République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université YahiaFarés Médéa

Faculté de technologie

Département: Génie Mécanique

Mémoire de fin d'étude présenté Pour l'obtention

Du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : ***Science*** **des Matériaux**

Théme

Corrélation entre la composition chimique, la structure micrographique et les caractéristiques de la fonte à graphite lamellaire mécaniques en utilisant différents abaques

Présenté par :

***** Haddou Saida

* Toumache Ilham

proposé et dirigé par :

M.Hebireche Mohamed

Promotion : 2016/2017

Remerciements

Nous remercions notre dieu tout puissant « **ALLAH** » de nous avoir permis et aider à accomplir ce travail en nous assurant l'attente de notre objectif et arriver à notre but.

Nous tenons à remercier particulièrement monsieur M-HEBIRECHE. notre promoteur pour ses conseils, son assistance, son suivi et son soutient pour mener à tenir nos différents travaux de notre mémoire de fin d'étude.

Nous témoignons de notre gratitude à l'ensemble des enseignants de l'université Dr. YAHIA FARES de Médéa, et particulièrement les enseignants de département de génie-mécanique.

Merci à tous ceux qui, à un moment ou un autre, nous ont apporté leur savoir faire

Tous nos remerciements vont à messieurs les membres du jury qui nous ont honorés par leur présence et leur sens du savoir.

Toumache Ilham

&

Haddou Saida

Dédicace

Avant tout , je remercie le grand Dieu , qui nous a aidés à élaborer ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère qui m'a soutenu durant mes sans d'humeur.

A mon père qui n'a jamais cesser de m'encourager, et que je ne peux supporter sa déception.

A mes frères :

LAID et sa femme HIZIA , ADEL , SAID et sa femme ASMAA et leur petite : SIRINE, SLIMAN et FOUAD.

A mes sœur :

FATHIA et son marie HAMOUDE et leur enfants : WIAME , MOHAMED et YOUCEF.

SAMIHA et son marie YOUCEF et leur enfants : ISHAK et ISRAE.

Et a tout ma famille.

A mes amies fidèles : SOUMIA , FATMA ZOHRA , HANAN , DALILA , RANIA , HADJER , NASSIMA , KHADIDJA et YASMINE.

A tous ceux que m' aiment et à tous ce que j' aime.

A ma binôme : SAIDA.

A tous mes aimais de la spécialité SDM (2016 / 2017).

ILHAM

Dédicace

Avant tout , je remercie le grand Dieu , qui nous a aidés à élaborer ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère qui m'a soutenu durant mes sans d'humeur.

A mon père qui n'a jamais cesser de m'encourager, et que je ne peux supporter sa déception.

A mes frères :

SAID , NOUREDIN et RIAD.

A mes sœur :

NADJIA , NASSIMA et son marie ALLAL et leur enfants : YOSRA , YASSER et ADAM.

A ma grande mère

Et a tout ma famille.

A mes amies fidèles : IMAN , FARIDA, MARIEM, AMINA , SABRINE , HANAN , IMAN et MANAL .

A tous ceux que m' aiment et à tous ce que j' aime.

A ma binôme : ILHAM.

A tous mes aimais de la spécialité SDM (2016 / 2017).

SAIDA

Résumé

ملخص:

موضوع هذا العمل هو كيفية استعمال مختلف المنحنيات من اجل الحصول عل الحديد الرمادي رقائقي الجرافيت ذا

خصائص ميكانيكية مكونات كيماوية و بنية متلازمة.

الكلمات الرئيسية حديد الزهر الرمادية والمنحنيات

Résumé :

Cette recherché (ce travail de fin d'étude) port sur les techniques d'utilisation de différents abaques afin d'obtenir une fonte grise à graphite lamellaire qui des propriétés mécaniques, des compositions des chimique et une structure corrélative.

Mots clés : fonte grise lamellaire, les abaques.

Abstract :

This research (end of studies project) discusses the techniques of using the different abacus in order to get a grey cast iron with lamellar graphite which has mechanical characteristics, chemical components and a correlative structure.

Keywords: gray cast iron, the abacus.

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

Pb : Plomb

Co : Cobalt

Céq : Carbone équivalant

Ct : Carbone total

Sc : L'indice de saturation

K : Coefficient de graphitisation

HB : La dureté à la rupture

Rm : Résistance maximal

Rr : Résistance de la rupture

Re : Limite élastique

P : La charge

F : la force

S : La surface

D : Diamètre de bille

d : Diamètre d'empreinte

Tc : Température de fusion de carbone

Tf : Température de fusion de fonte

Ts : Température de solidification

Abréviation

H : Humidité

V : Perméabilité

Liste des figures

Chapitre I		
Figure	**Titre**	**Page**
Figure.1	*Schéma de principe d'un haut-fourneau*	**6**
Figure 2	démarche descriptive et schéma de principe la coulée	**8**
Figure 3	coulée de la fonte (alliage de fer et de carbone) dons une gueuse (un moule)	**9**
Figure 4	diagramme fer-cementite	**13**
Figure 5	structure d'une fonte hypoeutectique	**14**
Figure 6	structure d'une fonte hypereutectique	**15**
Figure 7	Coupe pseudobinaire du diagramme Fe-C-Si, à 2,4 % Si	**17**

Liste des figures

Chapitre II		
Figure	**Titre**	**Page**
Figure 1	relation entre l'E.C. et la résistance a la traction des fontes lamellaires	**22**
Figure 2	Fonte à graphite lamellaire perlitique avec inclusion géométrique de sulfure de manganèse (échantillon attaqué, grossissement 100).	**25**
Figure 3	Structure cristalline de graphite.	**26**
Figure 4	Différentes formes du graphite selon la norme NF EN ISO 945-1-mai 2009.	**27**
Figure 5	Croquis de référence pour la répartition du graphite	**28**
Figure 6	Influence de Si sur les points critique C, E, S	**34**
Figure 7	relation structure composition-massivité de pièce moulée	**36**
Figure 8	Effet du P sur la formation du steadite d'une fonte grise lamellaire	**39**
Figure 9	Effet du P sur la Dureté.	**39**
Figure I10	Influence de la surchauffe sur l'importance de la surfusion à la Solidification.	**44**
Figure 11	Volume de métal enlevé jusqu'à usure de l'outil, en fonction de la vitesse de coupe lors du tournage de fontes à graphite lamellaire de différente structure.	**56**

Liste des figures

Chapitre III		
Figure	**Titre**	**Page**
Figure 1	Moule pour la coulée des éprouvettes	**61**
Figure 2	relation entre dureté HB (10-3000) et indice Sc ou Ceq et ø des barreaux (épaisseur) des fontes grise	**62**
Figure 3	Abaque permettant le calcul de la résistance à la traction la dureté HB d'un élément de pièces moule (épaisseur de la pièce) connaissant la résistance à partir d'une éprouvette usinée un barreau de 30 mm de diamètre	**65**
Figure 4	Diagramme d'OSANN : Détermination de si en fonction de C, P et de l'épaisseur de la pièce	**68**
Figure 5	Relation structure composition-massivité de pièce moulée**.**	**70**
Figure 6	Détermination de C en fonction de Si+P et de Sc	**71**
Figure 7	Diagramme de SCHNEIDEWIND : Relation entre carbone équivalent, la structure et l'épaisseur de la pièce	**72**
Figure 8	pour la détermination de la température de surchauffe de la fonte grise	**74**

Chapitre I		
Tableau	**Titre**	**Page**
Tableau 1	Type de minerais	6
Tableau 2	Désignation normalisée des fontes	10
Tableau 3	Nature de la fonte en fonction de l'épaisseur de la pièce	12
Tableau 4	Les phases et les constituantes de la fonte blanche	16

Liste des tableaux

Chapitre II		
Tableau	**Titre**	**Page**
Tableau 1	Classification des fontes à graphite lamellaire d'après la norme belge NBN 830-01.	**21**
Tableau 2	Propriétés de la ferrite en fonction de la teneur en Si .	**24**
Tableau 3	distance entre deux lamelles consécutives de cémentite	**24**
Tableau 4	classification du graphite suivant la longueur maximale des lamelles	**29**
Tableau 5	L'action graphitisant ou antigraphitisant des éléments chimiques	**32**
Tableau 6	structure –composition massivité de pièce moulée	**35**
Tableau 7	résume l'effet des principales additions faites dans le four pour l'élaboration des fontes grises.	**51**
Tableau 8	résume l'effet des principales additions faites dans La poche de coulée pour l'élaboration des fontes grises.	**51**
Tableau 9	Classification d'après essai sur barreau coulé à part.	**53**
Tableau 10	Dureté d'échantillons de fonte à graphite lamellaire rendus ferritiques par traitement thermique.	**54**
Tableau 11	Dureté brinell d'échantillons, à l'état brut de coulée et traités (férritiques), en fonction du diamètre des barreaux coulés.	**55**
Tableau 12	Résistance au choc K selon la norme NF A 03-202 de trois fontes grises à graphite lamellaire.	**56**

Liste des tableaux

Chapitre III		
Tableau	**Titre**	**Page**
Tableau 1	la norme de la FGL20	**59**
Tableau 2	Barreaux représentatifs	**60**
Tableau 3	Caractéristiques mécaniques principales pour la qualité de la fonte les plus courantes en accord avec l'ensemble de la documentation	**67**
Tableau 4	structure –composition massivité de pièce moulée	**69**

Introduction Générale

Introduction générale :

L'unité fonderie de berrouaghia (complexe POVAL) est une unité qui fabrique des pièces moulées de fonte et d'acier destinées aux secteurs industriel. Le moulage est un procédé d'obtention des pièces brutes. Après avoir coulé le métal à l'état liquide dans le moule, ce dernier se solidifie par refroidissement et prend la forme de l'empreinte qui existe à l'intérieur du moule. Le processus de fabrication dans le secteur de la fonderie est un processus très complexe dans le sens où il est difficile de connaitre l'origine de ses défauts.

La fonte est l'un des alliages destinés à la fonderie. Les fontes se distinguent des autres alliages par leur excellente coulabilité. La fonte grise est un alliage Fe-C-Si qui contient d'autres éléments tel que le manganèse, le phosphore et le soufre. Dans la structure de ces fontes, tout le carbone ou sa plus grande partie se trouve sous forme de graphite réparti de manière uniforme dans une matrice ferritique, ferritoperlitique ou perlitique.

Les fontes de moulage sont élaborées dans les fours électriques en utilisant comme charge les ferrailles d'aciers et le retour des fontes avec carburation par le graphite.

Le but de notre étude est la contribution à la maîtrise des propriétés mécaniques de la fonte FGL 20 élaborée dans un four électrique à induction dans la fonderie POVAL/BERROUAGIA.

Durant ces dernières années, le développement des fontes GL est basé sur la maîtrise de la conduite métallurgique au four et ce par l'utilisation et L'exploitation des différents ABAQUES. Ces ABAQUES ont pris de l'ampleur pour une meilleure compréhension et maîtrise des propriétés métallurgiques des fontes.

Par l'importance de ces ABAQUES l'étude a été orientée vers :

- l'optimisation de la composition chimique de l'alliage et des paramètres métallurgiques en vue d'atténuer la sensibilité à l'épaisseur et d'ajuster la structure de la matrice,
- l'établissement des corrélations entre la composition chimique de l'alliage et les propriétés mécaniques (essais de traction, dureté),
- le contrôle de la structure souhaitée (perlitique),
- la prévision des propriétés mécaniques de la fonte.

Notre travail comprend principalement deux parties, dans la première partie, nous avons présenté une recherche bibliographique dans laquelle sont rassemblées les informations théoriques et pratiques, nécessaires à comprendre les détails de ce matériau.

La deuxième partie est consacré à la compréhension L'exploitation des différents ABAQUES où sont présentés les différents exemples et en fin une conclusion.

Chapitre I

Généralités sur les fontes

I-Introduction

Le fer est très largement répandu dans l'écorce terrestre, où il se présente sous forme de minerais divers (oxydes, hydroxydes, carbonates, sulfures, silicates et autres). Depuis la préhistoire, l'être humain a appris à préparer ces minerais par lavage, concassage, criblage, élimination de la gangue, et à les traiter par réduction (fusion), agglomération sur grille ou en boulettes pour pouvoir les fondre de façon à obtenir du fer et de l'acier. A l'époque historique, une industrie florissante du fer s'est développée dans de nombreux pays à partir des gisements locaux de minerai et de la proximité de forêts qui fournissaient le combustible sous forme de charbon de bois. Au début du XVIIIe siècle, la découverte de la possibilité de remplacer le charbon de bois par le coke a révolutionné la sidérurgie, dont l'essor allait être le point de départ de tous les autres progrès de la révolution industrielle. La fabrication de l'acier ne s'est véritablement développée qu'au XIXe siècle, avec l'invention des procédés de fusion.

Aujourd'hui la production d'acier est un indice de la richesse nationale et elle est à la base de la production de masse dans de nombreux secteurs industriels tels que la construction navale, l'automobile, le bâtiment et les travaux publics, la construction mécanique, l'outillage et les équipements industriels et ménagers. Le développement des transports, en particulier par mer, ayant rendu le commerce international des matières premières (minerai de fer, charbon, ferrailles et additifs) économiquement rentable, il a contribué à battre en brèche la position privilégiée des pays possédant des gisements de minerai de fer à proximité de mines de charbon.[2]

I-2 Elaboration et désignation de la fonte: [5]

I-2-1 Minerai:

Le minerai de fer se trouve sous forme de roche. Certaines exploitations sont à ciel ouvert, d'autre est souterrain. Le minerai de fer existe en quatre combinaisons principales, soient :

- fer + oxygène (les oxydes).
- fer + oxygène + hydrogène (les hydroxydes).
- fer + oxygène + carbone (les carbonates).
- fer + soufre (les sulfures).

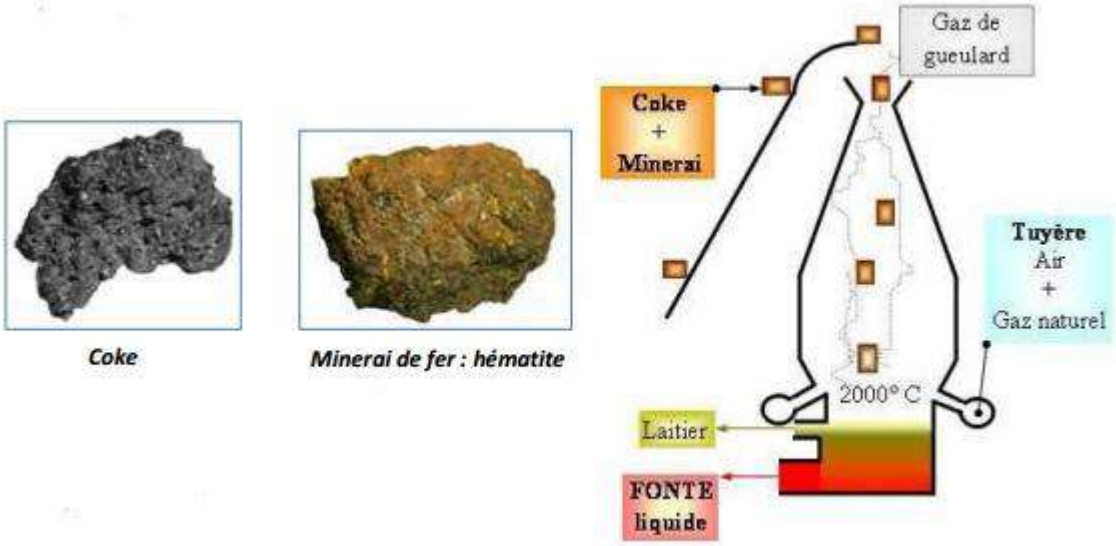


Figure 1 : *Schéma de principe d'un haut-fourneau.*

Type de minerai	Désignation chimique	formule	Teneur en fer en %	Gisements exploités
Magnétite	Protoxyde fer	Fe3O4	60-70	Espagne, Algérie, Allemagne, Suède, Norvège, U.S.A, U.R.S.S
Fer oligiste, hématite rouge	Oxyde de fer anhydre	2 Fe2 O3+3 H2 O	40-60	Inde, Ispagne, Angleterre, U.S.A,
Fer volithique hématite brune ou limonite, ou minette	Oxyde de fer hydraté	2 Fe2O3+3H2O	20-45	France, Allemagne
Fer spatique (sidérose)	Carbonate de fer	FeCO3	30-45	France, Espagne, Allemagne
Pyrite	Sulfure de fer	F2 S2	25-50	Espagne,

Tableau 1 : **type des minerais**

I-2-2 Elaboration de la fonte: [1]

On traite le minerai dans une sorte de four cylindro-conique on brique réfractaire, et en couche métallique à l'extérieure, le four lui-même appelé (Haut-fourneau). La fonte s'obtient

dans les hauts fourneaux à partir de minerai de fer et du coke (carbone). L'élévation de température conduit à la fusion de la charge et à la transformation chimique, ce qui permet d'obtenir de la fonte liquide et des résidus: laitier et gaz.

Le produit obtenue n'est pas du fer pur mais un alliage de fer et du carbone de 2,3 à 4,5% appelé fonte .Selon la façon de traitement on obtient soit de fonte blanche, soit de fonte grise. La fonte produite par le (Haut-fourneau) appelé fonte de 1ère fusion elle a 3 utilisateurs:

- 1ére fusion de l'utilisateur : coulée destinée à être utiliser dans 2eme fusion.
- 2ème utilisateur : exécution de grosse pièce par coulée directe dans les moules.
- 3éme utilisateur : fabrication de l'acier.

Avantages des fontes:

Elles permettent la réalisation des pièces moulées complexes car elles possèdent une excellente coulabilité (Aptitudes au moulage). Elles ont une excellente usinabilité, le graphite jouant le rôle de lubrifiant (mise à part les fontes blanches où le graphite n'est pas présent). Elles sont très résistantes en compression.

Inconvénients des fontes:

Les fontes grises lamellaires sont peu résistantes aux chocs, pour les autres fontes le problème de résilience est résolu par la forme non lamellaire du graphite. Les fontes FGS ne sont pas utilisées autant que les fontes FGL parce que son coût de fabrication est bien plus élevé. Les fontes blanches sont très peu utilisées sauf pour la réalisation de pièces spécifiques (Rouleaux de broyeur). Elles sont dures mais très fragiles ceci est dû à la présence de cémentite.

I-2-2-1 Principaux fontes de 1ère fusion:

Fonte grise: le carbone se trouve à l'état libre sous forme de graphite elle à une teneur en carbone et de silicium très élevée : (C : 3,5 à 4,5% et Si : 1,5 à 5%)
Propriétés : - résiste mal à la traction, usinable, bonne résistance à la compression

Fonte blanche: le carbone est combiné au fer pour donner le carbure de fer. Elle contient peu de silicium et de carbone.
Propriétés: - très dur, très fragile, difficile à usinée.

Fonte truité: Intermédiaire entre la fonte blanche et la fonte grise, le carbone et en partie déposer dans la masse sous forme de graphite et partie combinée au fer pour donner

le carbure de fer. Elle est employée pour la coulée des pièces plus résistance que les pièces en fonte grise. [1]

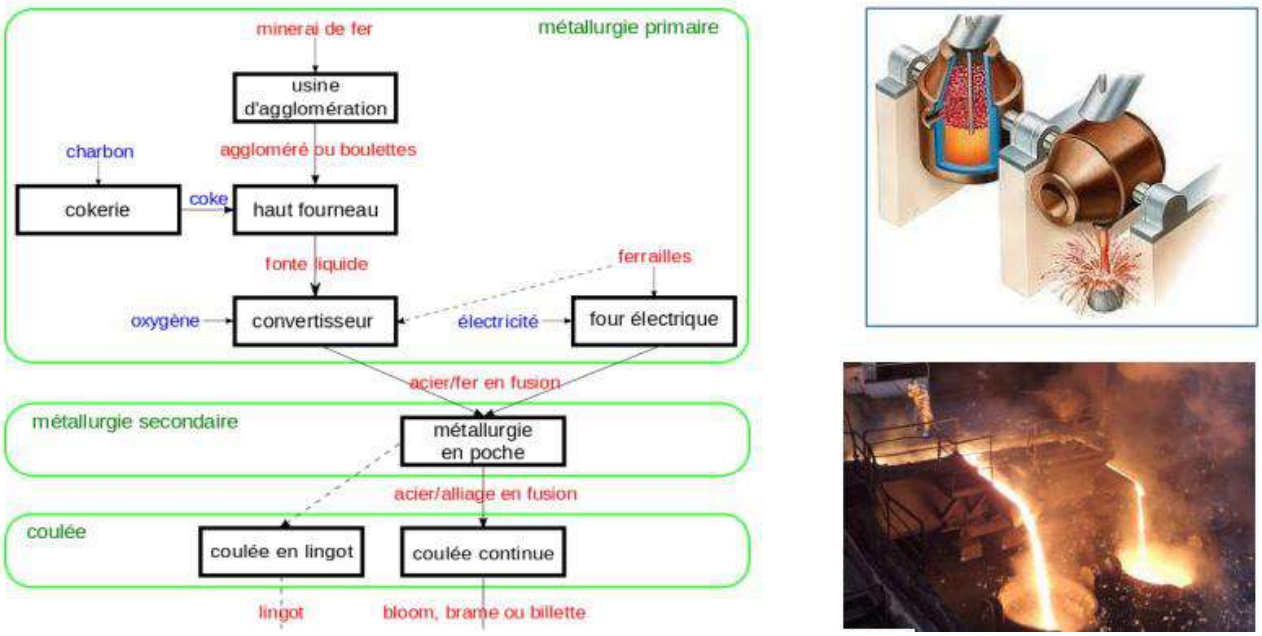


Figure 2: démarche descriptive et schéma de principe la coulée

I-2-2-2 Affinage de la fonte de 2eme fusion:

La fonte obtenue en haut-fourneau contient trop d'impuretés, pour utiliser dans la fabrication il est nécessaire de l'affiner c.à.d. de purifier, cette opération obtenue dans un cubilot par fusion de gueuses, le métal obtenue et de la fonte de 2me fusion. Différentes fontes obtenues au cubilot : suivant la construction de charge on obtient :

- Fonte grise riche en carbone de 3,5 à 4% et de silicium de 2,5 à 2,7%
- Fonte blanche, peu de carbone 2 à 2,5% et peu de silicium

Fonte à haute résistance mécanique, en mettant dans le cubilot de la fonte grise + quelque ruban d'acier. [1]

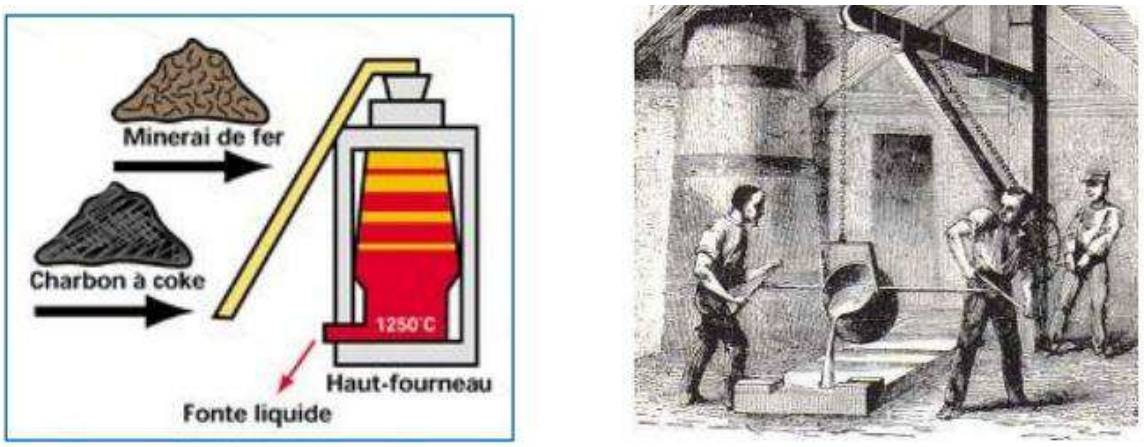


Figure 3 : coulée de la fonte (alliage de fer et de carbone) dons une gueuse (un moule)

I-2-2-3 Classification des fontes: [3]

a) Fonte grise.

b) Fonte blanche.

c) Fonte mécanique : à haute résistance, aux propriétés intermédiaires entre celle des aciers et celle des fonte grises.

d) Fonte trempée : fonte durcie superficiellement par refroidissement rapide.

e) Fonte malléable : obtenue à partir de la fonte blanche, mais traité pour donner la malléabilité et la résilience du fonte selon la façon de traitement on obtient soit : Fonte malléable à cœur blanc.

f) Fonte malléable à cœur noir C : 2 à 2,5% et Si : 1 à 1,2%.

