

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**  
**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

**MASTER**

FILIÈRE : **GÉNIE MÉCANIQUE**

SPÉCIALITÉ : **CONSTRUCTION MÉCANIQUE**

PAR :

**BAKHOUCHE Siham**

## Thème

---

**Recherche bibliographique sur les propriétés mécaniques d'une fonte fortement alliée au chrome utilisée dans l'industrie minière**

---

Soutenu le 06/10/2020 devant le jury composé de:

-Mr. M.A.BRADAI	Président
-Mme. M.IKHOULFI	Examinatrice
-Mr. R.YOUNES	Examineur
- Mr. A.SAD-EDDINE	promoteur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2019-2020

# Remerciements

*Tout d'abord, j'aimerais de remercier « Dieu » qui m'a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.*

*Je remercie mes parents qui m'ont soutenu toute ma vie et c'est grâce à eux que je suis arrivé à ce niveau.*

*Mes vifs remerciements vont à Mr H.SADEDINE, mon promoteur pour son aide, ses critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.*

*Je veux remercier les membres du jury Mr.BRADAI en tant que président , Mme IKHLOUFI en tant que examinatrice et Mr.YOUNES comme examinateur .*

*Je tiens à remercier tous mes enseignants de département de génie mécanique spécialement nos aimables enseignants Melle. BOUZIDI , Mr. BECHEUR , Mr. HADJOU et Mr. BECHIR .*

*Mes remerciements vont aussi à mes amis qui m'ont encouragé .*

**S.BAKHOUCHE**

## Dédicace

*Je dédie ce modeste mémoire à :*

*Mes parents qui m'ont soutenu dans mon parcours d'étude*

*Ma sœur et son mari et mes petits Youssef et Ayoub*

*Mes frères et toute la famille Bakhouche*

*La famille saïche, boufroua et oubernine*

*Et tous mes amis dans la résidence pépinière " sabrina, Asia et Lamia..."*

*Et tous les amis de l'université*

*Je dédie ce travail en particulier à mon fiancé Said qui m'a aidé avec tout ce qu'il pouvait .*

## Liste des figures

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure 1	Diagramme fer-carbone à cémentite (trait plein) et à graphite (traits pointillés).....	5
Figure 2	Solidification d'une fonte grise hypoeutectique.....	8
Figure 3	Germination des phases de la fonte blanche à partir du liquide au cours du refroidissement ; fonte hypo- et hypereutectique.....	9
Figure 4	Diagramme fer-carbone métastable.....	14
Figure 5	Diagramme fer-carbone Diagramme fer-carbone à cémentite (trait plein) et à graphite (traits pointillés).....	18
Figure 6	Diagramme d'équilibre fer-chrome.....	19
Figure 7	Vue schématique d'un échantillon en forme de barreau solidifié unidirectionnellement et trempé.....	23
Figure 8	optimisation d'atelier de broyage ciment.....	25
Figure 9	Dureté et résistance à la traction d'une fonte modérément alliée trempée et revenue.....	29
Figure10	Micrographie MEB montrant les Séquence de nucléation et de croissance des carbures secondaires M3C d'une fonte blanche contenant 8,8%Cr 3%C et 6% N a : à l'état brut de coulée, b et c après traitement thermique à différent temps de maintien.....	32
Figure11	Micrographies MEB de carbures secondaires M7C3 à différents temps de maintien.....	33
Figure12	Micrographies MEB de carbures secondaires M23C6 à différents temps de maintien.....	33
Figure13	Micrographie optique d'une fonte au chrome traitée. a : Etat brut de coulée, b : après un traitement à 1130°C/ et un maintien de 4h.....	34
Figure14	Micrographie MEB d'une fonte à haute teneur en chrome traitée.....	34

## La liste des tableaux

<b>tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau 1	alliages de fonderie –matériaux moulés métalliques.....	2
Tableau 2	Les phases qui se trouvent dans les fontes selon le diagramme d'équilibre.....	10
Tableau 3	Caractéristique chimique et mécanique d'une fonte blanche.....	10

