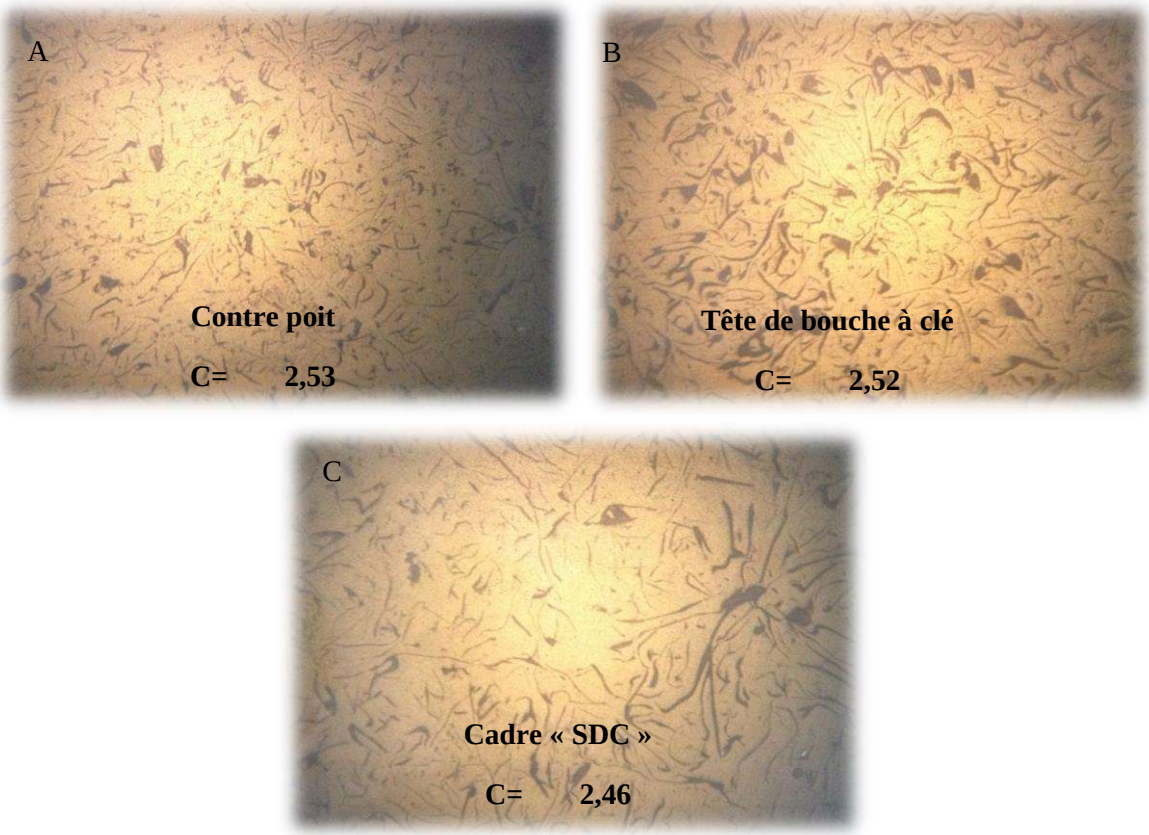
Indices	Echantillon (tète de bouche à clé)
Graphite (%)	10 à15
	 Inter dendritique +mousse de graphite Perlite +eutectique phosphoreux
Composition chimique	%C = 3.52 % Si = 2.00 %Mn = 0.43 %P= 0.3 %S= 0.069 Sc = 0.97 Céq =3.95 S=0,069

Tableau IV. c) les résultats micrographie de l'échantillon

(Tète de bouche à clé)



(Figure IV. 2.a) Les structures métallographie des échantillons de POVAL

Comparaison :

D'après cette résultat métallographie des échantillons de « POVAL » en remarque que :

Le graphite plus dispersé dans la phase perlitique dans la structure (A et B) par a pour le autre structure (C) à couse de sa teneur de carbone %C ; veut dire que l'orques le teneur en carbone dans la fonte gris (FGL20) augmente le graphite augmente dans la structure

Conclusion générale

Dans le cadre de cette étude notre travail consiste à identifier le role des teneurs des éléments normeux tel que (Mn, SI, S), ainsi que la teneur de carbone sur les caractéristiques mécaniques des produits en fonte à graphite lamellaire désigné FGL20 élaborer dans la fondrie de « POVAL » Berrouagia employer dans plusieurs domaines.