I-2-3 Désignation normalisée des fontes: [5]

Désignation symbolique *: Deux groupes de lettres majuscules EN-GJ Suivies éventuellement (si une spécification est nécessaire) de 2 autres lettres majuscules*	***EN-GJMB-...***
facultatives, suivies d'un tiret.	

Suivies d'un groupe de chiffres et des lettres, avec 3 variables possible	EN-GJ-500-7-U

Tableau 2: Désignation normalisée des fontes

La première lettre désigne la structure du graphite (L= lamellaire, S= sphéroïdal, M= graphite de recuit (fonte malléable), V= vermiculaire, Y= structure spéciale=absence de Graphite).

La deuxième désigne si nécessaire la constitution métallographique de la fonte (A= austénitique, F= ferritiques, P= perlitiques, L= lédéburitique, Q= état trempé, T= état trempé et revenu, B= malléable à cœur noir, W= malléable à cœur blanc).

I-2-4 Rôle et importance des fontes :

La fonte est un alliage à base de fer et de carbone, se dernier varie de 2,14 jusqu'à 6,67%, et constituée d'éléments normaux (Mn, Si, S, P) et d'une faible quantité de gaz dissout.

Parmi les alliages de fonderie, les fontes sont les plus utilisées pour la coulée des pièces. Prés de 70% produite en fonderie sont en fonte, le reste se compose de pièces en acier et alliages non ferreux (respectivement 20 et 10%). [5]

I-2.-5 Propriétés fonderie :

Les propriétés fonderie peuvent être : **coulabilité, retrait.**

1- ***Coulabilité :***

C'est l'aptitude du métal liquide (fondu) de bien remplir le moule et de reproduire

Fidèlement son empreinte. Si le métal a une bonne coulabilité, le métal forme sans difficulté tous les éléments de la pièce, et le remplissage du moule sera assuré. Dans le cas Contraire (mauvaise coulabilité), le remplissage du moule sera défectueux et la pièce est généralement rebutée.

Une bonne coulabilité des métaux peut être assurée avec l'élévation de la température.

2- ***Retrait :***

On sait que tous les matériaux métalliques s'allongent sous l'effet de l'élévation de la température, et rétrécissent sous la diminution de cette dernière. A cet effet, et après une série d'essais effectués par des technologues spécialistes en fonderie, ils ont remarqués que les dimensions des pièces moulées sont inférieures à celle du modèle, et que cette différence dans les dimensions provient principalement du phénomène physique de retrait du métal au refroidissement. [9]

I-2-6 Solidification et Cristallisation des fontes :

La structure des fontes se produit en 02 étapes :

- au passage du métal de l'état liquide à l'état solide, cette étape s'appelle : **cristallisation.**
- A l'état solide cette étape s'appelle : **recristallisation.**

Les caractéristiques mécaniques et de service des fontes se détermine généralement par leur **structure**, à son tour la structure **est fonction de :**

- composition chimique ;
- mode de refroidissement (vitesse de refroidissement) ;
- état du métal liquide (température de coulée et de surchauffe) ;

Transformation complémentaire tel que : inoculation, vibration, traitements. [6]

I-2-7 Constituants d'équilibre des Fontes :

I-2-7-1 fontes blanches et fontes grises :

I-2-7-1-1 Distinction :

Les fontes sont des alliages fer- carbone de teneur en carbone comprise entre 2,14% et 6,67%, pouvant se solidifier dans deux systèmes différents :

- système métastable (fonte blanche) se forme la cémentite.
- Système stable (fonte grise) où se forme le graphite

I- 2-7-1-2 obtentions :

L'obtention de graphite ou de cémentite est conditionnée par différents facteurs :

a- vitesse de refroidissement :

Une vitesse très faible favorise l'état le plus stable, c'est-à-dire la formation de graphite, et inversement une vitesse rapide favorise l'état métastable, c'est-à-dire la formation de cémentite.

b- présence d'éléments d'addition :

Les éléments alliés peuvent être classés, suivant leur action en :

- éléments graphitisations : Si, P, Al, Ni, Cu.

- éléments cémentisants (ou antigraphitisants) : Mn, Cr, Mo, V.

c- teneur en carbone :

Une forte teneur en carbone a tendance à provoquer la formation de graphite

d- Epaisseur des moulages (épaisseur pièce) :

Une pièce épaisse favorise la formation du graphite, ainsi que le montre le tableau suivant :

Teneure (carbone + silicium)			
Epaisseur pièce en (mm)	e < 5	5 < e < 12	e > 12
Nature de la fonte	blanche	truitée	grise

Tableau 3: Nature de la fonte en fonction de l'épaisseur de la pièce.

I-2-8 Diagramme d'équilibre des fontes: [6]

La partie du diagramme correspond au domaine des fontes est située à droite du point **E**.

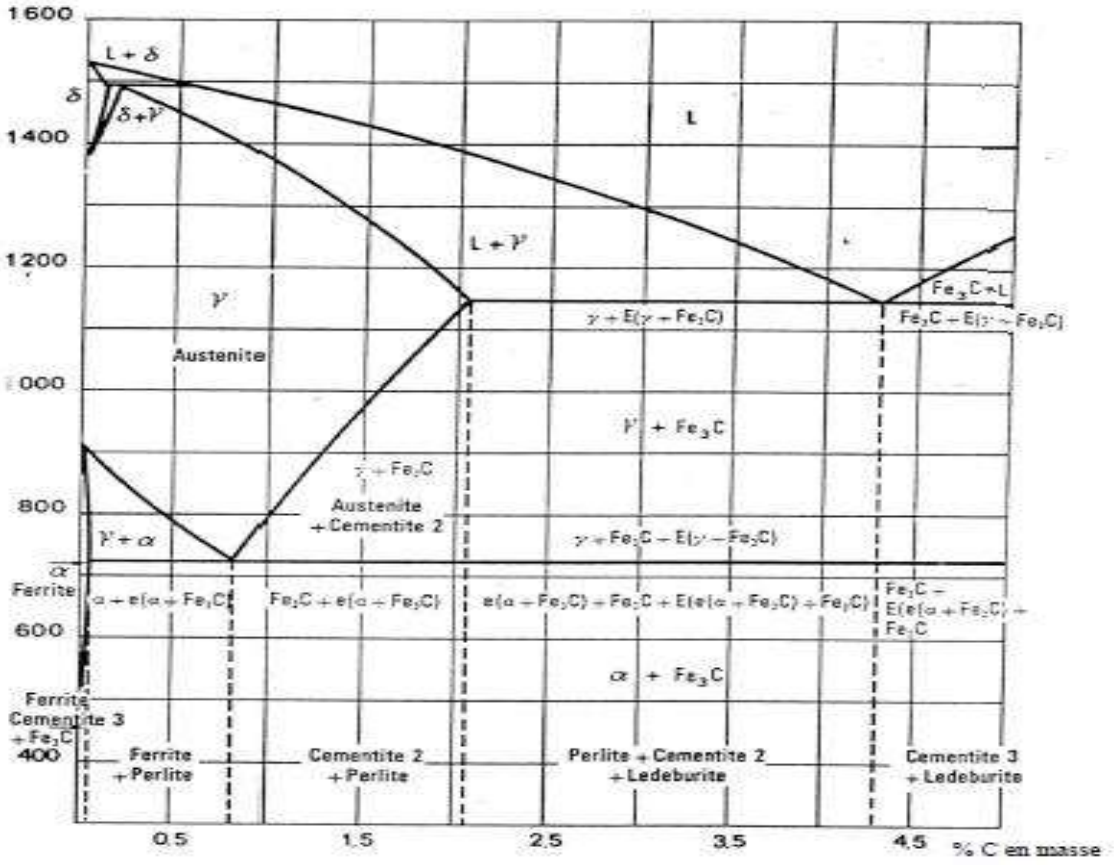


Figure 4: Diagramme fer-cémentite.

Le point **D** ~ (1500°C) du diagramme correspond au point de fusion de la cémentite.

La ligne **BC** (liquidus), au refroidissement, correspond aux températures de début de la transformation de liquide en austénite.

Au chauffage, correspond aux températures de la fin de la transformation de l'austénite en liquide.

La ligne **CD**, correspond aux températures du début de la transformation de la cémentite à partir de l'alliage liquide L.

La ligne **ECF** (solidus), correspond à la solidification de l'eutectique appelée **lédéburite.**

$$L_c \rightarrow A_e + F_{e3}C$$

La ligne eutectoide **PSK** correspond à l'évolution de l'austénite en perlite.

I-2-8-1 Cas métastable:

I-2-8-1-1 Constituant fontes blanches:

A- Constituants d'une fonte hypoeutectique :

Exemple choisi : fonte à 3% de carbone représentée par la verticale 3 du diagramme fer carbone.

a) Solidification *:* la solidification débute en $\mathbf{M_3}$ (1300°C) par transformation de liquide en **austénite primaire** et se termine en $\mathbf{N_3}$ par la transformation eutectique au cours de la quelle le liquide résiduelle se transforme en **lédéburite** (austénite + cémentite).

b) évolution de l'austénit: l'austénite évolue en deux étapes :

- de $\mathbf{N_3}$ à $\mathbf{Q_3}$ elle laisse déposer de la **cémentite secondaire.**
- en $\mathbf{Q_3}$ **(à 727°C), l'austénite se transforme en perlite.**

c) précipitation de cémentite tertiaire:

De $\mathbf{Q_3}$ à l'ambiante, la ferrite laisse déposer une petite quantité de cémentite tertiaire.

Bilan : à température ambiante, les constituants des fontes blanches hypoeutectiques sont : le lédéburite (perlite + cémentite) + perlite + cémentite secondaire.

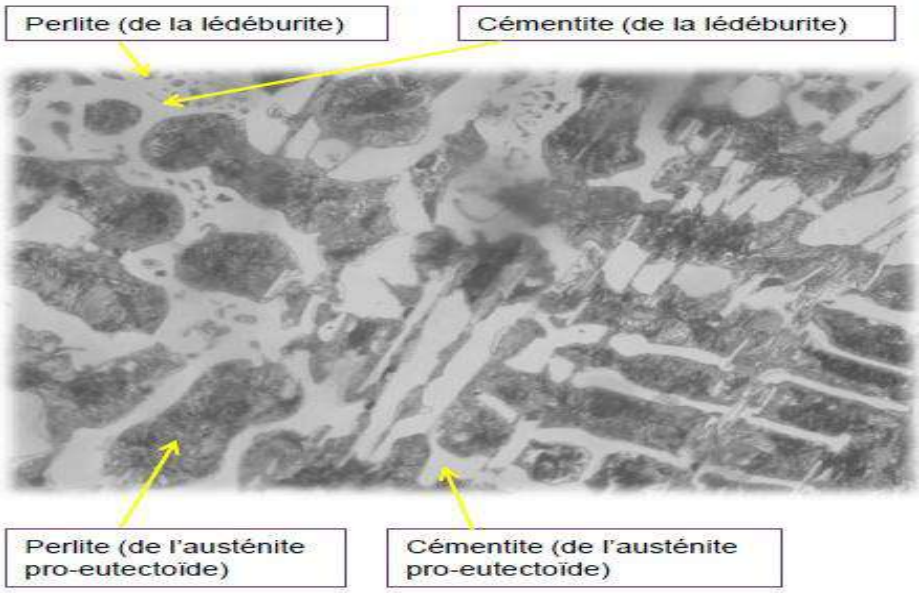


Figure 5 : structure d'une fonte hypoeutectique

Micrographie: une fonte blanche hypoeutectique permet d'observer des cristaux arrondis de perlite (qui a remplacé l'austénite), entourés de lédéburite. En blanc apparaît la cémentite secondaire.

B- Constituants d'une fonte hypereutectique :

Exemple choisi : fonte à 5% de carbone représentée par la verticale 4 du diagramme fer carbone

a) Solidification : la solidification débute en $\mathbf{M_4}$ (1228° C), par un dépôt de **cémentite primaire** et se termine en $\mathbf{N_4}$ par la transformation eutectique au cours de la quelle le liquide résiduelle se transforme en **lédéburite** (austénite + cémentite lédéburitique).

b) évolution de l'austénite: l'austénite évolue en deux étapes :

- de $\mathbf{N_4}$ à $\mathbf{Q_4}$ elle laisse déposer de la **cémentite secondaire.**
- en $\mathbf{Q_4}$ **(à 727° C), l'austénite se transforme en perlite.**

Il apparaît donc que la lédéburite se modifie puisque l'une de ces phases constitutives subit des transformations, la phase cémentite lédéburitique restant inchangée et servant de support au dépôt de cémentite secondaire.

C- précipitation de cémentite tertiaire:

De $\mathbf{Q_4}$ à l'ambiante, la ferrite laisse déposer une petite quantité de cémentite tertiaire.

Bilan : à température ambiante, les constituants des fontes blanches hypereutectiques sont : le lédéburite (perlite + cémentite) + cémentite secondaire.

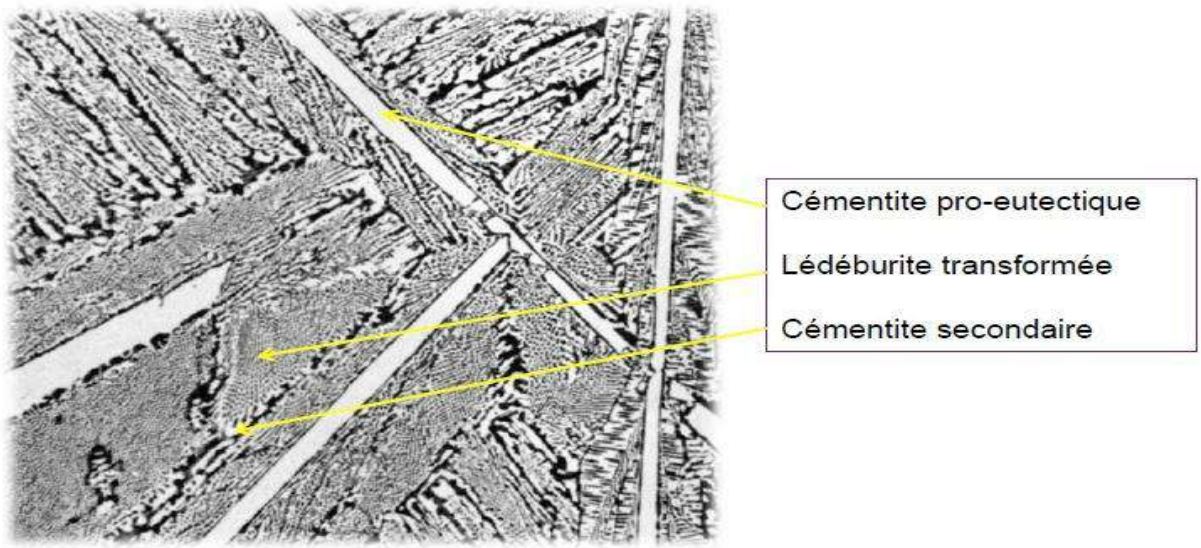


Figure 6 : Structure d'une fonte hypereutectique.

Micrographie: une fonte blanche hypereutectique montre de grandes aiguilles de cémentite primaire, en blanc, et une structure lamellaire assez grossière de lédéburite, en gris.

C - Constituants d'une fonte eutectique :

Fonte eutectique à 4,3% de carbone

a) Solidification: la solidification débute au point **E** (1147°C), par transformation de tout le liquide en eutectique appelé : **lédéburite** (austénite + cémentite lédéburitique).

***b) Refroidissement de l'austénite*:** l'austénite se refroidit sans transformation de N_2**(E)** à Q_2.

c) Réaction eutectoide :

En Q_2 toute l'austénite de lédéburite se transforme en perlite.

Bilan : à température ambiante, la structure d'une fonte blanche eutectique est entièrement lédéburitique.

Remarque :

Les diverses appellations de la cémentite permettent de distinguer son origine :
le solide qui se forme au cours de la solidification d'une fonte blanche

- hypereutectique **(au dessus de 1147° C)** est de la cémentite appelée : **cémentite primaire**.
- L'austénite (primaire ou lédéburitique), en se refroidissant de **1147° C à 727 °C,** évolue en déposant de la cémentite dite : **secondaire.**
- Enfin, la cémentite qui apparaît en **dessous de 727° C** est la cémentite **tertiaire.**

Bilan : A température ambiante, les constituants des fontes blanches dépendent de la teneur en carbone. Par contre, les phases de ces constituants sont identiques. Ces résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Nature de la fonte blanche	Hypoeutectique	Eutectique	Hypereutectique
Constituants	Lédéburite + cémentite + perlite	lédéburite	Lédéburite + cémentite
Phases	**Ferrite + cémentite**		

Tableau 4: les phases et les constituants de la fonte blanche.

I.2.8.2 Cas stable (fonte grise):

Etapes du refroidissement dans le système stable :

Elles se présentent comme pour une fonte blanche. Il suffit de remplacer le mot cémentite par le mot graphite et la teneur en carbone de la cémentite (6,67%) par celle du graphite (100%).

a) le graphite primaire de solidification des fontes hypereutectiques apparaît sous forme de longues lamelles grossières pouvant atteindre plusieurs millimètres de longueur.

b) Les autres formes du graphite (eutectique, secondaire, eutectoide) sont en lamelles beaucoup plus fines.

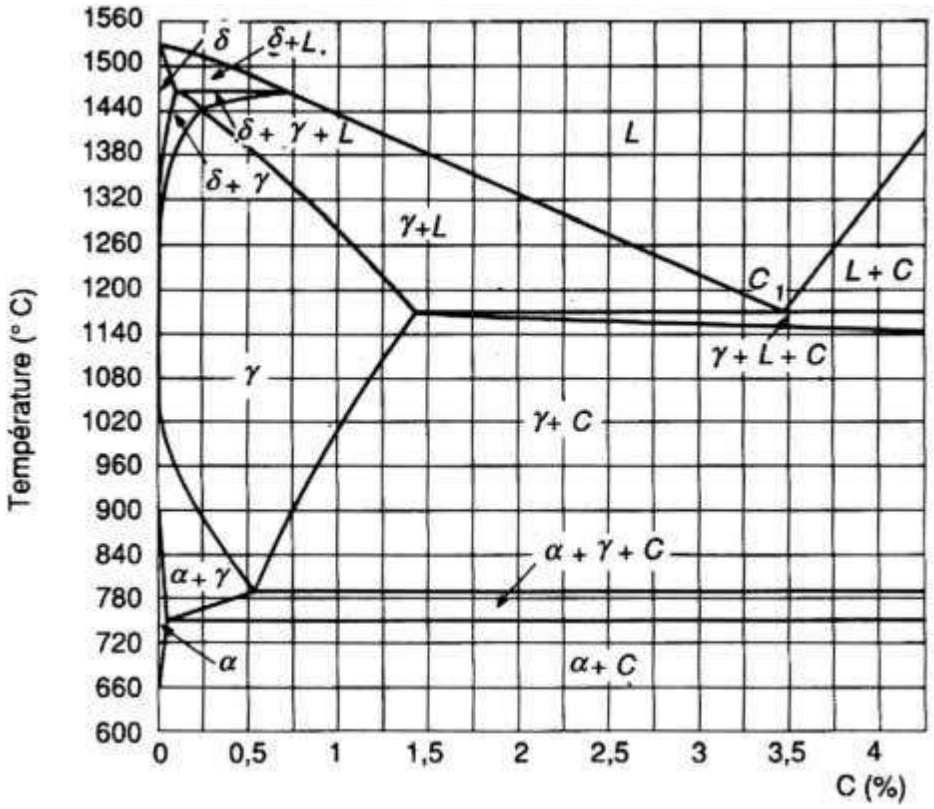


Figure 7 : Coupe pseudo binaire du diagramme Fe-C-Si, à 2,4 % Si.

I-2-8-3 Utilisation des diagrammes:

I-2-8-3-1 Refroidissement des aciers et des fontes:

Les aciers et les fontes blanches se refroidissent suivant le diagramme métastable. Par contre, les fontes grises se refroidissent suivant le diagramme stable.

I-2-8-3-2 limitations d'emploi: [6]

a) se sont des diagrammes d'équilibre: ils donc utilisables uniquement pour déterminer les constituants d'une fonte ou d'un acier refroidi lentement, après un traitement de recuit, par exemple (mais jamais après un traitement de trempe).

b) se sont des diagrammes d'alliages binaires: ils ne s'appliquent qu'aux fontes et aux aciers non alliés, ou à la rigueur faiblement alliés.

I-3 Utilisations des fontes :

La fonte est utilisée pour tout type de pièce mécanique. Pour leur majorité les pièces sont obtenues par coulée du métal liquide dans des moules en sable siliceux.