## Sommaire

<b>Titre</b>	<b>Page</b>
I-1-Généralité sur les fontes .....	1
I-1-1-définition de la fonte .....	2
I-1-2- composition chimique .....	2
I-1-3-Classification des fontes.....	3
I-1-4-Les principaux de la fonte.....	3
I-1-5-Action des principaux éléments présente dans la fonte .....	4
I-1-6-Désignation normalisée de la fonte .....	5
I-2- Les différents types de fontes .....	6
I-2-1- Les fontes grises .....	6
I-2-2- Les fontes blanches .....	7
I-2-3-Les fontes spéciales alliées .....	9
- fontes blanches à forte teneur en chrome .....	10
I-3- Composition chimique des fontes.....	10
I-4-Modes d'obtention .....	11
I-5- Diagramme d'équilibre des phases .....	12
I-5-1-Diagramme d'équilibre binaire (fer-carbone).....	12
* Diagramme fer-carbone métastable .....	12
* Diagramme fer-carbone stable ou à graphite .....	16
I-5-2-Diagramme fer-chrome .....	17
I-6- caractéristique métallographiques .....	19
II-Les fontes alliées au chrome.....	19
- Fonte à haute teneur en chrome .....	20
II-2-Solidification des fontes à haute teneur en chrome .....	21

III- Domaine d'utilisation des fontes .....	22
III-1-boulets de broyage .....	23
III-2-propriétés mécanique des boulets de broyage .....	24
III-2-1-La dureté .....	24
III-2-2- Résistance à l'usure .....	24
III-2-3-Résistance aux chocs .....	25
IV-Traitement thermique des fontes .....	26
IV-1- Trempe et revenu.....	27
IV-2- Traitement des fontes à haute teneur en chrome.....	28
V-Effet du traitement thermique .....	29

# **Introduction générale**



## **Introduction générale**

Les fontes au chrome, font partie d'une classe de matériaux à large étendue d'utilisation. Elles sont sollicitées pour des opérations d'usure dans divers domaines industriels, principalement les cimenteries, l'industrie minière et sidérurgique. La recherche de meilleures propriétés et d'une durée de service optimale demeurent un souci continu des différentes industries utilisatrices.

La fonte fortement alliée au chrome est un matériau utilisée dans industrie lourd , comme des outils des machines , l'industrie chimique et pétrolière.

Les boulet de broyage est une pièce maitresse dans l'industrie cimentière utilisé pour transformer les roche en fines dont le calibre est inférieur au millimètre. cette pièce de boulet elle doit répondre au bonne résistance aux frottement, une très bonne résistance à l'abrasion et la résistance aux chocs.

Pour la réalisation de ces pièces on doit utilisée les fontes fortement alliées au chrome (11% à 13% de chrome ) sont de bonnes candidates .

Cette recherche bibliographique comprend plusieurs points sur les fontes , premièrement des généralités sur les fontes , les différentes types de fontes . ensuite les fontes alliées au chrome sa solidification , le domaine d'utilisation (les boulets de broyage ) , ses propriétés mécanique tel que la dureté , la résistance à l'usure et la résistance au chocs et le traitement thermique des fontes et sont effet .

## **Recherche bibliographique :**

**(Sur les propriétés mécaniques d'une fonte fortement alliée au chrome utilisée dans l'industrie minière)**

**I-1- Généralité sur les fontes**

Les alliages de fonderie constituent un ensemble de matériaux métalliques, permettant la réalisation de pièces par moulage. Les propriétés des pièces qui en résultent, dépendent étroitement des facteurs suivants :

- l’élaboration et le traitement du métal liquide ;
- la solidification et le refroidissement dans le moule ;
- les conditions de démoulage et de refroidissement ;
- les traitements thermiques complémentaires éventuels.

Parmi les alliages de fonderie, les fontes ont une grande importance (tableau I-1); elles forment une famille de matériaux ferreux qui, malgré sa complexité, peut être classées de façon logique. Elle présente, bien sûr, certaines analogies avec les aciers. [5]

Alliage ferreux	Alliage non ferreux
*aciers moulés (2% de la production sidérurgique) *fontes moulées(10% de la production sidérurgique )	* à base d’aluminium * à base de cuivre et autres métaux lourds

**Tableau 1 :** alliages de fonderie –matériaux moulés métalliques

**I-1-1-Définition de la fonte**

La fonte est un alliage de fer et de carbone, dont la teneur est supérieure à 2%. Le carbone, qui est en sursaturation dans les fontes, peut précipiter sous forme de graphite ou de cémentite Fe<sub>3</sub>C. Elles se distinguent par rapport aux autres alliages par leur excellente coulabilité. Une fonte qu’elle soit produite dans un usine sidérurgique, pour être transformée en acier ou qu’elle soit élaboré dans une fonderie, afin de coller des pièces dans des moules .On peut le définir comme un alliage à base de fer et de carbone ,dont la teneur de carbone est suffisante pour que la fusion et la solidification se produise dans un intervalle de température, nettement plus bas que le point de fusion du fer et relativement étroit, soit généralement entre 1100°C et 1350°C.