D'après notre étude, nous pouvons conclure que les éléments d'additions dans les fontes FGL20 jouent un role primordial sur leurs propiétés mécanique et métallographiques.

D'après une étude de suivi sur des échantillons (pièces types), et en collaboration avec laboratiore des matériaux de la fondrie de POVAL, on obtient leurs analyses chimiques et mécaniques qui nous conduire à des observations suivantes :

-les résultats des essais mécaniques concernent la résistance à la traction (RM)de la fonte FGL20 montre d'une facon qu'il y a une relation proprotionelle entre celle-ci et la teneur en manganèse (Mn) et en soufre (S),d'une autre facon une relation inversement proportionnelle entre cette caractéristique et le taux de saturation de carbone, ainsi que la teneur de silicium (Si).

-d'autre part on remarque la diminution de la dureté (HB) dans la fonte FGL20 lors de l'augmentation de teneur en carbone C dans fourchette.

-l'analyse métallographique d'une fonte FGL20 fabriqueé en (POVAL) pour differents échantillons (pieces types) pour différents compositions chimiques précisément dans en remarque que :

La structure métallographique pour différents teneurs en carbone (C) dans la fourchette influent sur l'apparaition plus de graphite dans la phase perlitique .

[1] : HECHT (M.). – Les eutectiques des alliages à base de fer et de carbone.143 p., 24 pl. fig., Ed. Techn. Indus. Fonderie (1969)

[2] : Le souffre dans la fonte. Notice Fo 94; Le manganèse dans la fonte. Notice Fo 104, Centre Tech. Indus. Fonderie

[3] : MICHEL GEIER. Métallurgie de fonderie. Tome 1. Editions Eyrolles 1976.

[4] : Pierre Cuinin. Centre français d'exploitation. Technique de l'ingénieur. Métallurgie des alliages de fonderie. M 3520-2.

[5] : Jean-Marcel MASSON. Centre français d'exploitation. Techniques de l'ingénieur. Elaboration de l'acier moulé-Fours de fusion. M 3623. Edition Sep 2005.

[6] : MICHEL GEIER. Métallurgie de fonderie. Tome 2. Editions. Eyrolles 1978

[7] : lloy cast irons (Fontes alliées).280 p., Am. Foundrymen's Assoc. (1944)

[8] : BALLAY (M.) et CHAVY (R.). – Les fontes blanches spéciales Centre Inform. Nickel.

[9] : TECHNIQUES DE L'INGENIEUR. P-(M750-6).

[10] : Manuel des fontes moulées P-170.

[11] : I. LAKHTINE, Métallurgie et traitement thermiques des métaux (1986)

[12] : COPPOLANI (J.) et MARGERIE (J.C.). – L'analyse thermique comme contrôle d'atelier. Fonderie, n o 243, p. 159, mai 1966.

[13] : HECHT (M.) et MARGERIE (J.C.). – L'analyse thermique en fonderie de fonte. Fonderie Fondeur d'Aujourd'hui, no 8, p. 38-49, oct.1981.

[14] : BALLAY (M.), CHAVY (R.) et GRILLAT (J.). –Étude de quelques propriétés de fontes à graphite sphéroïdal. Fonderie, no68,p. 2589-604, août-sept. 1951 ; no 69, p. 2636-52, oct. 1951

[15] : FERRY (M.). – Note au sujet des caractéristiques mécaniques des fontes grises. Vérification du diagramme établi par A. COLLAUD. Fonderie, no124, p. 177-84, mai 1956

[16] : Cast metal handbook (Alliages de fonderie).710 p., Am. Foundrymen's Assoc. (1944).

[17] : Alloy cast irons (Fontes alliées).280 p., Am.Found rymen's Assoc. (1944)

[18] : LAMB (A.D.). – Requirements of iron castings sujets to wear and abrasion. BCIRA Conference Lough borough, avril 1970

[19] :Référence M3614 | Date de publication :10 sept. 2014 **Alex RÉMY**

[20] : Histoires de fontes. Entre le phlogistique et la plombagine: où situer la « fonte à l'oxygène »? *Comptes Rendus Chimie*, Volume 11, Issue 6, Pages 772-787Jean Le Coz

[21] CTIF. – *Guide pratique de conduite du cubilot.* Documents de base CTIF-Fo81