- La fonte FGL est utilisée pour la fabrication de disques de freins, contrepoids (chariot élévateur), pour la réalisation d'éléments de chauffage, particulièrement ceux de haut de gamme.
- La fonte FGL est incontournable pour la réalisation des plaques de cheminée et d'inserts de cheminée.
- Les fontes FGL sont utilisées pour la réalisation de mobiliers urbains comme les bancs et les rambardes ouvragées (Bouches de métro Guimard), et en ornementation de bâtiments comme les appuis de fenêtre, les rosaces de portail, les pics de grille.
- La fonte FGL est utilisée pour la fabrication de conduites et de tuyaux. À l'exclusion, depuis quelques années, des conduites de gaz de ville car elle est trop cassante vis-à-vis des sollicitations du trafic des véhicules lourds et particulièrement lors de l'utilisation de rouleaux compresseurs à vibration par les travaux de.
- La fonte FGL est préférée pour la réalisation des bâtis de machines-outils car elle a une très bonne capacité d'absorption des vibrations. [6]

Chapitre II

Élaboration de la fonte à graphite lamellaire

II Introduction:

Les très nombreuses applications des fontes à graphite lamellaire reposent sur un ensemble de propriétés remarquables et spécifiques :

- résistance aux contraintes statiques et aux efforts alternés
- faible sensibilité à l'entaille
- grande capacité d'amortissement des vibrations
- résistance à l'usure
- résistance aux corrosions par les milieux humides et par les sols
- matériau parfaitement adapté à la réalisation de formes très compliquées en raison de sa coulabilité
- usinabilité excellente
- prix de revient relativement stable et peu élevé.

La croissance de nos connaissances concernant ce matériau et l'utilisation de méthodes d'élaboration et de contrôle de plus en plus performantes et précises, permettent de garantir des qualités très régulières.il n'est donc pas étonnant que les fontes à graphite lamellaire trouvent dans l'industrie l'emploi de tonnages pratiquement aussi importants que l'ensemble de tous les autres alliages de fonderie. [4]

II-2 Classification des fontes à graphite lamellaire :

Les différents types de fontes à graphite lamellaire sont classés d'après la valeur de leur résistance à la traction déterminée à partir d'un essai de traction sur éprouvettes standardisées usinées dans les barreaux, bruts de coulée, de 20 mm de diamètre.

Le tableau 1 montre comment la classification de la fonte à graphite lamellaire sont définies par la norme belge NBN 830-01.

Désignation abrégé	Résistance minimale à la traction	
	Kgf / mm^2	daN / mm^2
FGL10	10	9,8
FGL15	15	14,7
FGL20	20	19,6
FGL25	25	24,5
FGL30	30	29,4
FGL35	35	34,3
FGL40	40	39,2

Tableau 1-Classification des fortes à graphite lamellaire d'après la norme belge NBN 830-01. [4]

II-3 Estimation de la structure des fontes d'après le diagramme Fer- carbone :

II-3-1 Carbone équivalent C_{eq}:

Le carbone équivalent d'une fonte normale (fonte liquide) est la teneur en **carbone total,** que **devrait avoir une fonte théorique** pour que, les conditions de refroidissement des deux fontes considérées **étant les mêmes,** elles présentent à froid des structures identiques.

$$C_{eq} = C_T + 1/3\ (Si + P)$$

Le fondeur utilise cette relation très fréquemment pour garantir les propriétés mécaniques des pièces coulées. Une mesure parfaite de la valeur de l'équivalent de carbone est donc indispensable.

Une fonte normale est dite :

- **hypo** eutectique si son $C_{eq} < 4,3$
- **eutectique** si son $C_{eq} = 4,3$
- **hyper** eutectique si son $C_{eq} > 4,3$

*** carbone Total :** que l'on écrit C_T **le % de C** que, dans une fonte, révèle l'analyse chimique.

Une augmentation de la Ceq **accru** la proportion en volume du graphite, bien que **la résistance diminue (voir figure 1)**, d'autres caractéristiques sont simultanément **améliorées,** comme par exemple l'usinabilité, la coulabilité, la conductibilité calorifique, la capacité d'amortissements des vibrations et la résistance à l'usure.

NB **:** En conséquence, d'après la figure, en cas d'exigence d'une fonte à haute résistance, il faut soit **diminuer** le **CE,** avec le risque d'une solidification truitée ou blanche (trempe lédéburitique), soit **ajouter** des éléments d'alliage à la fonte.

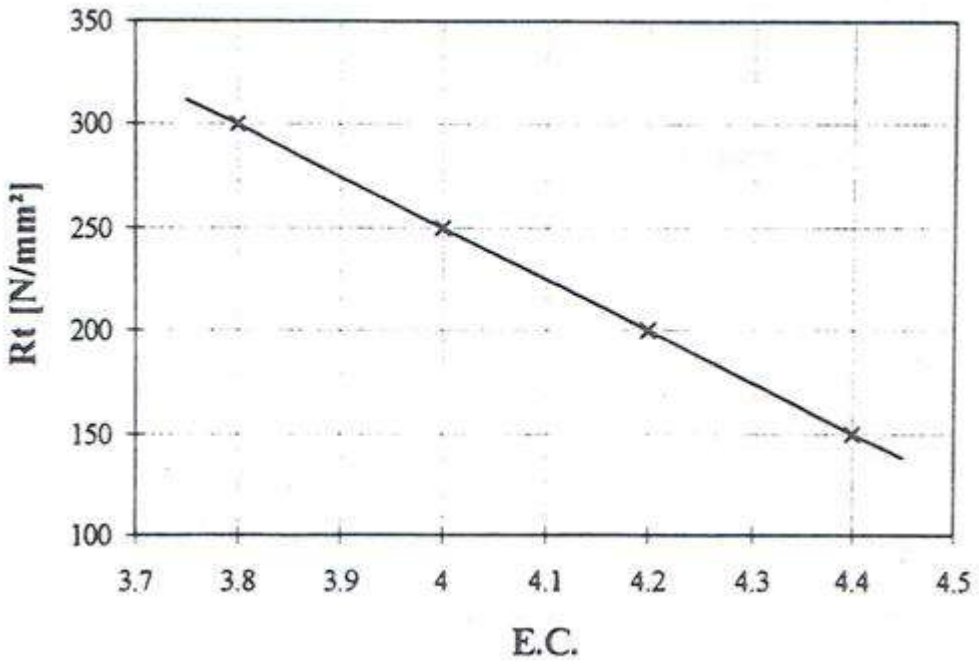


Figure 1: relation entre Ceq et la résistance a la traction des fontes lamellaires. [4]

II-3-2 Indice de Saturation en Carbone S_C: [10]

Pour estimer l**a proche des points eutectiques** des fontes à obtenir, on utilise

Le degré d'eutecticité (ou **indice de saturation en carbone eutectique)**

Ce dernier peut être calculé d'après la formule suivante :

$$S_C = C_t - C_{E\,(E')} / C_{C(C')} - C_{E(E')}$$

Pour les deux états (stables et métastables) dont :

C_t **:** teneur du carbone de la fonte donnée.

$C_{E\,(E')}$ **:** teneur du carbone au point E et E' du diagramme.

$C_{C(C')}$ **:** teneur du carbone au point eutectique du diagramme.

Une fonte normale est dite :

- hypo eutectique si son $S_C < 1$
- eutectique si son $S_C = 1$

- hyper eutectique si son $S_C > 1$

Pour une fonte réelle, il faut tenir compte du déplacement des différents points du diagramme (les points critique **C, E, S**).

Sous l'influence des éléments chimiques constituants, des expériences ont montré que les points E et C peuvent varier suivant les relations suivantes :

Etat stable : $C_{E'} = 2,11 - 0,15\ Si - 0,3\ P$

$C_{C'} = 4,26 - 0,3\ (Si + P)$ } fonte grise

Etat métastable : $C_E = 2,14 - 0,3\ (Si + P)$

$C_C = 4,3 - 0,3\ (Si + P)$ } fonte blanche

NB :

Fonte grise = % C varie de 2,4 à 3,8%.
% Si varie de 1,2 à 3,5%.

Fonte blanche = % C varie de 2,9 à 3,2%.
% Si varie de 1 à 1,5%.

- Si les deux éléments Si et C sont **importants,** on a une cristallisation de **fonte grise.**
- Si les deux éléments Si et C sont **faibles,** on a une cristallisation de **fonte blanche.**
- Si on a **C important** et **Si faible** on a une cristallisation de la **fonte blanche, l'inverse on a une fonte grise. [4]**

II-4 Propriétés et rôle des constituants :

La fonte grise contient du graphite dans une matrice perlitique. En fonction de la composition de la fonte considérée, et de la vitesse de refroidissement, la matrice peut entre autres contenir à son tour des teneurs variables en ferrite ou en cémentite, des cristaux d'eutectique phosphoreux et d'autres inclusions secondaires dont le rôle est généralement négligeables. [1]

II-4-1 Matrice :

II- 4-1-1 Ferrite :

Ce constituant est une solution solide de fer sous sa forme allotropique cubique centré. Elle ne dissout pratiquement pas de carbone. Par contre, la ferrite contient en solution solide du manganèse et une quantité appréciable de silicium.

D'autres éléments d'alliage peuvent être dissous dans la ferrite, tels que le cuivre ou le nickel. La ferrite des fontes est usinable malgré une teneur en silicium dissous importante, modifie les caractéristiques de la fonte.

Propriétés de la ferrite en fonction de la teneur en Si			
Type de ferrite	**Caractéristiques mécaniques**		
	R_m	**A%**	**HB**
Ferrite pur	**275**	**61**	**75**
Ferrite à 0,82%Si	**309**	**50**	**88**
Ferrite à 2,28%Si	**437**	**43**	**124**
Ferrite à 3,4%Si	**530**	**28**	**150**

Tableau 2: Propriétés de la ferrite en fonction de la teneur en Si .

II- 4-1-2 Perlite :

La perlite est constituée de couches alternées de ferrite et de cémentite **(Figure 2)**.

La dureté, la résistance mécanique, l'usinabilité et la résistance à l'usure de la perlite dépendent avant tout de sa **finesse Δ_0 (µm).**

Structure	**Perlite**	**Sorbite**	**Troostite**
Δ_0 (µm)	**0,6 à 1**	**0,25 à 0,3**	**0,1 à 0,15**
HB	**180 à 250**	**250 à 350**	**350 à 450**

Tableau 3: distance entre deux lamelles consécutives de cémentite.

Le Cu, Ni, Cr, Mo, V, Mn affinent la perlite.



Figure 2 : Fonte à graphite lamellaire perlitique avec inclusion géométrique de Sulfure de manganèse (échantillon attaqué, grossissement 100).

II- 4-1-3 Cémentite :

La cémentite est un carbure de fer. Sa formule de composition chimique Fe3C correspond à un pourcentage massique de carbone égal à 6,67 %. Ce composé défini, de type interstitiel, a une structure cristalline orthorhombique. La maille élémentaire contient 4 atomes de carbone pour 12 atomes de fer à des distances non identiques.

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 d'alliages tels que comme exemple le chrome $Fe_3C \rightarrow (Fe, Cr)_3 C$ [1].

II- 4-1-4 Carbures :

Les fontes à carbures s'identifient par leurs carbures massifs. De tels carbures peuvent se retrouver dans la matrice, soit en raison d'un refroidissement particulièrement rapide à la fin de la solidification, soit par suite de la présence d'éléments stabilisant les carbures tels que le chrome, le molybdène, le manganèse, etc.

II- 4-2 Graphite :

Le pourcentage massique de 3 % de graphite correspond à un pourcentage volumique d'environ 10,2 %.Cette remarque est loin d'être anodine, car les propriétés
D'un matériau dépendent essentiellement de la fraction volumique de ses constituants et non de leur fraction massique.

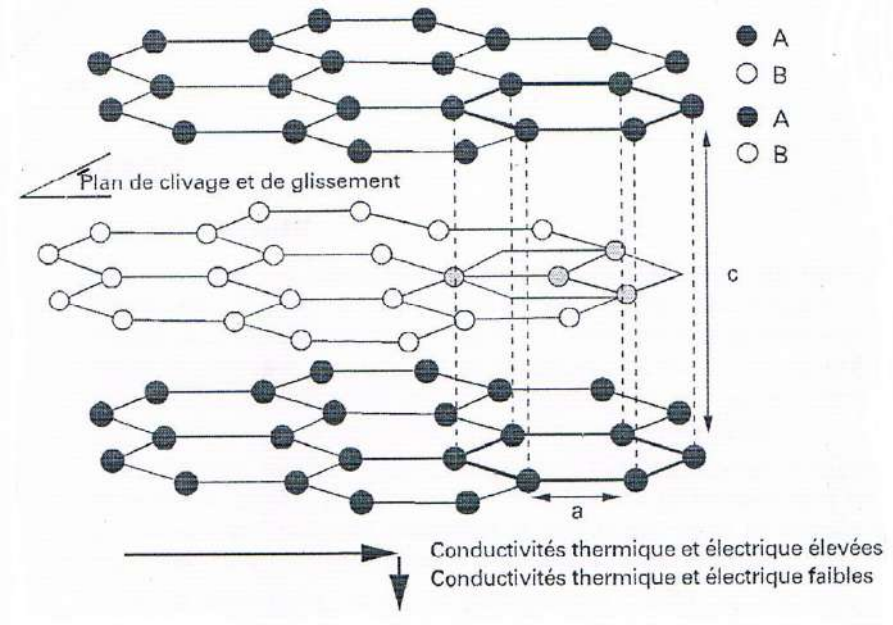


Figure 3: Structure cristalline de graphite.[1]

II-5- Les différents aspects du graphite :

Le carbone sous forme de graphite **' carbone libre',** occupant à masse égale, un volume **plus grand** que lorsqu'il est sous la **forme combinée**, la formation du graphite dans la fonte, s'accompagne d'une **expansion**, et, les fontes moulées dans les quelles il y a du graphite ont un **retrait beaucoup plus faible** que celles qui n'en contiennent pas selon les conditions dans les quelles il prend naissance dans les fontes [1].

Le graphite se présente dans celle-ci sous les divers aspects suivants :

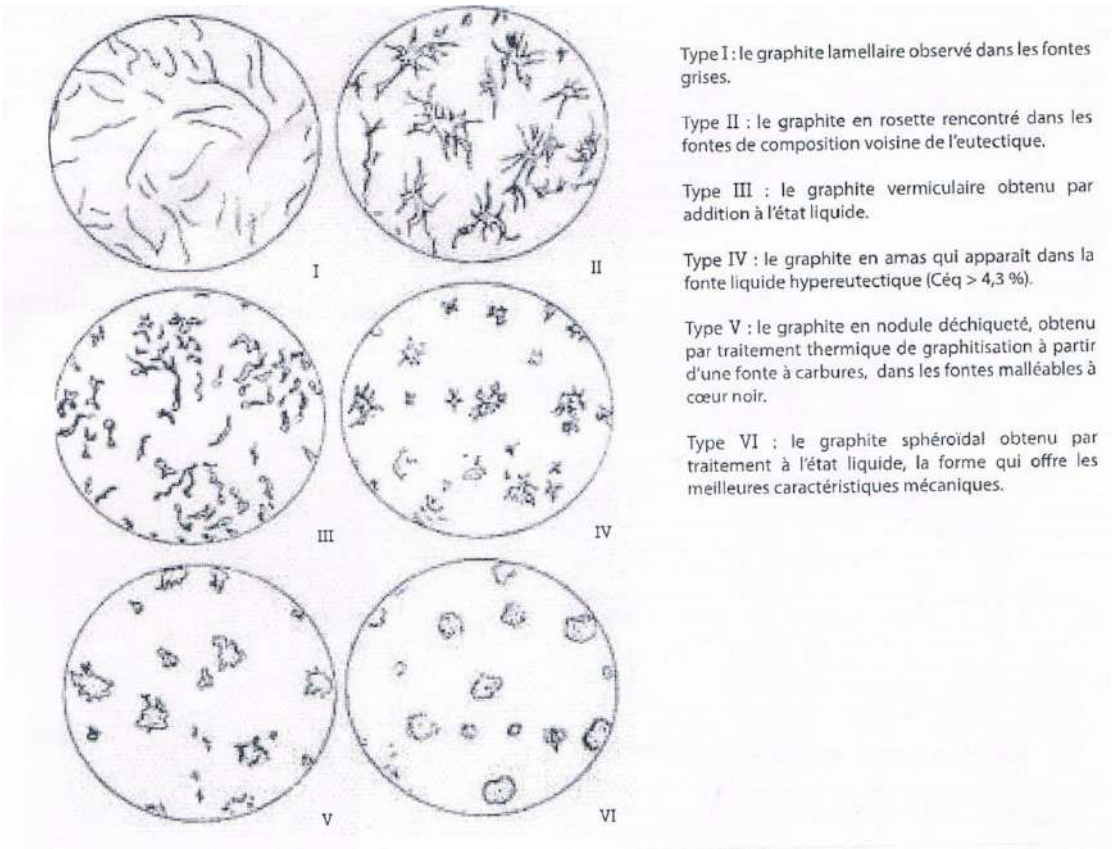


Figure 4: Différentes formes du graphite selon la norme NF EN ISO 945-1-mai 2009.

II-5-1 graphite dit : en paillettes ou lamellaire.

C'est celui qui se forme dans la plus part des fontes moulées normales et dans de nombreux cas de fontes moulées alliés.

Le graphite lamellaire peut se présenter sous divers aspects (ou types), dont l'allure dépend de la composition chimique de la fonte et les conditions de refroidissement de celle-ci.

Les principaux types de graphite lamellaire sont les suivants :

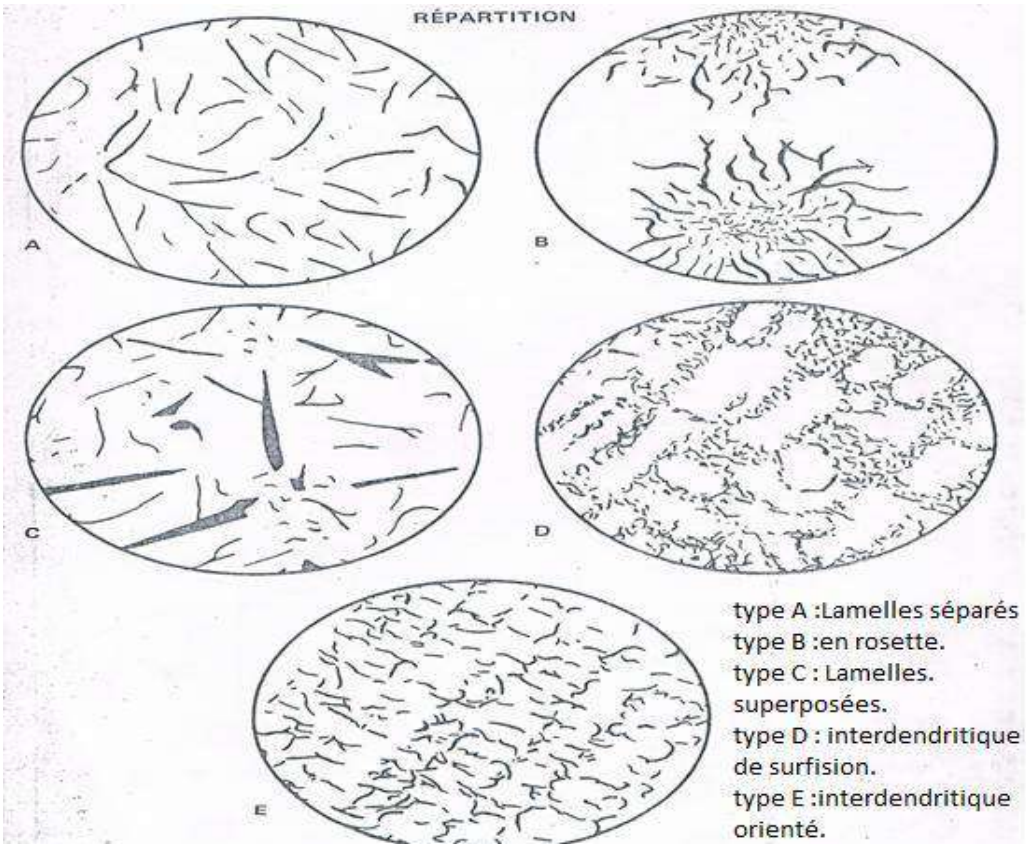


Figure 5: Croquis de référence pour la répartition du graphite**.**

- graphite type A : en "lamelles séparés" :

De dimensions à peu prés semblables, distribuées uniformément dans la masse de la fonte.

Ce type de graphite est celui que l'on rencontre le plus généralement dans les pièces d'épaisseur moyenne coulées en sable, lorsque la fonte est voisine de l'eutectique ou légèrement hypoeutectique (CE = 4 à 4,4).

Le graphite type A est, d'après la longueur **L** des lamelles, classé en **08** dimensions (N°1 à 8).

Dimension	Longueur L (mm)
N°1	L >1
N°2	1 > L > 0 ,5
N°3	0,5 > L > 0 ,25
N°4	0,25 > L > 0 ,12
N°5	0,12 > L > 0 ,06
N°6	0,06 > L > 0 ,03
N°7	0,03 > L > 0 ,15
N°8	0,015 > L

Tableau 4: classification du graphite suivant la longueur maximale des lamelles.

- graphite type B : en "Rosette" :

Ayant pour origine **un centre de cristallisation.** Ce type de graphite se rencontre dans le cas de pièces refroidies rapidement (épaisseur voisine, par exemple, de 10 mm dans le cas de la coulée en sable) et également dans les pièces coules avec une fonte dont la température est relativement basse, et la teneur en carbone élevée.

- graphite type C :

Lamelles de très grande dimensions (0,3 mm< L < 0 ,5 mm) orientes en tous sens, entre les quelles sont disséminées un grand nombre de lamelles de petite dimension (0,01 mm< L < 0 ,08 mm). On n'observe cette structure que dans le cas de **fontes hypereutectiques** refroidies assez lentement (CE = 4,5 ; épaisseurs dépassant 20 à 30mm, coulée en sable).

Les gros amas de graphite sont constitués par du graphite hypereutectique déposé l'eutectique (graphite – austénite) ; les lamelles plus fines font partie de l'agrégat eutectique.

- graphite type D : "Interdendritique'' :

A orientation désordonnées (L < 0 ,01 mm). Ce type de graphite se rencontre lorsqu'il y a eu refroidissement rapide (et également dans les **zones de transition,**) c'est-à-dire entre les portions de pièces en fontes dans les quelles il y a du graphite type A ou type B, et celles ou il n'y a pas de graphite du tout.