Une solidification eutectique , se produisant par exemple à 1150°C pour une teneur de 4.3% de carbone, dans un alliage fer-carbone permet de couler la fonte avec les plus grandes facilités et d'obtenir des pièces sans défauts. [5]

## **I-1-2-Composition chimique**

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

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

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

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

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

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

Ces mêmes éléments se retrouvent d'ailleurs souvent à l'état de traces, comme impuretés, parfois utiles des fontes non alliées.[5]

## **I-1-3-Classification des fontes :**

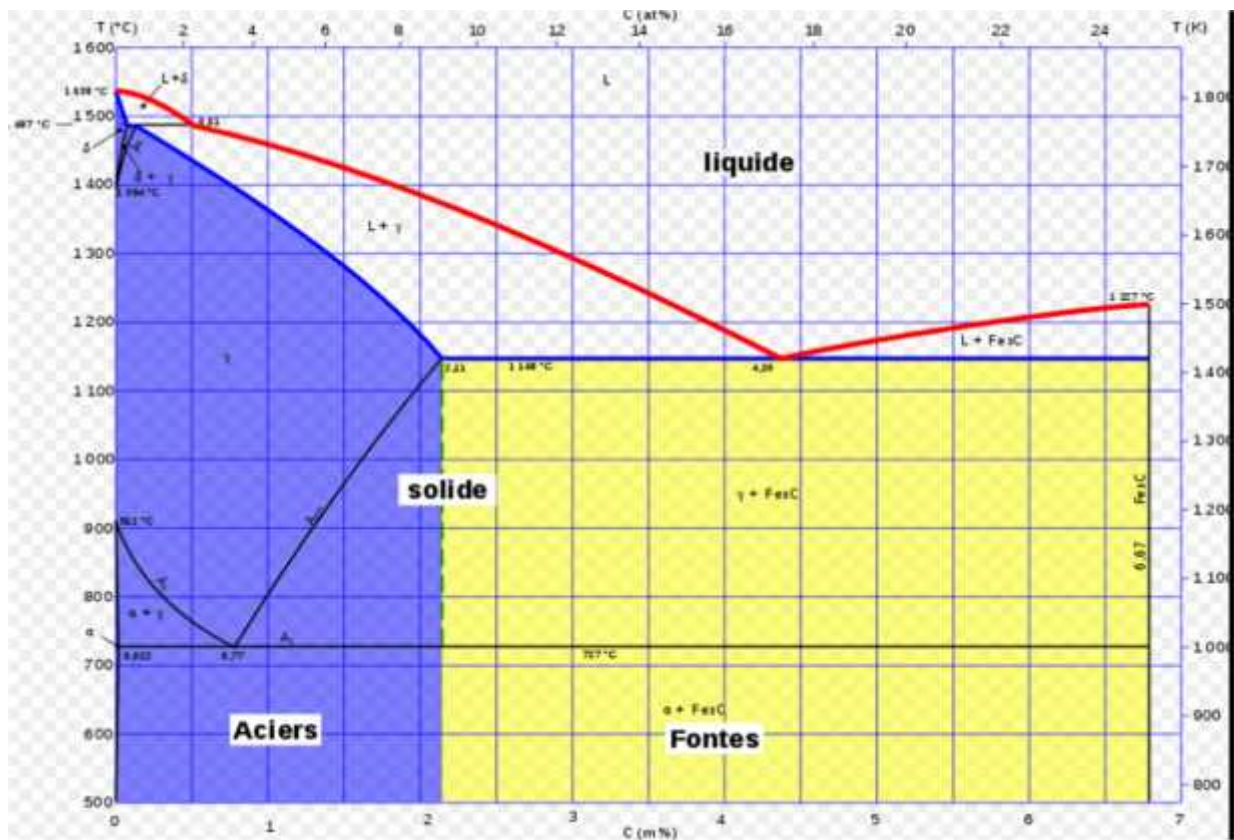
Plusieurs classifications des fontes existent, mais la plus utilisée, basée sur le faciès de rupture d'un témoin, définit deux catégories : les fontes blanches, à cassure blanche, constituées de fer et de cémentite et les fontes grises, à cassure grise, constituées de fer et de graphite. Les fontes sont toutes des alliages. Elles se distinguent des autres alliages par leur excellente coulabilité. La fonte a une température de fusion allant de 1 135 °C à 1 350 °C, essentiellement en fonction du pourcentage de carbone et de silicium qu'elle contient. Lorsqu'elle est en fusion, sa teneur maximale

en carbone dépend de sa température. Au moment de la solidification, la quantité de carbone précipitant sous la forme de graphite dans la matrice métallique dépend des autres éléments présents (essentiellement le silicium) et des vitesses de refroidissement.