- graphite type E : "Interdendritique'' :

A orientation ordonnée. Cette distribution du graphite est caractéristique d'une vitesse de refroidissement moyenne ou faible et surtout d'un caractère hypoeutectique très marqué. [1]

II-5-2 Graphite Sphéroïdale:

Il se présente dans la fonte sous forme de petites sphères aux **contours bien lisses** (diamètre variable : de 0,01mm à 0,1mm). Se rencontre dans les fontes dites **à graphite sphéroïdale** ou **fontes GS.**

II-5-3 Graphites en Nodules :

Egalement dit "**en crabe**", il est réparti dans la fonte sous forme d'amas ou nodules (inscrits dans des cercles de 0,05 à 0,2mm de diamètre) aux contours déchiquetés, obtenu par traitement thermique dans les fontes malléables.

II- 6- influence du graphite dans les fontes grises moulées :

- Il facilite l'usinage **(lubrifiant).**
- Il confère aux fontes grises, une grande capacité **d'amortissement** des vibrations.
- Il ne permet pas l'obtention des surfaces usinées **glacées.**
- Il favorise les conditions de frottement (cavités superficielles du graphite jouant le rôle du "**coin d'huile**".
- Il augmente la **coulabilité** des fontes.
- Le graphite est la cause de "**l'effet d'entaille**" dans la masse.
- Le graphite sphéroïdal donne lieu à de **faible concentration de contraintes.**
- Le graphite nodulaire est déjà **moins favorable** à ce sujet.
- Le graphite lamellaire présente toutes les conditions pour que les concentrations de contraintes soient **maximales.**

Ceci explique pourquoi, à **structure de matrices identiques,** il existe entre les trois types de fontes respectivement caractérisées par chacun des types de graphite, **importantes différences** entre les valeurs de résistance à la rupture $\mathbf{R_m}$

Nb : le graphite **vermiculaire** (en pseudo lamelles) présentant des bords arrondis a moins d'influence que le graphite en lamelles en ce qui concerne l'effet d'entaille [6].

II- 7 Graphitisation des fontes :

La graphitisation des fontes est soumise au **principe de la cristallisation.** Ce processus (c'est-à-dire graphitisation) se compose des **étapes suivantes :**

II-7-1 germination du graphite : qui peut être :

a- germination homogène spontanée : c'est-à-dire énergie libre très faible (stable).

b- germination hétérogène à support : qui peut être sur les inclusions se trouvant dans le liquide.

Inclusions de type (oxyde nitrique, sulfurique, carbure, carbonitrure, etc…..).

c- germination forcée par inoculation

II-7-2 Décomposition des carbures : en particulier de la cémentite Fe_3C.

II-7-3 Diffusion du carbone : cas de l'austénite.

II-7-4 Croissance du carbone sous forme de graphite:

On sait que d'après le principe thermodynamique, que le système ayant le moins d'énergie libre est le plus stable.

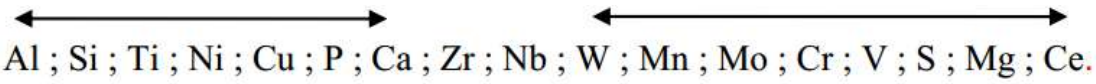
Par contre la cinétique dite comment et à quelle vitesse peut se dérouler la réaction. [6]

II- 8 Influence des différents facteurs sur la cristallisation :

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.

II-8-1 Composition Chimique : (Influence des éléments Normaux) :

On classe les éléments chimiques selon leurs influences sur la graphitisation, on obtient la série approximative suivante :



A gauche : les éléments graphitisants.

A droite : les éléments antigraphitisants.

Les deux éléments en milieu sont des éléments neutres

L'action graphitisants ou antigraphitisants des éléments chimiques dépend de leur teneur ou leur quantité, et de la température de différentes réactions.

L'effet des éléments chimiques approximatif sur la graphitisation est donné au tableau suivant:

Zones	Si (<10% ; 22à 26) Al (<4% ; 18à 24)	Si (12 à 20%) Al (5 à 18%) Cr; V ; Mn ; Mo ; W ; Mg (>0,01) Sb ; Ti (>0,12)	Ni ; Cu ; P ; Co (4 à 10%) Ce ; Mg (<0,021)	Zr ;Nb ; Sn ; Pb ; As ; B ; Ta
Proeutectique	+	-	+	**0**
Eutectique	+	-	+	**0**
Proeutectoide	+	-	+	**0**
Eutectoide	+	-	-	-
Posteutectoide	+	-	-	-

+ : graphitisants ; - : antigraphitisants

Tableau 5: L'action graphitisant ou antigraphitisant des éléments chimiques [10]

L'action graphitisation ou antigraphitisant des éléments chimiques dépend de :

- l'intensité des forces de liaison entre le fer, le carbone et l'élément d'addition.
- variation de l'intervalle eutectique (stable ou métastable).
- influence sur la translation des points critiques du diagramme et surtout la variation de la saturation de l'austénite en carbone.
- de leurs teneurs ou leurs quantités, et de la température de différentes réactions.

II-8-1-1 le carbone :

La majeure partie du carbone présent dans la fonte grise se trouve sous la forme de graphite. Un accroissement de la teneur en carbone total entraine une augmentation de la quantité de graphite, d'ou un abaissement de la résistance mécanique et de la dureté.

Donc la teneur en carbone d'une fonte grise doit d'autant plus basse que les résistances mécaniques recherchées sont élevées.

Le carbone améliore également la coulabilité de la fonte grise.

La quantité de graphite est proportionnelle à celle du carbone .donc l'étude de l'influence du carbone (sur les propriétés mécaniques de la fonte grise) nous ramène à l'étude de l'influence du graphite.

Notons, à ce sujet, que la caractéristique remarquable d'une fonte est sa facilité de mise en œuvre et ses remarquables propriétés de fonderie. Or les fontes à faible teneur en carbone (3%) rentassent considérablement en même temps que leur coulabilité diminue, et ce malgré l'amélioration de la résistance, c'est pourquoi, généralement on n'abaisse pas la teneur en carbone pour une fonte à moins de 2.8.

II-8-1-2 Influence de Silicium : Tf°= 1480°C ξ = 2,35g/cm3

***** le Si se dissout dans le fer γ avec plus de facilité que la carbone. Pour cette raison, on dit que le **Si diminue la solubilité du carbone dans le fer γ**. Donc il y a d'autant de graphite que la teneur est plus élevée, et pour cette raison encore le Si est dit **élément graphitisant.**

***** le Si **abaisse la T°C de transformation eutectique à l'état métastable,** et **augmente** simultanément **la T°C de transformation eutectique à l'état stable.**

Il contribue donc à la graphitisation lors de la cristallisation des fontes, toute en diminuant les forces de liaison inter atomique entre le fer et le carbone, et conduit à la décomposition de la cémentite.

***** le Si augmente l'activité chimique du carbone, et diminue son affinité chimique.

Influence de Si sur les points critiques **C, E, S** du digramme peut être représenté par la figure suivante.

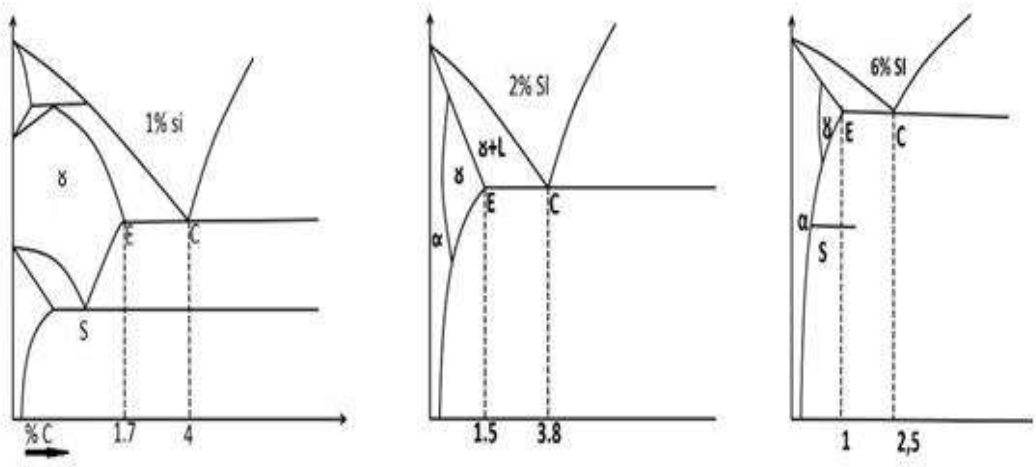


Figure 6 : Influence de Si sur les points critique C, E, S.

Il déplace les points critiques du diagramme du **coté de basse teneur en C**, et **du coté de haute température** c'est un élément **alphagène.**

***** le Si a sur la fonte **à vitesse de refroidissement donnée** un effet **comparable à celui du carbone.**

Et à **teneur en carbone donnée, il agit dans le même sens que la vitesse de refroidissement.** [6]

La teneur en Si d'une fonte, doit donc être **''ajustée''** en fonction :

- de la teneur en carbone de la fonte
- de la vitesse de refroidissement des pièces moulées (épaisseur)

Le choix de la composition chimique en fonction de la structure se basse sur les diagrammes structuraux.

a-Diagramme de LAPLANCHE:

Leur diagramme apporte une correction importante par rapport à celui de **MAURER, les limites des domaines sont des courbes.**

Zone	Type de fonte révélée par cassure	Constituants de la fonte correspondante
I	Blanche	Cémentite + perlite
II	Truitée	Cémentite + perlite + graphite
III	Perlitique	perlite + graphite
IV	Ferrite-perlitique	perlite + graphite + ferrite
V	Ferritique	graphite + ferrite

Tableau 6 : structure –composition massivité de pièce moulée

Constitué à présent le meilleur graphe de prédiction de la structure d'une fonte Connaissant :
- le diamètre ou l'épaisseur de la pièce moulée ;
- les titres en C et Si.

Les graphes de LAPLANCHE **(Figure 7)** se rapportent à des fontes industrielles, non alliées, dont l'analyse reste comprise dans les limites suivantes :

C < 6% Si < 6 % Mn = 0,6 à 0,8 % S < 0,8 % P < 0,12 %

Les essais ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques de diamètre croissant Ø = 6, 10, 20, 35,48.

Des études préalables ont montré qu'une éprouvette cylindrique de Ø = 2r présente la Même surface spécifique de refroidissement qu'une plaque d'épaisseur e.

- On rappelle surface spécifique le rapport S / V de la surface au volume de la pièce Moulée ;

- une éprouvette se refroidit dans un moule comme la pièce moulée à produire si la surface spécifique de l'éprouvette égale la surface spécifique de la pièce moulée.

La structure obtenue dans l'éprouvette est alors significatif ou représentative de celle de moulage.

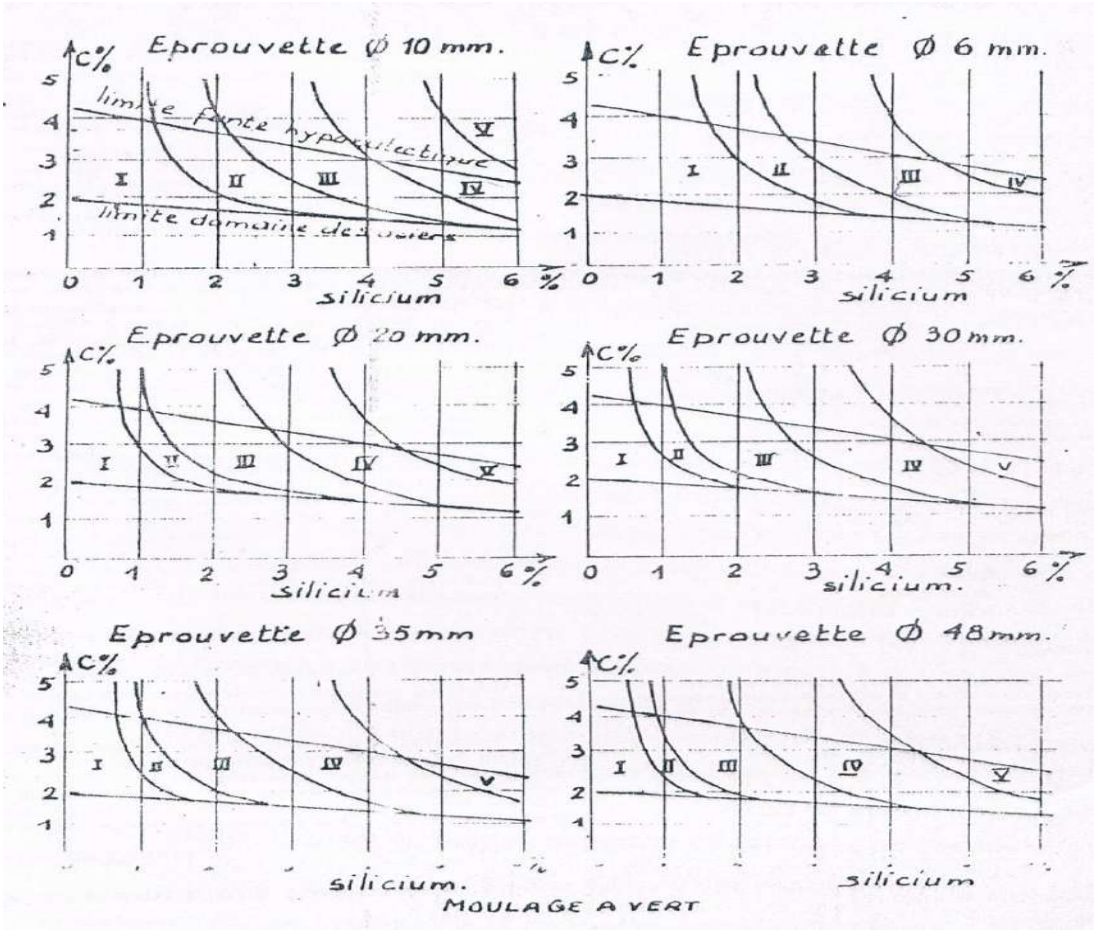


Figure 7 : Relation structure composition-massivité de pièce moulée.

II-8-1-2-1 Contrôle de l'aptitude à la graphitisation :

La connaissance des diagrammes précédents n'exclut pas l'expérimentation pratique par **l'essai de trempe** de la fonte.

Essai : cet essai consiste à couler une **éprouvette normalisée** (appelée **éprouvette de trempabilité) dans un moule de sable étuvé.**

Paramètres d'influences :

La profondeur P_T, c'est-à-dire l'aptitude à la trempe de la fonte dépend de nombreux facteurs tels que :

- le titre en Si ;
- le titre en C ;
- les titres en éléments antigraphitisants tel que : Mn, Cr, S,…..
- température de coulée ;

- la nature des charges (hérédité structurale).

II-8-1-3 Influence de manganèse : Tf°= 1245°C ξ = 7,45g/cm3:

Pour garantir des propriétés optimales, la fonte à graphite lamellaire doit contenir, outre une quantité minimale de soufre, une teneur optimale en manganèse.

Le manganèse est ajouté pour neutraliser l'action du soufre en formant du sulfure de manganèse MNS insoluble dans la fonte et inoffensif à l'état d'inoculation.

Fe + S → FeS **FeS + Mn → Fe + MnS**

Plusieurs études ont démontré que la **teneur optimale** en manganèse est déterminée par la Formule suivante :

%Mn = 1,72%S + 0,2 à 0,3

Tout écart par rapport à cette teneur optimale aura une influence sur la profondeur de trempe et les propriétés mécaniques de la fonte.

Lorsque cette teneur en manganèse dépasse cette valeur, il **affine** la perlite et augmente légèrement la dureté de la fonte

.

Au-delà de 1%, il s'oppose à la graphitisation, c'est un **antigraphitisant** (il augmente l'intensité des forces de liaison entre le fer et le carbone).

Le Mn influe peu sur l'intervalle de température eutectique, mais abaisse la transformation eutectoide ($\gamma \rightarrow \alpha$), parce que le Mn est un élément **gammagène** (élargie le domaine de la solution solide γ c'est-à-dire de l'austénite.)

II-8-1-4 Influence de Phosphore : Tf°= 610°C ξ = 2,33 g/cm3

Comme le Si, le P diminue la solubilité du C dans les fontes liquides et déplace-les Points critique du coté de la basse teneur en C et haute T°C.

L'effet graphitisant du P est dû :

_ ↑ L'intervalle eutectique.

_ ↓ la solubilité du **C** dans les solutions solides γ et α.

_ Influe très peu sur les forces de liaison entre le fer et le carbone.

_ Le P se combine facilement au fer pour donner un **phosphure de fer**, de formule Chimique Fe_3P, le quel forme :

_ Avec le fer, **un eutectique phosphoreux binaire Fe3P- Fe** appelé : **stéatite,** qui fond à 1050°C (il s'ségrége aux joints des grains).

_ Avec le fer et la cémentite, un **eutectique phosphoreux ternaire**

Fe3P- Fe3C - Fe, dont la température de fusion est voisine de 950° C.

L'eutectique phosphoreux est caractérisé par :

_ Une expansion accompagne sa solidification.

_ Une très grande dureté **(figure 9)**.

_ Une très grande fragilité.

_ Un coefficient de dilatation relativement élevé.

Le P favorise l'obtention des détails sur les pièces moulées (statues, fontes d'art, moulage décoratifs, pièces aux formes compliquées), mais qui ne soumissent à aucun effort de choc. On dit donc que le P augmente la **coulabilité**.

- Il rend l'usinage des pièces difficile (présence de stéatite) **(Figure 8)**.
- Il rend fragiles et cassantes des pièces moulées, les quelles sont très sensibles aux Chocs).

La teneur optimale de la fonte se situe entre 0,1 et 0,13% sans que l'usinabilité de la fonte soit trop influencée

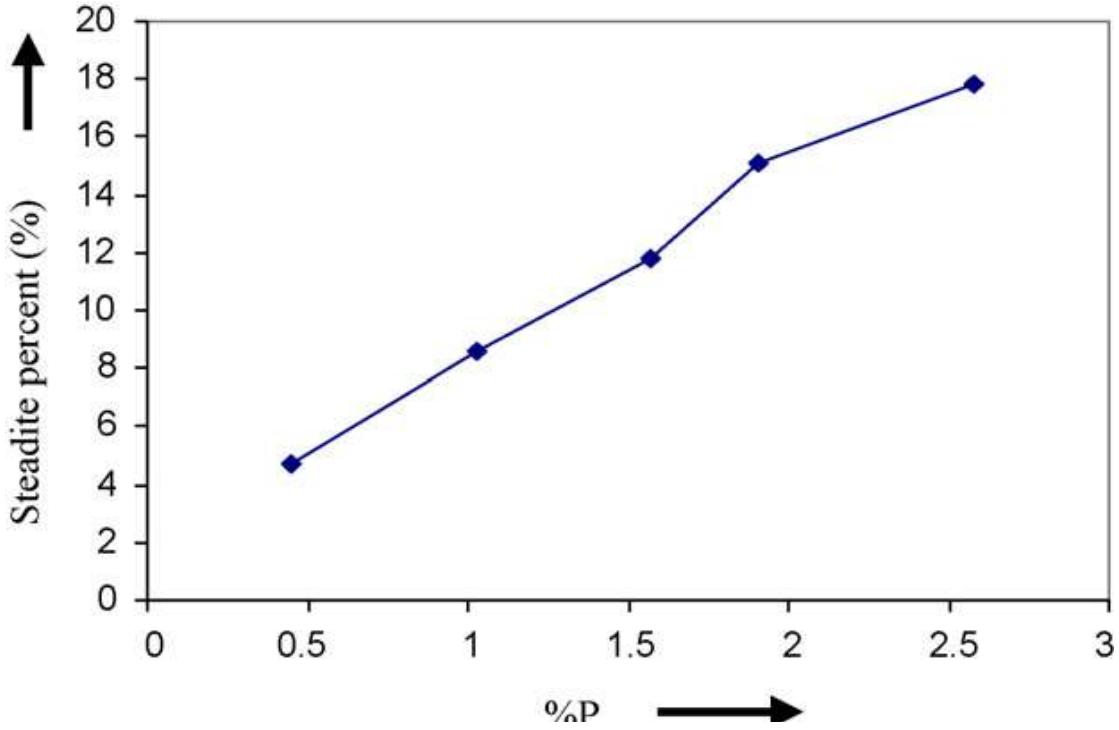


Figure 8: Effet du P sur la formation du steadite d'une fonte grise lamellaire. [6]

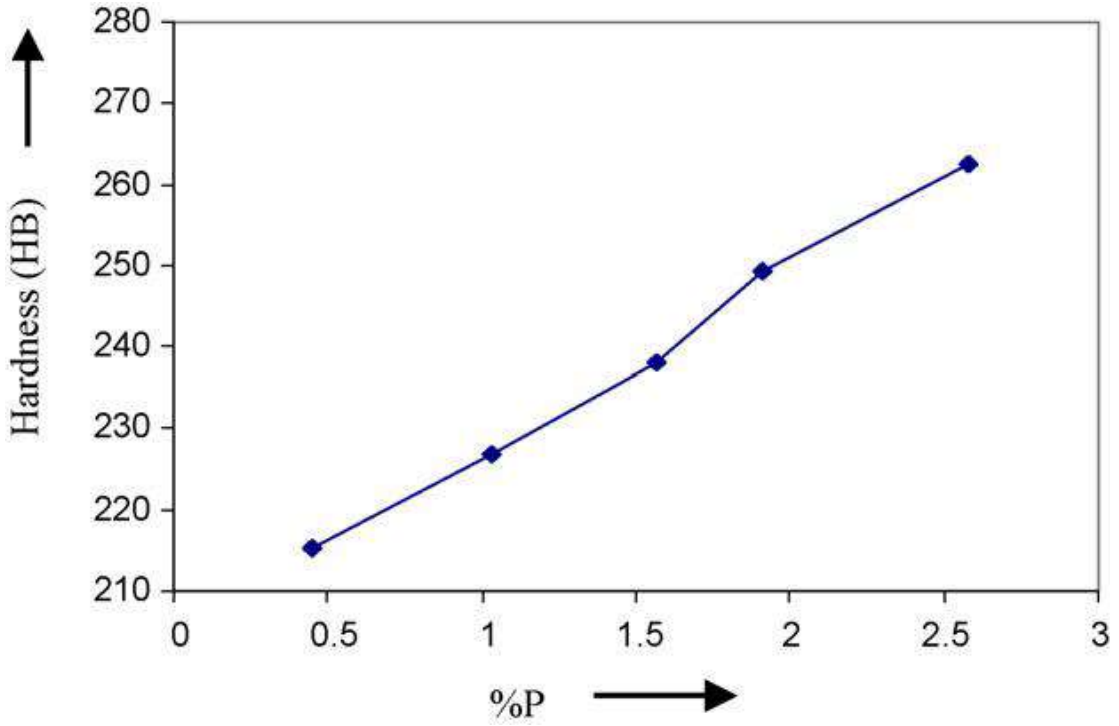


Figure 9: Effet du P sur la Dureté. [6]

II-8-1-5 Influence du soufre : Tf°= 112°C ξ = 2 g/cm3:

Le soufre provient du coke utilisé comme combustible, tant dans le haut fourneau, que Dans le cubilot. Le coke contient 1 à 2% soufre.

Le soufre non combiné au manganèse joue un rôle très important lors de la naissance des lamelles de graphite pendant la solidification eutectique. Ce rôle est double :

a- lors de la croissance des germes de graphite :

Le soufre est un élément qui est absorbé à l'interface graphite-liquide, diminuant ainsi la solubilité du graphite dans le liquide. Les germes formés auront donc une **tendance diminuée à disparaitre par dissolution**.

Autrement dit, si la teneur en soufre est basse, beaucoup de germes vont disparaitre avant même que leur diamètre n'ait atteint le diamètre critique minimal.

Le nombre de cellules eutectiques sera très réduit avec, par conséquent, l'apparition de graphite de surfusion (type D) et une tendance élevée à la formation de carbures (points durs) dans la structure.

b- lors de la croissance des lamelles :

Le soufre augmente la tendance à la croissance unidirectionnelle des lamelles, de sorte que la quantité de graphite qui se cristallise pendant la solidification eutectique sera résorbée à temps sans que les lamelles doivent se ramifier d'une manière importante et présenter ainsi la structure typique du graphite de surfusion. Nous constatons donc que, si la teneur en soufre dans la fonte est trop basse, la tendance à la formation de graphite de surfusion augmentera Également pendant la période de croissance des lamelles

Des recherches, et la mise en application pratique des résultats de ces recherches, ont démontré qu'une des conditions nécessaires à l'élimination de l'apparition de graphite de surfusion dans la structure de la fonte lamellaire est que la fonte contienne une teneur en soufre minimal de 0,06%.

Nous pouvons donc conclure que la fonte à graphite lamellaire doit contenir au moins 0,06% de soufre.

Des hautes teneurs en soufre (0,18%), peuvent provoquer dans des pièces d'épaisseur moyenne des soufflures.

II-8-2 Influence des gaz :

Parmi les gaz rencontrés dans les fontes, on rencontre l'**N_2**, **O_2** provenant de L'**atmosphère** ou de la **charge métallique**, et l'**H_2** provenant de **charge métallique**

La solubilité de l'N_2 dans les fontes liquides dépend :

De leur température, sa teneur **augmente** avec **l'élévation de la température**, et dépend aussi de la composition chimique de ces fontes.

En fonction de la forme sur la quelle l'N se trouve dans les fontes, il agit sur la structure et les propriétés de ces derniers.
Lorsque l'N_2 forme une **phase d'insertion**, il augmente la **stabilité** des **carbures**, c'est-à-dire il se comporte comme élément **antigraphitisant**.
Cette influence peut être utilisée pour l'obtention des fontes de haute qualité.
En formant les nitrures avec d'autres éléments de la fonte, ou des carbo-nitrures, l'N
Change le caractère de cristallisation dans les fontes contenant le B, Ti (éléments ayant une grande affinité pour l'N). Fontes contiennent nitrures ou carbo-nitrures peuvent **servir** de
Dans ce cas l'N_2 est un **graphitisant.**

La solubilité de l'H_2 dans les fontes liquides dépend de leur température, de leur
Composition chimique, et des conditions de fusion.
D'après ces paramètres, l'H_2 peut se trouver sous différentes formes (état gazeux ou combiné à d'autres éléments), l'H_2 augmente la stabilité des carbures, autrement dit il favorise le **blanchissement des fontes**, c'est-à-dire qu'il est antigraphitisant.

L'O_2 dans les fontes liquides comme dans les fontes solides peut se trouver sous forme **d'oxydes** simples ou complexes ou dissout dans une solution.
La quantité et la forme sur la quelle se présente L'O_2 dans les fontes peut être déterminée par la composition chimique des fontes, les procédés de fusion et de coulée et d'autres traitements.
A **l'état dissout** L'O_2 **freine** la graphitisation, à **l'état oxydé** il joue le rôle de **support de germination du graphite.** [6]

II-8-3 Influences des éléments traces :
Les éléments traces comme **le plomb, l'antimoine** et **le tellure** sont des éléments qui exercent une influence **nocive** sur la forme du graphite et par conséquent sur les propriétés mécaniques de la fonte, même s'ils sont présents en teneurs extrêmement faibles (quelques ppm à quelques dizaines de ppm).
Le seul moyen connu pour éliminer l'influence nocive de ces éléments est l'addition de **Terres Rares** à la fonte.
Les **Terres Rares** présentent en effet la propriété de **neutraliser** l'effet des éléments traces en ce combinant avec eux.

L'emploi de cette technique qui est parfaitement possible dans l'élaboration de la fonte à graphite nodulaire ne l'est malheureusement pas dans le cas de la fonte à graphite lamellaire.
Nous avons en effet démontré préalablement que la fonte à graphite lamellaire doit
Contenir une teneur minimale en soufre. Quand on ajoute des terres rares dans une fonte contenant du soufre, elles vont immédiatement et préférentiellement se combiner à cet élément et perdre ainsi leur pouvoir de neutralisation des éléments traces. Les sulfures des terres rares sont en effet thermodynamiquement beaucoup plus stables que les combinaisons intermétalliques du type éléments traces-terres rares.
Par conséquent, il faudrait en principe appliquer une sélection plus stricte des ferrailles Utilisées pour la production de fonte à graphite lamellaire que pour la production de la fonte GS en ce qui concerne la présence éventuelle d'éléments traces.

NB :

Les « terres rares », bien mal nommées puisqu'elles ne sont pas si rares et qu'il s'agit en fait de métaux, constituent un groupe de 17 éléments très utilisés par les nouvelles technologies dans les domaines les plus variés .Le plus fréquent d'entre eux, **le Cérium.** [6]

II-8-4 Influence des éléments d'addition (éléments d'alliage) : [6]

Pour améliorer les propriétés d'exploitation des fontes, on ajoute à ses dernières des éléments d'alliages tel que : Cr ; Ni ; Mo ; Co ; V ; Ti ; Cu ; Al ;…….

L'influence de ces éléments sur la structure et les propriétés des fontes différent et dépend du caractère de leurs **distribution entre les différents constituants structuraux**, et aussi de leurs influence sur **les positions** des points critiques du diagramme fer carbone.

Les éléments d'alliage se divisent en **03 groupes :**

1- Ni ; Cu ; Co ; Mn : sont caractérisées par :

a- gammageneisation (stabilisateur de **γ**).

b- Dissolution dans les solutions solides **γ** et **α.**

c- Faible affinité chimique pour le carbone.

d- Graphitisant à cause de :

_ ↑ (élévation) de l'intervalle eutectique surtout le Ni.

_ Diminution de la solubilité du carbone, ce qui favorise la précipitation du graphite.

e- stabilisateur de la perlite (c'est-à-dire évitent sa décomposition en traversant la ligne PSK).

f- ces éléments diminuent **la sensibilité à l'épaisseur** des pièces coulées en fonte Surtout le Ni.

g- affinent la perlite surtout pour le **Cu** et **Ni.**

h- augmentent la trempabilité surtout **Ni ; Cu ; Mn.**

2- Cr ; V ; W ; Mo : sont caractérisées par :

a- Alphageneisation.

b- Dissolution dans la cémentite (formation des solutions de substitution avec le FeC) Exemple : Fe_3C avec le Cr → $(Fe, Cr)_3 C$.

c- Antigraphitisant à cause de :

_ Augmentation de la solubilité du carbone et diminution de son activité

_ Renforcement des forces de liaison entre le fer le carbone et l'élément lui-même.

_ ↓ (diminution) de l'intervalle eutectique surtout le Cr.

d- Favorisent la formation **des carbures durs (MO2C, VC, Cr_7C_3, Cr23C6),** ce qui Augmentent **la résistance à l'usure.**

e- Tendance à former des carbures d'alliage **lors de revenu**.

f- Augmentent la trempabilité.

Les fontes alliées à ses éléments servent à la production des pièces coulées travaillant à l'usure à chaud et à la corrosion ex : plaques de blindage du concasseur et du broyeur, boulet de broyage, cylindres de laminoirs etc…..

3- Ti ; B ; Zr ; Mg ; Ce ; Nb ; Ca…… :

En fonction de leurs **fortes affinités chimiques**, ces éléments se combinent presque entièrement en formant différentes combinaisons : **carbures, nitrures, oxydes** et peuvent se dessoudent dans les solutions solides α ou dans la cémentite qu'au teneur très faible.

Les composés formés à partir de ces éléments sont difficilement fusibles c'est-à-dire ils se forment dans le métal encore liquide et peuvent donc servirent comme centre de germination de graphite. [6]

II-8-5 Influence de la vitesse de refroidissement sur la cristallisation des fontes : [6]

La vitesse de refroidissement dépend de plusieurs facteurs :

_ masse et épaisseur des pièces coulées.

_ Pouvoir thermo absorbant du moule (nature du moule)

_ Température de coulée, densité, chaleur latente de solidification pour l'alliage.

La vitesse de refroidissement détermine la durée de solidification de pièces coulées. Elle peut être exprimée par la relation suivante :

$$VR = 1/R\ [bm / \gamma C\ (TC - TS)]\ °C / S$$

R= module de refroidissement caractérisant la forme de la pièce.

R= V / S ou S / P d'une plaque

Avec : V : volume S : surface p : périmètre

bm : pouvoir thermo absorbant du moule = $\sqrt{\lambda m Cm}$ **γm**

Avec : λ = conductibilité thermique du moule **W /m. °K**

C_m = capacité calorifique J /Kg. °K

γ_m= densité du matériau du moule Kg/m^3

γ = masse spécifique de l'alliage ou densité de l'alliage **Kg/m^3**

C= chaleur spécifique de l'alliage J /Kg. °K

Tc = T_f + 50 à 100°C

Tc = température de coulée. ,

Ts = température de solidus

Pièce:	cube	sphère	cylindre	carré	plaque	bague
R :	a/6	R/3	R/2	a/4	e/2	(D – d)/4

II-8-6 Influence de l'état du métal liquide sur la cristallisation des fontes : [6]

L'état liquide se détermine par :

_ Composants de lit de fusion

_ Nature et teneur des gaz, inclusions non métalliques et présence des traces.

_ Traitements complémentaires (T° de surchauffe, durée de maintien)

Ces 03 facteurs influent sur la formation de la structure et propriétés des fontes.

II-8-6-1 Influence de la température de surchauffe et de temps de maintien :

Au-dessus du liquidas, le métal peut être porté à plus ou moins haute température (c'est ce qu'on appelle **la *surchauffe)*** et plus ou moins longtemps.

La Figure 10, d'après E. Piwowarsky montre que l'élévation de cette température accroît le phénomène de **surfusion.**

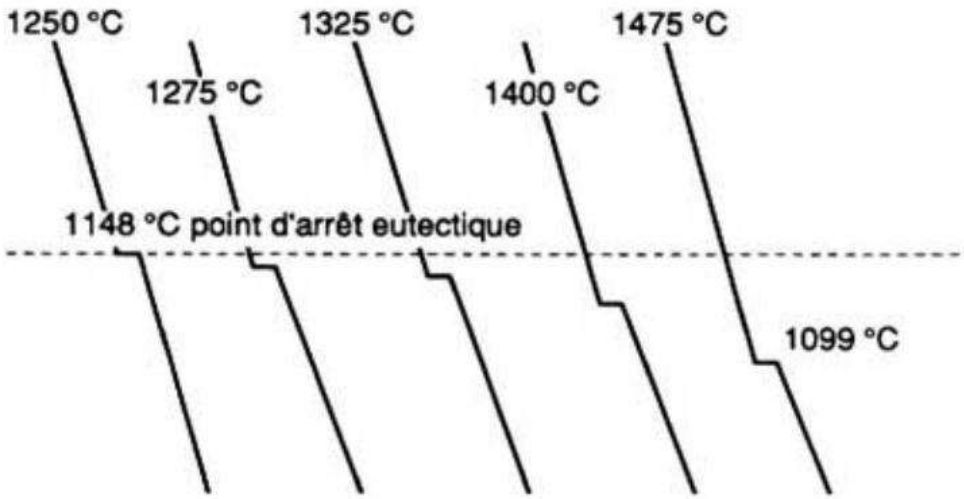


Figure 10 : Influence de la surchauffe sur l'importance de la surfusion à la solidification.

On peut résumer ainsi l'action de la surchauffe sur la structure des fontes grises : la Surchauffe provoque d'abord un **affinement** du graphite qui, de grossier, devient moyen, puis fin ; en augmentant la surchauffe, le graphite continue à s'affiner, mais il prend **la forme D**

Généralement défavorable. En l'augmentant encore, la fonte devient truitée, puis blanche.

Les fontes liquides contiennent en effet suffisamment de **germes naturels (SiO_2)** pour que le graphite se cristallise sous la forme du type A. ces germes en effet sont détruits pendant la surchauffe à des températures au-delà de la température d'équilibre de la réaction :

$$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO$$

L'élévation de la surchauffe et le temps de maintien favorisent le changement de la Composition chimique de la fonte, et l'augmentation de la quantité de carbone combinée.

La tendance à la formation du graphite interdendritique et d'autant plus grand que la teneur en carbone est plus base, et la surchauffe élevé.

II-9 Inoculation des fontes :

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

Les propriétés en question sont les suivantes :

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

- fournir des **germes** à la formation du graphite :

Du point de vue métallurgique l'effet inoculant s'explique par l'augmentation du nombre de germes pour la précipitation du graphite dans la fonte liquide. **La surfusion devient minimale** et par le dégagement de la chaleur de cristallisation, la température de recalescence est très rapidement atteinte. Les lamelles de graphite ainsi obtenu sont du type A.

Des quantités contrôlées d'inoculant, de l'ordre de quelques dixièmes de %, sont couramment ajoutées à la fonte liquide afin de réduire au minimum la formation des carbures de fer primaires et de produire le type de graphite souhaité.

A l'inverse, **certains éléments accentuent la surfusion**. On peut les ajouter en quantités mineures, afin de supprimer la formation du graphite et de contraindre le métal à se solidifier avec une structure blanche.

Le phénomène d'inoculation se distingue par :

1- variation de la surchauffe.
2- variation de l'action inoculant en fonction du temps.
3- l'action des éléments ajoutés comme inoculant est beaucoup plus fort que celle des éléments d'alliage.

Exemple : le Si introduit comme inoculant agit 3 à 5 fois plus que lorsqu'il est introduit comme élément d'alliage.

Les éléments inoculants peuvent avoir une action suivante :

a) graphitisant
b) antigraphitisant
c) variation de la forme du graphite

L'introduction de silicium comme exemple, à la fonte liquide, avant coulée de celle-ci, est dite **inoculation**, la fonte à la quelle a été ajoutée le silicium est dite fonte **inoculée**, les produits qui permettent de réaliser l'inoculation sont dits : **inoculants.**

Par ailleurs, on ne constate que l'addition de Si à la fonte liquide, juste avant la coulée, à pour effet de produire un affinage du grain, d'augmenter le nombre de paillettes de graphite, de diminuer la grosseur de celles-ci, et d'atténuer la sensibilité à l'épaisseur.

NB : - l'effet de l'inoculation est d'autant plus marquant, que le carbone équivalent de la fonte à inoculer est plus faible.
- l'inoculation peut être éventuellement, accompagnée d'une addition d'éléments d'alliages (Cr, Ni, etc….).

II-9-1 Principaux inoculants utilisés:

a- inoculants graphitisants :

- Fe Si (75%Si ; 1,4%Al ; 0,7%Ca).

Pour les fontes GS le Fe Si est dépourvu de l'Al et le Ca, donc Fe Si (75%Si).

- SiCa (65%Si ; 0,35%Ca).
- alliage complexe (60 à 65%Si) ; (9 à 12% Mn) ; (1,5 à 2%Ca) ; (1 à 1,5%Al).

But de l'inoculation graphitisante :

- augmente le degré de graphitisation.
- diminution des grains eutectiques.
- affinage du graphite.
- apparition de support de germination hétérogène ((les oxydes CaO, Al_2O_3, SiO_2, nitrures,sulfures,……)

b- inoculants antigraphitisants : ils sont introduit pour :

- perlitiser la structure des fontes grises**.**
- supprimer la croissance du graphite dans les fontes blanches destiné pour la malléabilisation.

Exemple : 52%Cu ; 28%Si ; 14%Ca.

c- inoculants sphéroidisants :

La formation de graphite sphéroïdale résulte d'une inoculation des fontes au (Mg, Ce, et les métaux de terre rares) sous forme d'éléments purs ou d'alliages.

- Mg pur (99,5%).
- alliage Fe -Mg-Si ; Fe-Mg-Si –Ca ;Mg-Ni-Cu ;Mg-Ni ; Fe-Mg-Ce.

L'habitude d'une inoculation sphéroidisante se réalise en 02 étapes **:**

- inoculation sphéroidisante.
- inoculation graphitisante au Fe Si ou Si Ca.

Lors d'une inoculation sphéroidisante, il faut tenir compte de la présence des éléments anti sphéroidisants. Tel que : Pb, Bi, Sb, S, Te, Cd, Ti, As en 1/1000 de %.

Pour remédier à cela (à une sphéroidisation imparfaite) en présence de ces éléments poisons, on augmente ou on ajoute des éléments sphéroidisants.
Mg, Ce, Ca et les métaux de terre rares sont des éléments chimiquement très actives, c'est-à-dire ils possèdent une forte affinité chimique pour l'O_2, H_2, et le soufre et forme ainsi dans les fontes liquides des différentes types de combinaisons (oxydes, nitrures, sulfures), ainsi ils purifient le métal liquide.

La sphéroidisation peut être parfaite, si le titre résiduel de l'élément sphéroidisant est de l'ordre de 0,03 à 0,06%.

Temps d'action : une inoculation n'est efficace que si elle est effectuée **peu de temps avant la coulée.** Son influence diminue graduellement et disparaît au **bout de 20 à 30 minutes.** C'est pourquoi on inocule **au dernier moment,** c'est-à-dire enpoche de coulée.

Quantité d'inoculant : suivant l'efficacité de l'inoculant, le temps de maintien en poche, la quantité nécessaire d'inoculant est variable. [8]

Exemple :

- 0,2% à 0,1% de Fe Si à 75%.
- Fe- Si-Ba lorsqu'on souhaite l'action ferritisante du baryum.

II-10 le lit de fusion: [6]

II-10-1 Définition :

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

II-10-2 Schéma des opérations d'élaboration :

Afin de bien comprendre la fabrication, il est indispensable de présenter le schéma des opérations tel qu'il peut se présenter pour l'élaboration des fontes et des aciers moulés dans une fonderie moderne.

On distingue les étapes suivantes :

+ Préparation du lit de matières premières (ferrailles + additions).
+ Pesage précis.
+ Bennage des ferrailles vers les fours de fusion.
+ Fusion au four à induction.
+ Analyse d'un prélèvement.
+ Additions en poche de coulée ou de fin de fusion.

+ Parfois nouvelle analyse d'un prélèvement.

+ Transport des poches de coulée vers la chaîne de moulage

II-10- 3 : Préparation du lit de fusion :

Les charges sont puisées dans les stockes de matières premières.

II-10- 3 -1 : Parc à ferrailles : où sont classés, par type et analyse chimique :

- les retours de fonderie constitués par des pièces rebutées, 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 doux compacté.
- des gueuses (hématite, semi hématite…).

II-10- 3 -2 : Parc des matières d'addition :

Où sont conservées, en sacs ou fûts, toutes les additions susceptibles d'être opérées à la fusion ou en poche de coulée, citons :

- les ferroalliages (Fe-Si ; Fe-Mn ; Fe-P ; Fe-Cr ; Fe-Ti…..). ;
- le graphite ; - Aluminium en barre ; - Le cuivre en barre ou en fil ; - le bismuth ;
- le slax ; - le mishmétal ; - l'étain.

Ces charges sont pesées avec précision de manière à obtenir, par le calcul du lit de fusion, une analyse d'alliage fondu voisine de celle souhaitée.

II-10- 4 : Fusion des charges :

Les charges sont bennées vers le four de fusion à induction, dont le quel elles sont versées. Elles sont introduites dans un **bain résiduel** de la précédente coulée.

Le creuset du four n'est en effet jamais complètement vide lorsqu'on réalise une " **compagne**".

Par exemple, on laissera dans le fond d'un four de capacité 06 tonnes deux tonnes du bain liquide résultant de la précédente fusion de la sorte on :

- assure une production plus homogène ;
- évite les chocs thermiques et mécaniques sur le revêtement réfractaire du creuset ;
- utilise l'inertie thermique du four ce qui diminue les temps de fusion.

Les productions, pour un four donné de l'entreprise sont groupées en compagne, par exemple :

- une semaine de fonte GD.
- une semaine de fonte GL.

- une semaine de fonte malléable.

- une semaine d'acier moulé. [6]

II-11 Additions de Fin de Fusion

II-11- 1 Nécessité ;

Après fusion le bain d'alliage ne correspond pas exactement à l'analyse visée. Il y a 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.

II-11- 1-1 Analyse d'échantillon :

L'alliage obtenu est coulé dans un petit moule métallique brutalement par trempe à l'eau. On obtient ainsi une petite "**médaille''** qui est envoyée au laboratoire pour analyse rapide (spectromètre à étincelles par exemple). Le résultat de cette analyse est comparé à celle souhaitée.

Il est alors décidé de rectifier l'analyse en apportant dans le bain quelques éléments.

II-11- 1-2 Autres opérations de fin de fusion :

- inoculer le bain lorsqu'on veut provoquer une cristallisation particulière (exemple : formation du graphite sphéroïdal dans les fontes GS.

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

- réajuster la composition du bain ;
- inoculer.

II-11- 2 Rôle des éléments introduits :

II-11- 2-1 Dans la charge du four :

a- le Ferro- silicium (Fe – Si) :

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

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

- de la rouille des charges ;

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

Exemple : $2FeO + Si \rightarrow SiO_2 + 2Fe$ (qui passe dans le bain).

La silice monte 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

***** réajuste le titre en silicium.

b- le Ferro- manganèse (Fe – Mn) : riche en Mn. [6]

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.