Elle peut être un précurseur dans la fabrication de l'acier à partir de minerai de fer. C'est l'alliage qui sort du haut fourneau et qui sera affiné en acier (par décarburation). On l'appelle alors fonte brute, pour la distinguer de la fonte de fonderie, généralement issue d'une fusion au cubilot, de composition déterminée, et destinée à la production de pièces moulées.

**I-1-4-Les principaux de la fonte :**

L'origine du minerai de fer, le choix du fondant, des proportions de fondant et de coke, ainsi que la vitesse de refroidissement déterminent la composition désirée de la fonte. De plus, selon leur teneur en carbone et la structure des cristaux, les fontes ont des propriétés mécaniques diverses. Elles sont généralement faciles à couler dans des moules, mais très dures et cassantes (teneur en carbone élevée), elles se prêtent mal à l'usinage. Des fours spéciaux permettent d'abaisser la teneur en carbone à moins de 2 %. On obtient alors de l'acier dont les qualités correspondent mieux aux besoins des industriels.



**Figure1 :** Diagramme fer-carbone à cémentite (trait plein) et à graphite (traits pointillés).

**I-1-5-Action des principaux éléments présente dans la fonte :**

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

**b. Chrome :** c'est un élément très durcissant et carburigène. il affine la perlite, améliorant ainsi les caractéristiques mécaniques.

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

**a. manganèse :** il est maintenu a une teneur suffisante pour neutraliser le soufre en formant du sulfure de manganèse MnS. Cette teneur minimale est fixé à :

$$\text{Mn}\% = 1.7\% \text{S} + 0.3$$

Au-dessus de cette proportion,il agit comme un faible stabilisant des carbures. En outre il affine la perlite et de ce fait élève la résistance à la traction. Sa teneur dans les fontes grises est généralement de 0.5 à 0.8 %.

**a. molybdène :** élément carburigène, il favorise la formation de structure aciculaire et affine celle-ci. A un impact meilleur sur la résistance aux chocs. On l'associe souvent au nickel et au chrome en addition de 0.3 à 1%. On peut en trouver jusqu'à 10% dans les fontes blanches.

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

**I-1-6-Désignation normalisée de la fonte :**

La désignation européenne EN 1560 commence par EN-GJ (la lettre G désignant un métal moulé, comme pour les aciers, et le J désignant le fer) :

- JEN-GJN : fonte blanche (no graphite) ;
- JEN-GJL : fonte à graphite lamellaire ;
- JEN-GJS : fonte à graphite sphéroïdal ;
- JEN-GJV : fonte à graphite vermiculaire ;
- JEN-GJMW : fonte malléable à cœur blanc (*white*) ;

JEN-GJMB : fonte malléable à cœur noir (*black*).

On ajoute la résistance à la traction  $R_m$  en MPa, et éventuellement allongement à la rupture A%, par exemple :

- EN-GJS-400-18 : fonte à graphite sphéroïdal de résistance à la traction 400 MPa et présentant un allongement à la rupture de 18 %.

Pour les fontes alliées, on peut utiliser la même désignation que les aciers fortement alliés, par exemple :

- X300CrNiSi9-5-2 est une fonte à environ 3 % de carbone, 9 % de chrome, 5 % de nickel et 2 % de silicium.

L'ancienne norme française (NF A 32-xxx) utilisait les préfixes

pour les fontes grises non alliées (graphite lamellaire), le préfixe Ft suivi de la résistance à la traction en  $\text{kgf/mm}^2$ , ou bien le préfixe FGL suivi de  $R_m$  en MPa par exemple :

- Ft 10 = EN-GJL-100 ;

- FGL 150 = EN-GJL-150 ;