Les réactions de désulfuration sont :

FeO + Mn →MnO + Fe

MnO + FeS→MnS + FeO

Mn + FeS→MnS + Fe

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

c- le graphite : il sert à ajuster le titre en carbone de l'alliage**.**

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

c- le cuivre :

Il est utilisé pour régler la matrice dans les fontes grises et dans les fontes GS.

Un taux crissant de Cu permet d'obtenir :

- une matrice ferrito-perlitique pour 0,3 à 0,5% de Cu ;
- une matrice perlitique pour 1% de Cu.

Le cuivre à un effet :

- graphitisant à la solidification (il est cependant 5 fois efficace que le Si)
- antiferritisant énergique au cours du refroidissement de la fonte solide à travers le domaine eutectoide.

Il empêche la formation :

- d'une matrice ferritique dans les parois épaisses des pièces ;
- de plaques de cémentite libre dans les parois minces.

De plus, il améliore les caractéristiques de résistance et de dureté des fontes.

II-11- 2-2 Dans la poche de coulée :

a- les inoculants ;

b- les sphéroidissants ;

Matériau élaboré	Addition	Rôle
Fonte grise	Graphite	- Ajuster le % en C
	Fe – Si	- Ajuster le % en Si - désoxydant
	Fe – Mn	- Ajuster le % en Mn - désulfurant
	Cu	- perlitisant
	Ni	- perlitisant - affine le graphite et le dissémine mieux

Tableau 7: résume l'effet des principales additions faites dans le four pour l'élaboration des fontes grises. [6]

	Rôle de l'addition	Quantité
Fe – Si (à 75% de Si)	Inoculation de graphite	≈1%

Tableau 8: résume l'effet des principales additions faites dans La poche de coulée pour l'élaboration des fontes grises.[6]

II-11-3 Décrassage de la poche :

Après fusion des charges et additions il est nécessaires de décrasser le bain du laitier formé a la surface de la poche de coulée ; car ce laitier contient la plus part des impuretés.

Pour cela on jette à la surface du bain :

- du SLAX (ou silice) de manière à agglomérer les crasses lorsque le garnissage du four ou de la poche est acide, c'est-à-dire en briques de silice ;
- de la chaux CaO lorsque le garnissage est basique, c'est-à-dire constitué de briques de dolomie ($CaCO_3$, $Mg\ CO_3$)

II-11-4 Effet d'inoculation :

L'effet des éléments ajoutés dans la poche disparaît peu à peu dans le temps.

Leur efficacité devient moins grande si :

- le temps coulé entre le traitement en poche et la coulée dans le moule s'accroît ;
- la pièce moulée est de forme complexe, ce qui entraine inévitablement des retards à la solidification :
- éloignées de la déscente de coulée ;
- trop massives.

Pour palier ces inconvénients on ajoute, dans les sites judicieusement choisi (chenal par exemple) des morceaux de ferroalliages (Fe-Si – Si-Al-Ce)

Exemple d'analyse :

Si = 75% Ca = 1,4% Al = 4,4% Mg = 0,3% Ce = 0,07% ces fragments jouent le rôle d'inoculant et de sphéroidissant de **rattrapage.**

II-12 Propriétés des fontes à graphite lamellaire : [4]

II-12-1 Caractéristiques mécaniques fondamentales :

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

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

II-12-1-1 Résistance à la traction :

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

D'après la résistance à la traction minimale garantie mesurée dans un barreau coulé séparément de 30mm de diamètre ;la résistance à la traction (minimale) probable dans les pièces est indiquée sans garantie en relation avec l'épaisseur, suivant un tableau permettant de guider le choix de l'utilisateur **(tableau 9)**. C'est la méthode de base.

Nuances	Valeurs garanties	Valeurs à titre indicatif		
	Résistance minimale à la traction Rm MPa	Epaisseur de la pièce (mm)		Résistance à la traction probable sur pièce Rm (MPa)
		Plus de	Jusqu'à	
FGL150	150	2.5	10	150
		10	20	130
		20	40	120
FGL 200	200	2.5	10	205
		10	20	180
		20	40	165
FGL 250	250	5	10	250
		10	20	225
		20	40	205
FGL 300	300	10	20	270
		20	40	245
FGL 350	350	10	20	315
		20	40	285
FGL 400	400	10	10	355
		20	20	315

Tableau 9: Classification d'après essai sur barreau coulé à part.

II-12-1-2 Dureté :

Sauf éventuellement dans les régions trempée superficiellement dureté des fontes grises est mesurée suivant la norme NF A 03-201 essai de dureté brinell pour la fonte grise (aout 1967). Le symbole normalisé est HB (suivi éventuellement de trois nombre rappellent condition particulière de l'assai). La norme précise que la charge doit être maintenue pendant 15s ±1s et que la distance du centre d'une empreinte au bord de la pièce a essayer doit être au moins égale à 2.5 fois le diamètre de l'empreinte ; les centres de deux empreintes doivent être espacés d'au moins 4 fois leur diamètre .

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

- font blanches : 400 à 500 HB suivant la teneur en carbone.
- font grises perlitiques : 170 à 270 HB suivant la finesse de la perlite.
- font grises ferritiques : 100 à 150 HB.

- font grises martensitique : 400 à 500 HB.

- font grises bainitique : 300 à 400 HB.

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

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

Mais on ne peut pas considérer la dureté d'une fonte comme complètement indépendante du graphite celui-ci agissant par sa quantité et par ses dimensions **(Tableau II-10** et **II-11** relatifs à des fontes à graphite lamellaire ferritiques).

Carbone %	Silicium %	Dureté Brinell
3.74	1.77	107
3.64	2.85	112
3.43	2.18	128
3.33	1.74	134
3.33	1.77	137
3.21	2.51	145
3.05	2.50	143

Tableau 10 : Dureté d'échantillons de fonte à graphite lamellaire rendus ferritiques par traitement thermique.

Cette influence du graphite sur la dureté se traduit par une corrélation entre la dureté d'un échantillon de fonte à graphite lamellaire à l'état brut de coulée et celle du même échantillon rendu ferritique par traitement thermique :

Par exemple, lorsqu' une variation de la vitesse de refroidissement (agissant à la fois sur le graphite et la matrice) provoque à l'état brut de coulée dans une fonte à graphite lamellaire une variation de 100 HB, les mêmes échantillons, après avoir été ferritisés par traitement thermique, présentent encore une différence de dureté de 40 à 60 HB, bien que leurs matrice soient devenues identiques **(Tableau 11).**

Enfin dans les fontes grises (recuites ou non) la teneur en phosphore (déterminant la quantité d'eutectique phosphoreux présent dans la même matrice, principalement aux joint des cellules eutectique) exerce une fluence importante sur la dureté (on compte globalement une augmentation de 3 unités Brinell par 0.10 % de phosphore).

De même, les carbures libres accidentellement formés dans la structure (mauvais

Adaptation à l'épaisseur, présence de chrome etc.) peuvent augmenter considérablement la dureté et de manière hétérogène.

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

Tableau 11: Dureté brinell d'échantillons, à l'état brut de coulée et traités (férritiques), en fonction du diamètre des barreaux coulés.

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

	C	Si	Mn	S	P
Nuance I.....:	3.10	2.79	0.67	0.08	0.18
Nuance II.....:	3.04	2.88	0.73	0.05	0.98
Nuance III.....:	3.33	2.86	0.76	0.08	0.18

II-12-2 Caractéristique dynamiques :

Nous étudierons dans ce chapitre les caractéristiques de résistance aux efforts qui varient rapidement.

II-12-2-1 Résistance aux chocs :

Les lamelles de graphites suffisent à créer dans la matrice des fontes grises un effet d'entaille, c'est pourquoi la norme NF A 03-202 définit un essai du type Charpy sur éprouvettes non entaillées. L'ensemble des fontes normalisées, la résistance au choc augmente lorsque la résistance à la traction croit de 150 à 400 MPa, si l'on met à part, bien entendu les fontes ferritisées par recuit, de tenue au choc relativement supérieure **(Tableau II-12).**

Qualité	Composition (%)					R_m	K
	C	Si	Mn	S	P	(MPa)	(J)
FGL 150	3.58	2.39	0.57	0.04	0.10	174	14.6
FGL 250	3.24	2.07	0.60	0.10	0.30	263	17.2
FGL 400	2.73	1.71	0.30	0.09	0.10	398	32.6

Tableau 12: Résistance au choc K selon la norme NF A 03-202 de trois fontes grises à graphite lamellaire

II-13 Propriétés mécanique d'utilisation :[7]

II-13-1 Facteurs métallurgiques sur l'usinabilité des fontes :

La dureté n'est pas un critère acceptable d'usinabilité que si l'on comparé des fontes d'une même famille exemptes d'anomalies structurales et sous réserve d'exception. En réalité, c'est la structure qui est le facteur primordial de l'usinabilité.

La figure 11: représente de façon sommaire l'influence très important de la proportion de ferrite et de perlite dans la matrice l'eutectique phosphoreux (steadite),surtout sous la forme pseudo-binaire qu'il prend dans les fontes exemptes d'éléments fortement carburigénes ,n'est pas incompatible avec une bonne usinabilité .

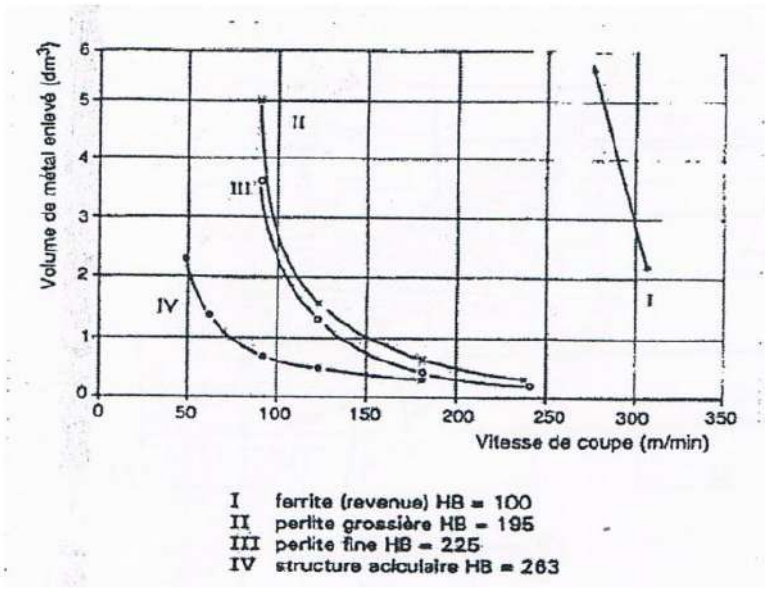


Figure 11: Volume de métal enlevé jusqu'à usure de l'outil, en fonction de la vitesse de coupe lors du tournage de fontes à graphite lamellaire de différente structure.

Si les carbures libres apparaissent accidentellement dans les fontes grises (points durs), ils sont très nuisibles à l'usinabilité. Ainsi, une fonte expérimentale (au bore) contenant 25 à 30% de carbure a une usinabilité très inferieur (D
= 7.25mm) à celle d'une fonte d'une fonte grise allier de Ni-Mo et de même dureté (HB=260) cependant il ne faut pas attribue a Prior toute difficulté d'usinage à la présence de carbures : la rencontre de porosité, d'inclusion de sable ou de laitier, ou bien le travail dans une couche superficielle décarburée peuvent amener l'usure rapide de l'outille et même l'ébrécher. L'interprétation exige en général un examen micrographique que des mesures de dureté ne sauraient remplacer. On rappelle que
Des traitements thermiques peuvent souvent corriger ou améliorer l'usinabilité des fontes.

II-14 Fonte grise courante ou ordinaire (à graphite lamellaire)

Ces fontes sont caractérisées par :
- une grande coulabilité ;
- une excellente usinabilité (due à la présence du graphite qui joue le rôle de lubrifiant).
- un pouvoir amortissant élevé des chocs (due a la présence du graphite)

Grâce à ces propriétés, ces fontes servent à couler les pièces de machine ex : bâti de machine, leurs constituants structuraux sont : graphite, perlite, ferrite)
La Normalisation d'une fonte grise courante selon AFNOR (association française de Normalisation)
F_t10 ou FGL10 F= fonte G= grise L = lamellaire
F_t10 Ft15 Ft20…… F_t40
FGL10 FGL15 FGL20…… FGL40

La dureté d'une fonte grise varie de 160 à 250HB (peut atteindre 300HB).

La composition chimique des fontes grises (voir tableau).

Les fontes grises courantes ne nécessitent pas de masselottes parce que le retrait est faible, et la coulabilité est très grande.
Se sont des fontes qui possèdent les meilleures propriétés de fonderie parmi les alliages de fonderie. [6]

Chapitre III

Méthode expérimentale

III- Introduction

Les diagrammes (ou les abaques) sont utilisés pour guider le choix de la composition de l'alliage, leur utilisation doivent, donc, faire suite à un premier travail de définition des caractéristique générales (résistance, structure, frottement ….) de la fonte à élaborer.

Ils aident le travail du technicien qui reste maitre du choix justifiable de la composition de l'alliage.

Les données expérimentales :

Avant l'utilisation de ces abaques, on prévoit élaborer une fonte grise lamellaire **FGL 20 (**20kgf/mm^2) à matrice perlitique (Perlite + Graphite), pour la coulée des pièces de 20 mm d'épaisseur dans un moule en sable à vert.

Pourquoi la structure perlitique ?

Pour une indice de saturation est égale à **1**, la structure selon le diagramme Fer- carbone est entièrement perltique où les caractéristiques mécaniques sont les meilleurs, plus la bonne coulabilité de cet alliage pour la mise en forme des pièces à grande surface.

La Norme de la FGL 20 :

Nuance	ep	C	Si	Si avt	Mn	S	P	Cr	Ceq
tolérances		(+ /-0.1)	(+/-0.1)	(+/-0.1)	(+/-0.1)	(+/-0.2)	(+/-0.05)	max	/
GL	10	3.4	2.3	2.05	0.5	0.08	0.1	0.2	4.17
	25	3.25	2.1	1.85	0.5	0.08	0.1	0.2	3.95
	50	3.25	2	1.75	0.5	0.08	0.1	0.2	3.92
	100	3.2	1.9	1.65	0.5	0.08	0.1	0.2	3.83

Tableaux 1: La norme de la FGL 20

- Resistance à la rupture=200MPa
- La dureté : 180 – 220 HB

La structure souhaitée = perlitique (perlite +grise)

Barreaux représentatifs :

Le fondeur de fonte grise perlitique doit d'abord pour utiliser efficacement Les abaques, déterminer quel est **le diamètre des barreaux** qui, coulés dans les mêmes conditions que sa fabrication courante (sa pièce), se refroidissent suivant la même loi que les parties les plus Minces et les plus massives de sa production. Et qui par conséquent donneront la même structure finale et les mêmes caractéristiques pour la même composition chimique.

Epaisseur déterminante De la pièce E (mm)	Type de barreau
Au-dessous de 6……... de 6 à moins de 9…… de 9 à moins de 13…. de 13 à moins de 22…. de 22 à moins de 40…. 40 et au dessus …	A B C D E S

Barreau	Diamètre brut de Coulée (mm)	Longue utile Minimale (mm)
A	9	100
B	13	100
C	20	160
D	30	170
E	50	220
S (1)	_	_
(1) Les dimensions de barreau S sont à convenir par accord entre les parties		

Tableau 2: barreaux représentatifs

Imaginons, pour fixer les ides, que le fondeur obtienne :

_ Le barreau cylindrique de 13 mm de ø pour les parties minces

_ Le barreau cylindrique de 20 mm de ø pour les parties moyennes

_ Le barreau cylindrique de 50 mm de ø pour les parties massives

Epaisseur prédominant de la pièce est de 20mm équivalent à un barreau de diamètre 30 mm.

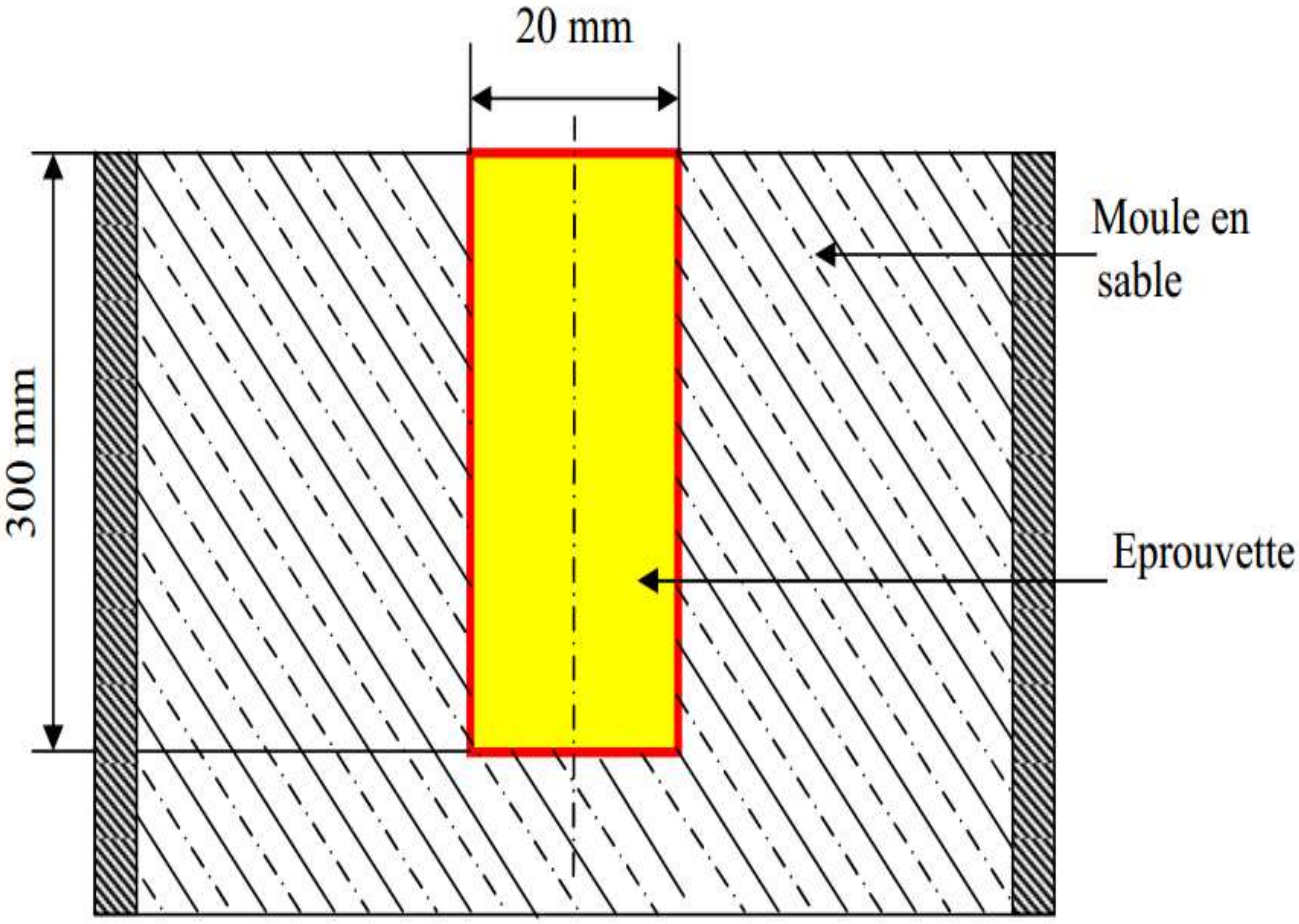


Figure 1: Moule pour la coulée des éprouvettes

III-2 Abaque 01 : Relations entre indices Sc ou Ceq, la dureté HB et l'épaisseur des pièces en fonte grise lamellaire :

On peut utiliser ce diagramme, et qui donne directement, pour chaque diamètre de barreau, la dureté HB en fonction de l'indice Sc ou Ceq. On obtient ainsi le champ des duretés possibles en fonction de cet indice. Réciproquement, il fournit pour chaque valeur moyenne visée de HB et chaque diamètre de barreau, l'indice Sc ou Ceq de la fonte à adapter.

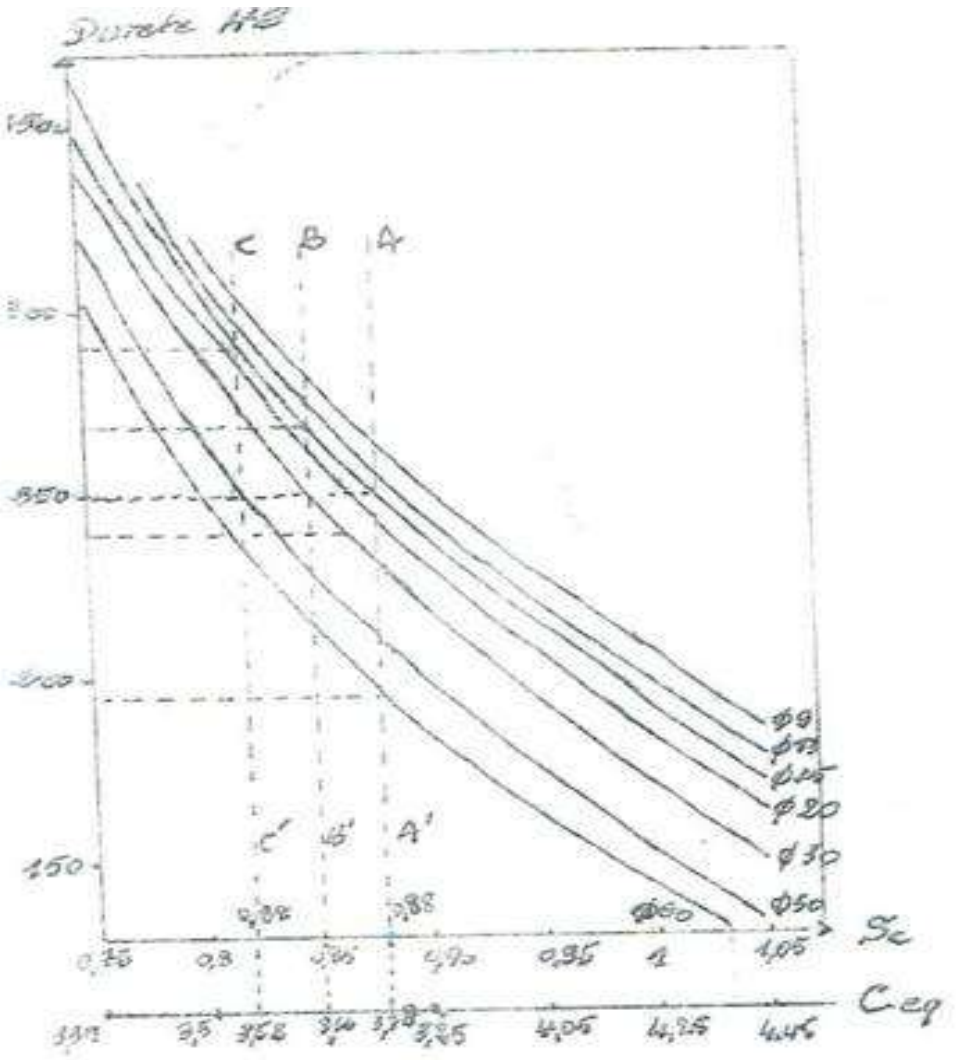


Figure 2 : Relation entre durete HB (10-3000) et indice Sc ou Ceq et Ø des barreaux (épaisseur) des fontes grise

Comment exploiter cet abaque:

Exemple 01: si on coule une fonte d'indice Sc = 0.88 (ou Ceq = 3.78). On trouvera HB = 255 dans les parties les plus minces (barreau ø 9 et barreau ø 13) et 197 dans les parties les plus massives (barreau ø 60), et 230 dans les parties moyennes (barreau ø 30).

Exemple 02: Inversement. Si l'on fixe une fourchette de duretés admissibles HB= 200 pour l'ensemble d'une fabrication de pièces de fonte grise devant recevoir un usinage important, et si l'on a déterminé les diamètres des barreaux dont les vitesses de refroidissent encadrent celles des pièces à couler (ou les diverses parties d'une même pièces compliquée). On peut en déduire, avec la figure 01. L'indice Sc = 0.94 (ou Ceq = 4) qu'il convient d'adopter.

Exemple 03: nous avons, par exemple, déterminé qu'une pièce présentait des parties minces se refroidissant comme un barreau de 20 mm de diamètre coulé dans les mêmes conditions. Tandis que les parties les plus massives de cette pièce se refroidissaient comme un barreau de 50 mm de diamètre. D'autre part, la dureté HB visée est 207-241 (moyenne 223). Notre abaque de la figure 02 donne Sc = 0.90 (Ceq =3.85) pour les parties minces et 0.88 (Ceq = 3.78) pour les parties massives. On devra donc viser un%C : 3,2 indice moyen Sc = 0.89 (Ceq = 3.83) pour les pièces considérées. ce qui conduira, par exemple, à une fonte donnant à l'analyse, en moyenne : **%C : 3,2; %Si : 1,9; %Mn : 0,5; %S : 0,1; %P: 0,12.**

Quand on peut employer plusieurs compositions au cours d'une même journée. On a intérêt à faire varier l'indice Sc ou Ceq à chaque changement dans la massivité des pièces.

III-3 Abaque 2 : abaque permettant le calcul de la résistance à la traction, dureté HB d'un élément de pièces moulée (épaisseur de la pièce) connaissant sa résistance à partir d'un éprouvette usinée d'un barreau de 30 mm de diamètre

Ce diagramme qui figure dans la norme suisse VSM 10691, a été conçu pour répondre au problème suivant : étant donné une fonte de qualité déterminée (définie par sa résistance à la traction mesurée au moyen d'une éprouvette usinée dans un barreau brut de 30 mm de

diamètre) et connaissant l'épaisseur sous laquelle la pièce a été coulée, en déduire les caractéristiques de cette pièce. Sur ce diagramme sont portées : en abscisses la résistance à la traction *Rm*30 du barreau de 30 mm de diamètre, en ordonnées l'épaisseur de la pièce moulée

En fait, pour tenir compte de la dispersion inévitable, A. Collaud a fait figurer sur son diagramme, non pas des valeurs chiffrées de la résistance *Rm*30 et de l'épaisseur, mais des domaines correspondant d'une part à des classes de fonte (classes 150 à 200, 200 à 250, etc.) et des catégories de pièces (très minces, minces, etc.). Autrement dit, à une classe de fonte (par exemple), le diagramme fait correspondre, pour un type de moulage (par exemple pièces minces), toute la gamme des valeurs inscrites dans le rectangle commun à la classe 200 à 250 et aux pièces minces.

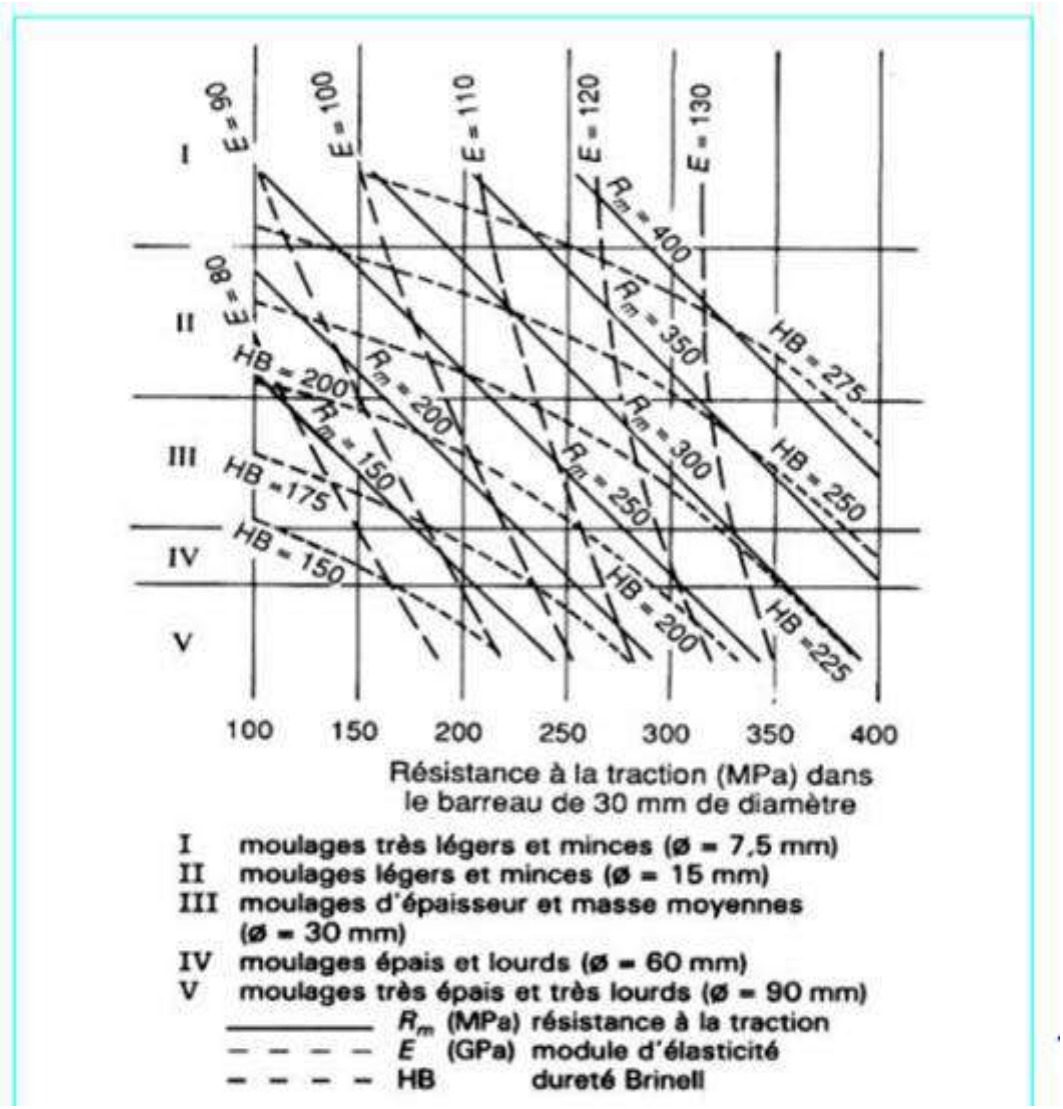


Figure 3 : abaque permettant le calcul de la résistance à la traction, la dureté HB d'un élément de pièces moule (épaisseur de la pièce) connaissant sa résistance à partir d'un éprouvette usinée d'un barreau de 30 mm de diamètre

Exemple : une fonte qui a 230 MPa de résistance à la traction dans le barreau de 30 mm appartient à la classe 200 à 250. Si elle est coulée sous forme d'un barreau de 15 mm de diamètre (catégorie pièces minces), les caractéristiques seront comprises entre :
215 à 275 HB pour la dureté ; 230 à 360 MPa pour la résistance à la traction ;
102 à 117 GPa pour le module d'élasticité

On voit par cet exemple que le diagramme tient largement compte de la dispersion et fixe, non pas des correspondances étroites, mais des domaines de dispersion assez larges. Il permet

également de mettre en évidence certaines incompatibilités : par exemple, dans l'échelon de 15 mm, il est impossible de trouver une fonte ayant un module d'élasticité de 120 GPa associé à une résistance de 240 MPa alors que cela est possible dans le cas d'un barreau de 90 mm de diamètre.

Remarques concernant la validité du diagramme de Collaud:

Un tel diagramme présente donc un très gros intérêt pour l'utilisateur, mais il importe de faire à son sujet un certain nombre de réserve.

● Il n'est valable que pour des fontes à graphite lamellaire non alliées, à l'état brut de coulée. Les propriétés des fontes qui ont subi un traitement de ferritisation par exemple ne peuvent être appréciées en se servant de ce diagramme. Au contraire, les caractéristiques des fontes inoculées peuvent se déduire de la lecture de ces diagrammes.

● Il a été établi dans le cas de fontes ne contenant que des quantités modérées de phosphore, et l'expérience a montré qu'il n'était pas valable pour les fontes contenant des quantités appréciables de phosphore.

En pratique, sa validité peut être étendue aux fontes phosphoreuses, à condition d'apporter une correction aux chiffres de dureté Brinell. Cette correction consiste à majorer le chiffre de dureté, lu sur le diagramme, de 50 points Brinell par 1 % de phosphore au-dessus de 0,30 % ou, inversement, à reporter sur le diagramme le chiffre expérimental de dureté Brinell diminué de 50 points Brinell par 1 % de phosphore au-dessus de 0,30 %. Cela ne veut pas dire qu'une addition de 1 % de phosphore augmente réellement la dureté de 50 points Brinell. En fait, une addition de 1 % de phosphore augmente la dureté de 30 points Brinell et diminue la résistance de 40 MPa. La résistance étant choisie.

Comme essai de base et effectivement mesurée quel que soit le taux de phosphore, il en résulte une correction plus importante à effectuer sur la valeur de la dureté, pour pouvoir continuer à utiliser le diagramme dans le cas des fontes phosphoreuses.

● Le diagramme a été établi à partir d'essais effectués sur des barreaux de différents diamètres et non pas à partir de pièces réelles. Il n'a pas encore été vérifié systématiquement dans le cas de pièces réelles et il peut par conséquent en résulter la nécessité de lui apporter quelques modifications.

Collaud a présenté d'autres diagrammes, où sont indiquées, pour 34 nuances de fontes à l'état brut de coulée à teneur en phosphore modérée, les caractéristiques suivantes : limite d'élasticité conventionnelle, flèche élastique de rupture à la flexion, flèche plastique de rupture à la flexion, travail élastique de rupture à la flexion, travail plastique de rupture à la flexion. Les relations entre les caractéristiques principales et l'épaisseur peuvent aussi être exprimées sous forme de tableaux (par exemple, le tableau **3**).

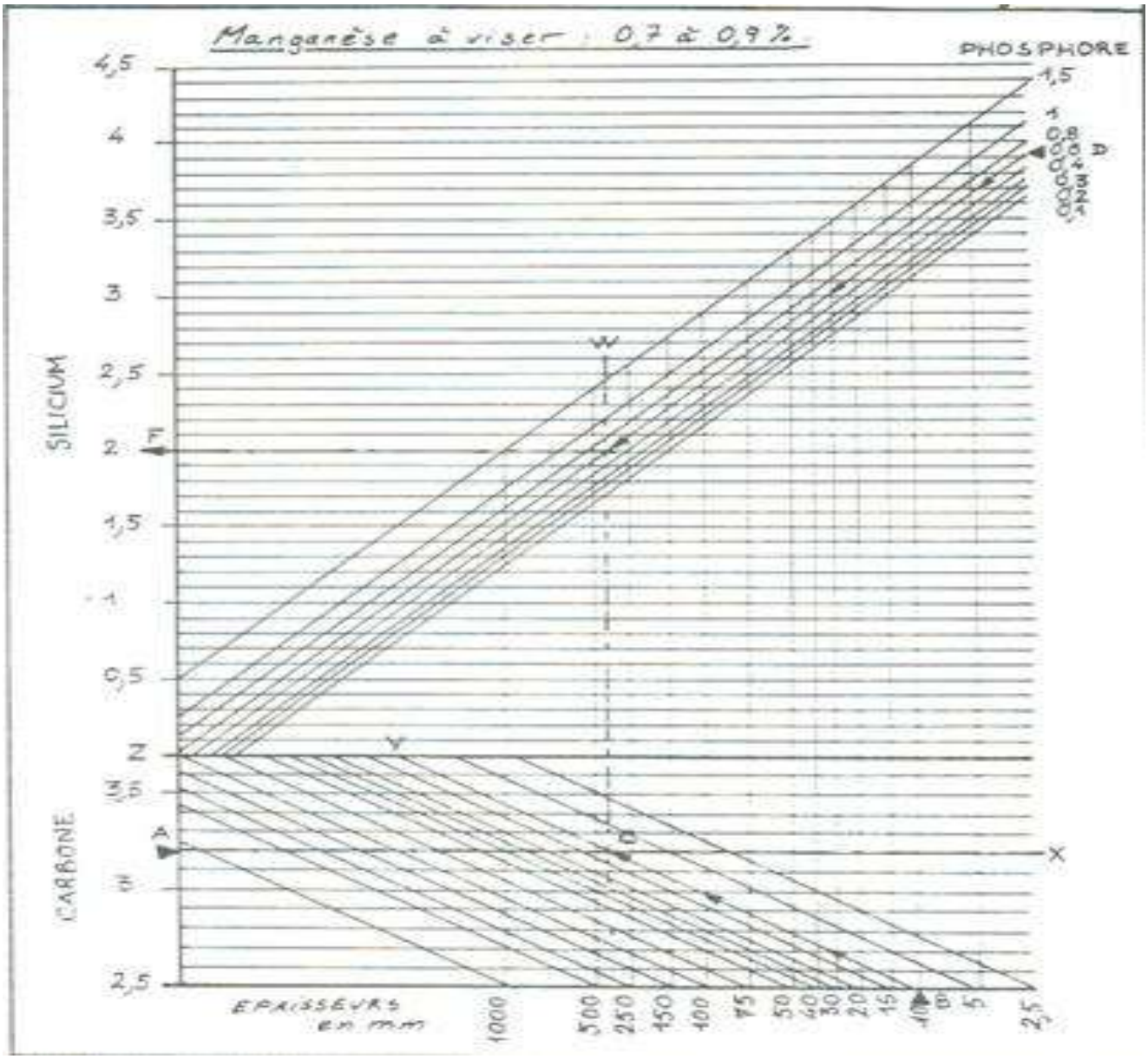
Épaisseur (mm)	**Résistance à la traction R_m** (MPa)	**Module d'élasticité (méthode pendulaire) à mi-rayon E_0** (GPa)	**Dureté Brinell (à mi-épaisseur)** (HB)
18	200 à 320	100 à 130	240 à 300
26	190 à 300	100 à 130	215 à 300
40	160 à 260	90 à 120	180 à 275
60	150 à 200	90 à 120	160 à 240
100	110 à 180	90 à 120	150 à 215
18	260 à 340	100 à 130	250 à 300
26	230 à 330	100 à 130	225 à 300
40	210 à 300	100 à 130	200 à 270
60	200 à 250	100 à 130	180 à 245
100	160 à 240	100 à 130	170 à 220
18	300 à 400	110 à 140	255 à 300
26	280 à 390	110 à 140	235 à 300
40	260 à 360	110 à 140	220 à 275
60	250 à 300	110 à 140	200 à 260
100	190 à 280	100 à 130	190 à 235
26	340 à 400	120 à 150	265 à 325
40	310 à 410	120 à 150	240 à 280
60	300 à 350	120 à 150	210 à 270
100	260 à 330	120 à 150	200 à 235

Tableau 3: caractéristiques mécaniques principales pour les qualité de la fonte les plus courantes en accord avec l'ensemble de la documentation

III-4 Abaque 03 : Diagramme d'OSANN : Détermination de Si en fonction de C, P et de l'épaisseur de la pièce.

(Ce diagramme n'est applicable Que dans le cas de fontes à structures perlitiques)

Vu que la fonte grise lamellaire est un alliage ternaire Fe-C-Si, et vu que l'élément silicium est l'élément potentiel pour la graphitisation du carbone, il est indispensable de prédire sa teneur en utilisant le diagramme d'OSANN.



Figuré 4 : Diagramme d'OSANN : Détermination de Si en fonction de C, P et de l'épaisseur de la pièce

Exemple :

Si on coule une pièce d'épaisseur 10mm en fonte grise perlitique de carbone C= 3.2%, et de P=0.6%. On trouve par projection sur la courbe un taux de silicium est égal à 2%.

III-5 ABAQUE 4: LAPLANCHE

Leur diagramme apporte une correction importante par rapport à celui de **MAURER, les limites des domaines sont des courbes.**

zone	Type de fonte révélée par cassure	Constituants de la fonte correspondante
I	Blanche	Cémentite + perlite
II	Truitée	Cémentite + perlite + graphite
III	Perlitique	perlite + graphite
IV	Ferrite-perlitique	perlite + graphite + ferrite
V	Ferritique	graphite + ferrite

Tableau 4: Structure _ composition massivité de pièce moulée.

Constitué à présent le meilleur graphe de prédiction de la structure d'une fonte connaissant :

- le diamètre ou l'épaisseur de la pièce moulée ;
- les titres en C et Si.

Les graphes de LAPLANCHE se rapportent à des fontes industrielles, non alliées, dont l'analyse reste comprise dans les limites suivantes :

C< 6% Si< 6% Mn = 0,6 à 0,8% S< 0,8% P< 0,12%

Les essais ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques de diamètre croissant Ø= 6, 10, 20, 35,48.

* des études préalables ont montré qu'une éprouvette cylindrique de Ø = 2r présente la même surface spécifique de refroidissement qu'une plaque d'épaisseur e.

- on rappelle surface spécifique le rapport S / V de la surface au volume de la pièce moulée ;
- une éprouvette se refroidit dans un moule comme la pièce moulée à produire si la surface spécifique de l'éprouvette égale la surface spécifique de la pièce moulée.

La structure obtenue dans l'éprouvette est alors significatif ou représentative de celle de moulage.

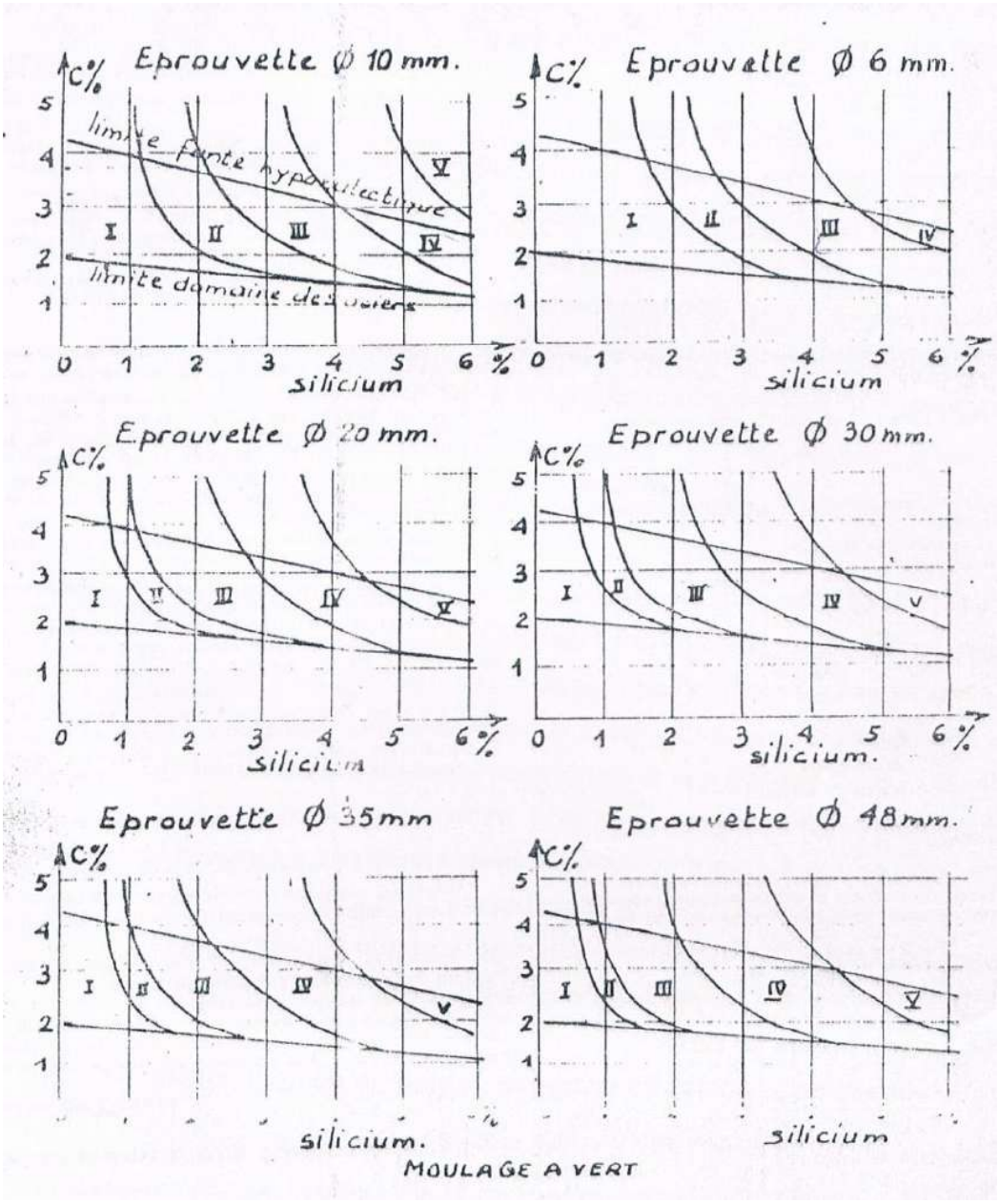


Figure 5: Relation structure composition-massivité de pièce moulée.

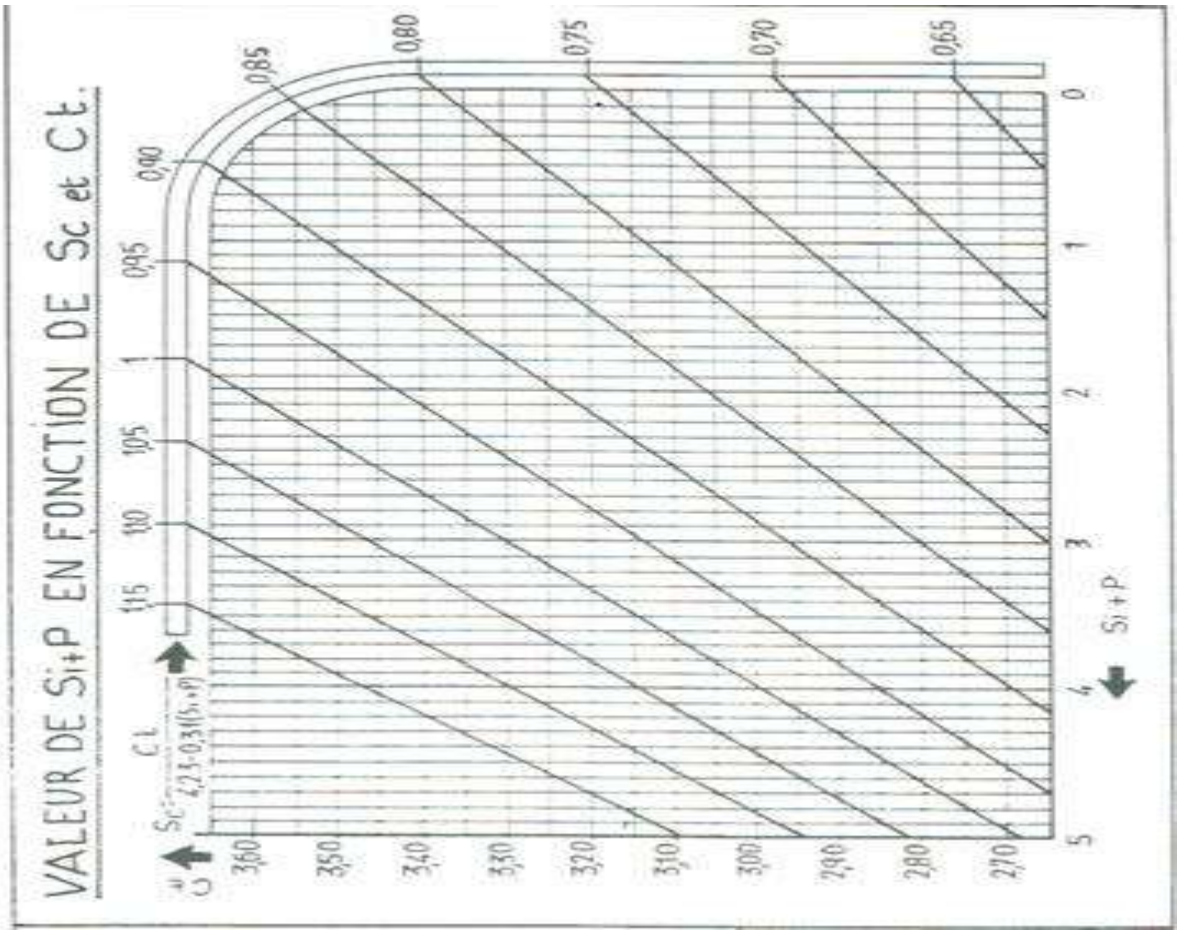
Exemple : d'après le diagramme de LAPANCHE peut-on prévoir la structure de la matrice d'une pièce de section 5*5mm Coulée en sable à vert ? pour une composition :

% C 3.6 à 4 ; % Si 2.5 à 3 ; % Mn 0.5 à 0.8 ; % P 0.4 à 0.6 ; % S < 0.05.

Une section carrée de 5*5mm de surface 25mm^2 se comporte à peu prés au refroidissement comme une section de Ø = 6mm et de surface $S = \frac{\prod d^2}{4} = \frac{\prod * 36}{4}$ = 27mm².

Donc à partir de ces calculs, on peut utiliser aisément l'abaque correspondant pour une éprouvette de 6 mm. Et par projection des deux valeurs (la moyenne du carbone %C 3,8 et la moyenne % C 2,75), on aura une structure perlitique souhaitée.

III-6 ABAQUE 05 : Détermination de C en fonction de Si+P et de SC.



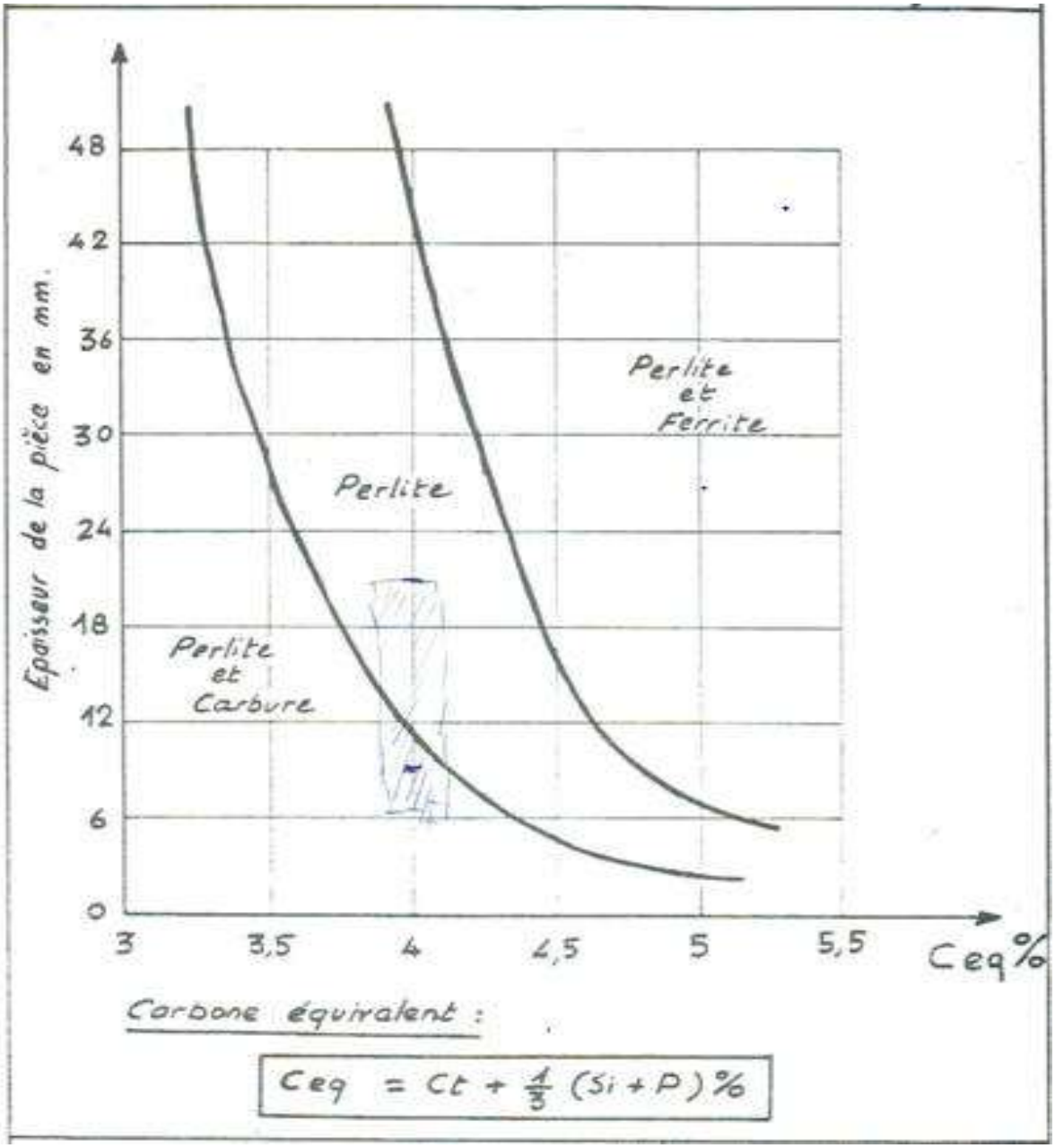
Figuré 6 : Détermination de C en fonction de Si+P et de SC.

Exemple : Si on coule une pièce d'épaisseur 10mm en fonte grise de Si+P = 2.6, et Sc =1.

On trouve par projection sur la courbe un taux de carbone est égal à 3.43%.

III-7 Abaque 06 : Diagramme de SCHNEIDEWIND : Relation entre carbone équivalent, la structure et l'épaisseur de la pièce

Vu que la structure perlitique est la meilleure structure de point de vue caractéristiques mécaniques, on opte toujours pour toutes les épaisseurs cette dernière structure.



Figuré 7 : Diagramme de SCHNEIDEWIND : Relation entre carbone équivalent, la structure et l'épaisseur de la pièce

Exemple :

Ceq = Ct+1 /3(Si+p)

Ceq = 3.43+1/3(2.6) = 4.3 perlitique

Pour un Ceq = 4.3 et pour une épaisseur de 15mm, par projection sur le diagramme, on aura la structure Perlitique souhaitée

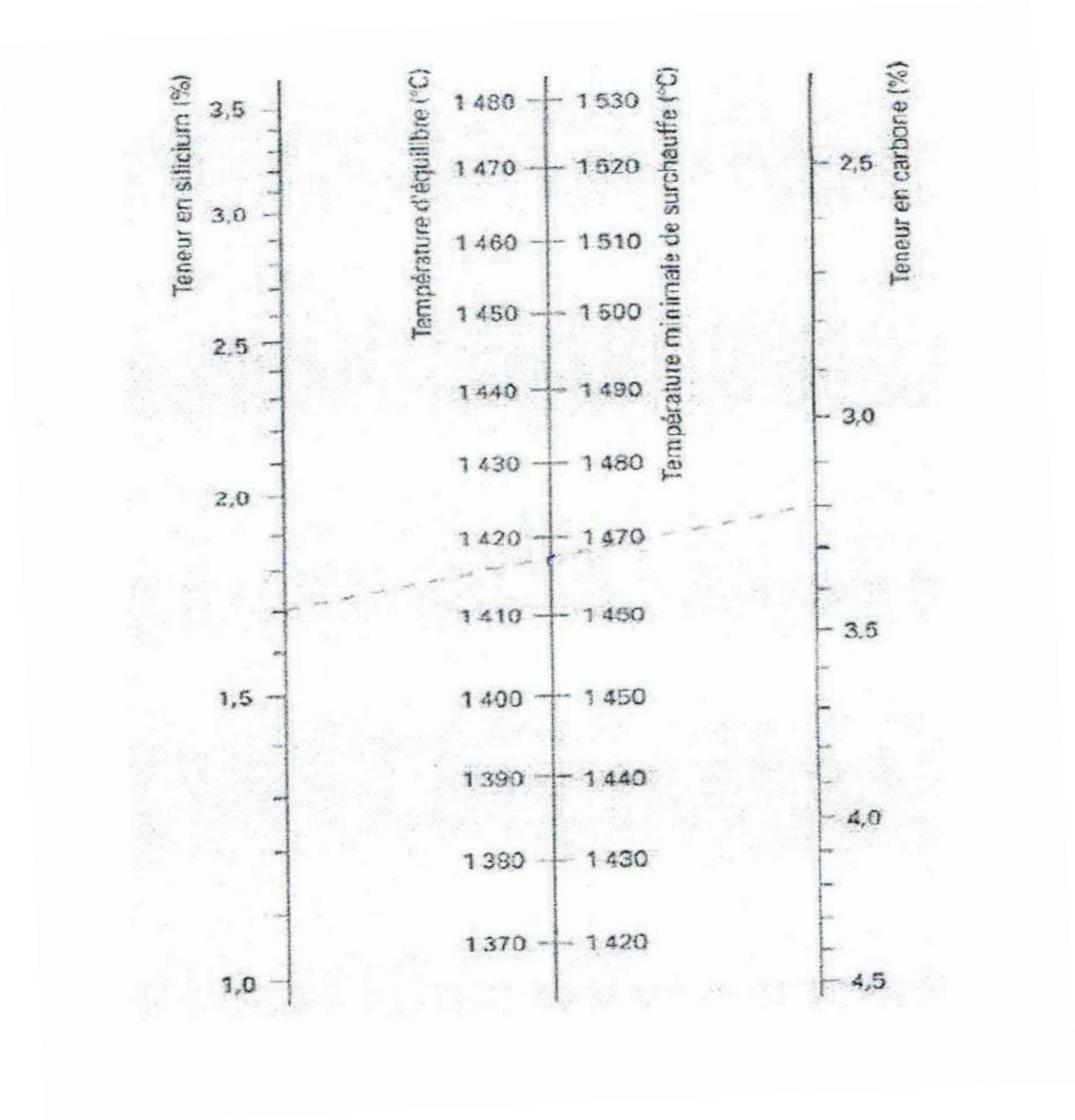
III-8 Abaque 07: pour la détermination de la température de surchauffe de la fonte grise

On peut résumer ainsi l'action de la surchauffe sur la structure des fontes grises : la surchauffe provoque d'abord un **affinement** du graphite qui, de grossier, devient moyen, puis fin ; en augmentant la surchauffe, le graphite continue à s'affiner, mais il prend la **forme D** généralement défavorable. En l'augmentant encore, la fonte devient truitée, puis blanche.

Les fontes liquides contiennent en effet suffisamment de **germes naturels (SiO_2)** pour que le graphite se cristallise sous la forme du type A. ces germes en effet sont détruits pendant la surchauffe à des températures au-delà de la température d'équilibre de la réaction :

$$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO$$

A cet effet il faut respecter la température de surchauffe qui n'excède la valeur de 200°C en utilisant l'abaque ci dessus.



Figuré 8: pour la détermination de la température de surchauffe de la fonte grise.

Exemple :

Pour Si = 1,7 **%** et C = 3,2 %, la température d'équilibre est de 1 417°C et la température minimale de surchauffe est de 1 467°C.

Donc une température de surchauffe au delà de cette température, on aura une déclanchement de la réaction de réduction de la silice pour une température de 1417°C, donc c'est la destruction des supports de germination, qui aboutit à la cristallisation du graphite de type D généralement défavorable, en l'augmentant encore, la fonte devient truitée, puis blanche.

Conclusion Générale

Conclusion générale:

La fabrication de pièces en fonte grise lamellaire à hautes caractéristiques, nécessite une maîtrise de la qualité métallurgique de la fonte brute de coulée, de façon à garantir une microstructure stable.

Dans notre étude on a mis en avant la "qualité" de la structure perlitique qui conduit normalement aux meilleures propriétés mécaniques.

La présente étude a pour but de mieux connaître **l'utilité des abaques** intervenant dans la fabrication de la fonte à graphite lamellaire, de manière à pouvoir déterminer les paramètres influents et ainsi proposer des solutions.

Donc l'étude a été orientée vers :

La prévision de la structure perlitique souhaitée et notamment des propriétés mécaniques désirées à partir de l'exploitation des différents abaques.

L'exploitation de ces abaques nous a permet :

- D'optimiser la **métallurgie** de la fonte grise lamellaire en fonction des sollicitations imposées aux pièces, notamment la dureté et la résistance à la traction.

- Maitriser la composition chimique et des traitements métallurgiques en vue d'atténuer la sensibilité à l'épaisseur et d'ajuster la structure de la matrice pour obtenir meilleures propriétés mécaniques.

- illustrer les relations entre les différents paramètres (relation entre $C_{éq}$ structure et épaisseur de la pièce, relation entre $C_{éq}$**,** résistance à la traction et épaisseur de la pièce, relation entre $\mathbf{S_C}$ structure et épaisseur de la pièce, détermination de Si en fonction de C, P et de l'épaisseur de la pièce,…….).

Sommaire

Introduction générale …….……2

Chapitre I- Généralités sur les fontes :

I-1Introduction ……..…….5

I-2 Elaboration et désignation de la fonte…….. 5

I-2-1 Minerai ……..… 5

I-2-2 Elaboration de la fonte……..…….. 6

I-2-2-1 Principaux fontes de 1ère fusion…… 7

I-2-2-2 Affinage de la fonte de 2éme fusion…….…… 8

I-2-2-3 Classification des fontes……..…….. 9

I-2-3 Désignation normalisée des fontes……..……. 9

I-2-4 Rôle et importance des fontes …… ……...…… 10

I-2.-5 Propriétés fonderie ……...……...….. 10

I-2-6 Solidification et Cristallisation des fontes ……...…….…. 11

I-2-7 Constituants d'équilibre des Fontes……... 11

I-2-8 Diagramme d'équilibre des fontes……..... 12

I.2.8.1 Cas métastable (formation cémentite - fonte blanche)……..... 14

I.2.8.2 Cas stable (fonte grise)…….... 16

I-2-8-3 Utilisation des diagrammes……...17

I-3 Utilisations des fontes……...……...….. 18

Chapitre II- Élaboration de la fonte à graphite lamellaire

II-1 Introduction…….……. 20

II-2 Classification des fontes à graphite lamellaire ……. 20

II-3 Estimation de la structure des fontes d'après le diagramme ……...…… 21

II-3-1Carboneéquivalent $\mathbf{C_{eq}}$…….……...…….. 21

II-3-2 Indice de Saturation en Carbone S_C…….. 22

II-4 Propriétés et rôle des constituants ……...…… 23

II-4-1 Matrice ……..…… 23

II- 4-1-1 Ferrite ……..……. 23
II- 4-1-2 Perlite ……..…….. 24

II- 4-1-3 Cémentite ……..……. 25
II- 4-1-4 Carbures …… 25

II- 4-2 Graphite ……..……. 26
II-5- Les différents aspects du graphite ……..……. 26

II-5-1 graphite dit : en paillettes ou lamellaire……....…… 27

II-5-2 Graphite Sphéroïdale……..…… 30

II-5-3 Graphites en Nodules …… 30

II - 6- influence du graphite dans les fontes grises moulées ……...…… 30

II- 7 Graphitisation des fontes ……..…… 30
II-7-1 germination du graphite……..…… 30

II-7-2 Décomposition des carbures …… 31

II-7-3 Diffusion du carbone …….....……. 31

II-7-4 Croissance du carbone sous forme de graphite…….. 31

II-8 Influence des différents facteur sur la cristallisation …….....…..... 31

II-8-1 Composition Chimique : (Influence des éléments Normaux) …….. 31
II-8-1-1 le carbone……..… 32

II-8-1-2 Influence de Silicium : Tf°= 1480°C ξ = 2,35g/cm3…….. 33
II-8-1-2-1 Contrôle de l'aptitude à la graphitisation……...…… 36

II-8-1-3 Influence de manganèse : Tf°= 1245°C ξ = 7,45g/cm3……..37

II-8-1-4 Influence de Phosphore : Tf°= 610°C ξ = 2,33 g/cm3……..…….. 37

II-8-1-5 Influence du soufre : Tf°= 112°C ξ = 2 g/cm3……... 40
II-8-2 Influence des gaz ……...…….. 40
II-8-3 Influences des éléments traces ……...……...… 41

II-8-4 Influence des éléments d'addition (éléments d'alliage) ……..…. 42
II-8-5 Influence de la vitesse de refroidissement sur la cristallisation des fontes …..... 43
II-8-6 Influence de l'état du métal liquide sur la cristallisation des fontes ……..... 43
II-8-6-1 Influence de la température de surchauffe et de temps de maintien ……..... 44
II-9 Inoculation des fontes ……..… 45
II-9-1 Principaux inoculants utilisés……..…. 46
II-10 le lit de fusion……..…… 47
II-10-1 Définition ……..……. 47
II-10-2 Schéma des opérations d'élaboration ……...…….. 47
II-10- 3 : Préparation du lit de fusion …… 48
II-10- 3 -1 : Parc à ferrailles ……..….. 48
II-10- 3 -2 : Parc des matières d'addition ……..…….. 48
II-10- 4 : Fusion des charges ……...…….. 48
II-11 Additions de Fin de Fusion……..……... 49
II-11- 1 Nécessité …… 49
II-11- 1-1 Analyse d'échantillon ……...…….. 49
II-11- 1-2 Autres opérations de fin de fusion ……...……. 49
II-11- 2 Rôle des éléments introduits ……..…….. 49
II-11- 2-1 Dans la charge du four …… 51
II-11- 2-2 Dans la poche de coulée ……...…….. 51
II-11-3 Décrassage de la poche ……..…… 51
II-11-4 Effet d'inoculation ……..…… 51
II-12 Propriétés des fontes à graphite lamellaire ……....…….. 52
II-12-1 Caractéristiques mécaniques fondamentales……...……... 52
II-12-1-1 Résistance à la traction …… 52
II-12-1-2 Dureté ……. 53

II-12-2 Caractéristique dynamiques …… 55
II-12-2-1 Résistance aux chocs ……..…….. 55
II-13 Propriétés mécanique d'utilisation ……..…….….. 56
II-13-1 Facteurs métallurgiques sur l'usinabilité des fontes ……..……. 56
II-14 Fonte grise courante ou ordinaire (à graphite lamellaire)……...…… 57
Chapitre II I. Élaboration de la fonte à graphite lamellaire
III- introduction……..….. 59
III-2 Abaque 01……...……. 62
III-3 Abaque 2 ……...…….…. 63
III-4 Abaque 03 ……...…… 68
III-5 Abaque 04…… 69
III-6 Abaque 05…… 71
III-7 Abaque 06 : ……. ……..……. 72
III-8 Abaque 07……...……. 73
Conclusion générale…….……..... 76

Liste des références

[1]-Manuel pratique de la fonderie de fonte par H- LE BRETON.

[2] -Metallurgie. F.Bouju . Y.Renoux .

[3]-L. Giai-Bruer. Fonderie. Eléments fondamentaux, DUNOD, 1983.

[4]-par Jean-Claude MARGERIE (ingénieur de l'école polytechnique, chef du département de la métallurgie au centre technique des industries de la fonderie(CTIF).

[5] -MICHEL GEIER .métallurgie de fonderie. Tome 2edittions Eyrolles 1978.

[6]-cour enseignant (cour fonderie) M-HABIRACHE.

[7]- Jean-Claude MARGERIE Ingénieur de l'Ecole Polytechnique, Chef du Département de la Métallurgie au Centre Technique des Industries de la Fonderie (CTIF). Techniques de l'ingénieur M380.

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

[9] -Jean Barralis Gérard. Maeder précis. Métallurgie .élaboration, structures-propriétés normalisation édition NATHAN. Paris 2004

[10] -Métallurgie (élaboration. Structure .propriétés .normalisation) JEAN BARRALIS GERAD MAEDER.