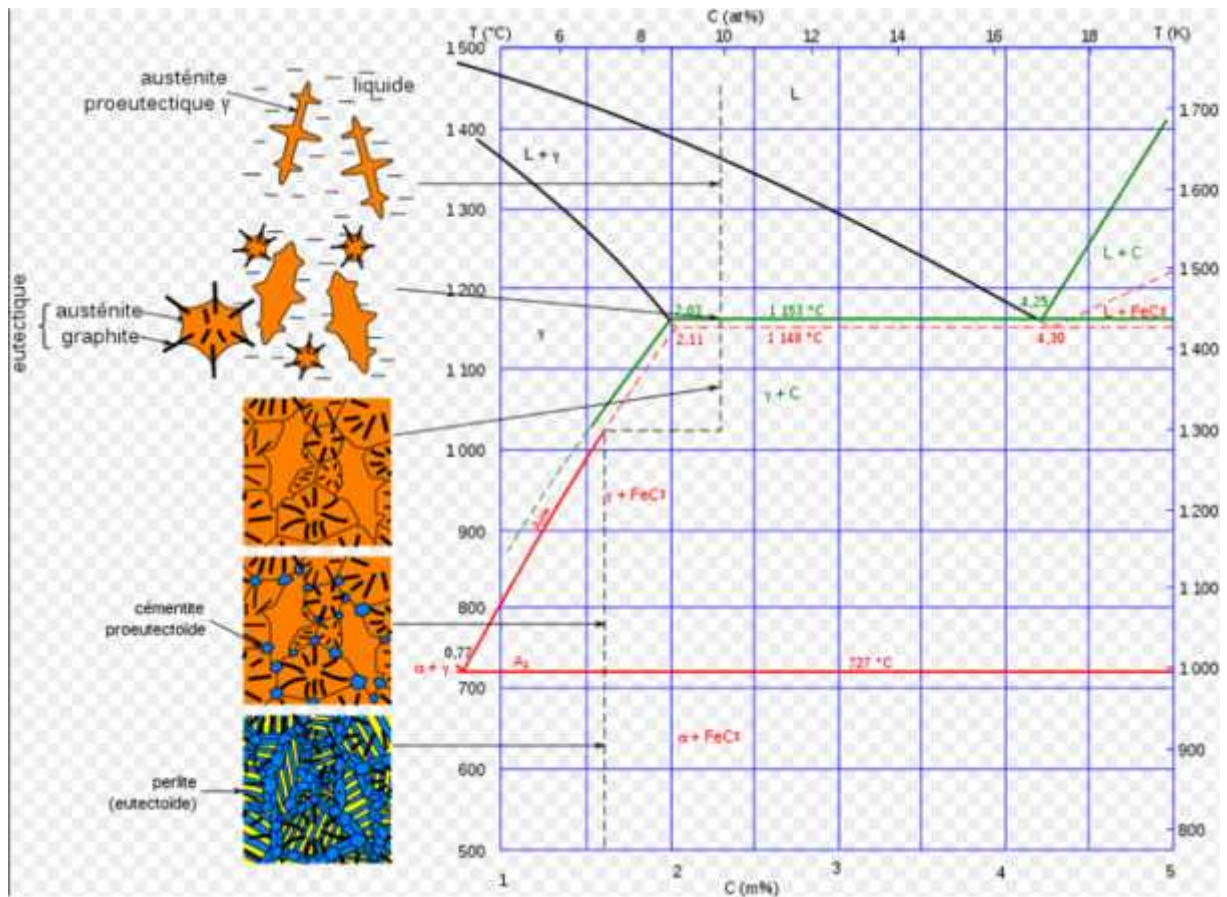
pour les fontes à graphite sphéroïdal : FGS, MB ou MN suivie de la résistance à la traction en MPa et éventuellement de l'allongement à la rupture en %, par exemple :

- FGS 370-17 = EN-GJS-370-17.

## **I-2- Les différents types de fontes :**

### **I-2-1- Les fontes grises :**

Les fontes grises, présentent un aspect gris à la cassure en raison de la présence du carbone principalement sous forme de graphite. Leur fabrication nécessite des minerais à forte teneur en silicium (1,5 à 3%) et une proportion de coke élevée. Elles ont une température de fusion inférieure à celle de l'acier (1 200 °C pour les fontes grises contre 1 370 °C pour l'acier), ce qui permet de les mouler facilement. Très peu malléables et ductiles, elles peuvent cependant être usinées.



**Figure2** : Solidification d'une fonte grise hypoeutectique.

### I-2-2- Les fontes blanches :

Les fontes blanches sont caractéristiques par l'absence complète du graphite car le carbone, en excès par rapport à sa solubilité maximale dans l'austénite, est combiné au fer sous forme de carbures métastable. Les carbures à base de fer ont des propriétés physiques très différentes de celles du graphite et en particulier, leur dureté élevée augmente beaucoup celle de la fonte dont ils constituent une fraction volumique importante.

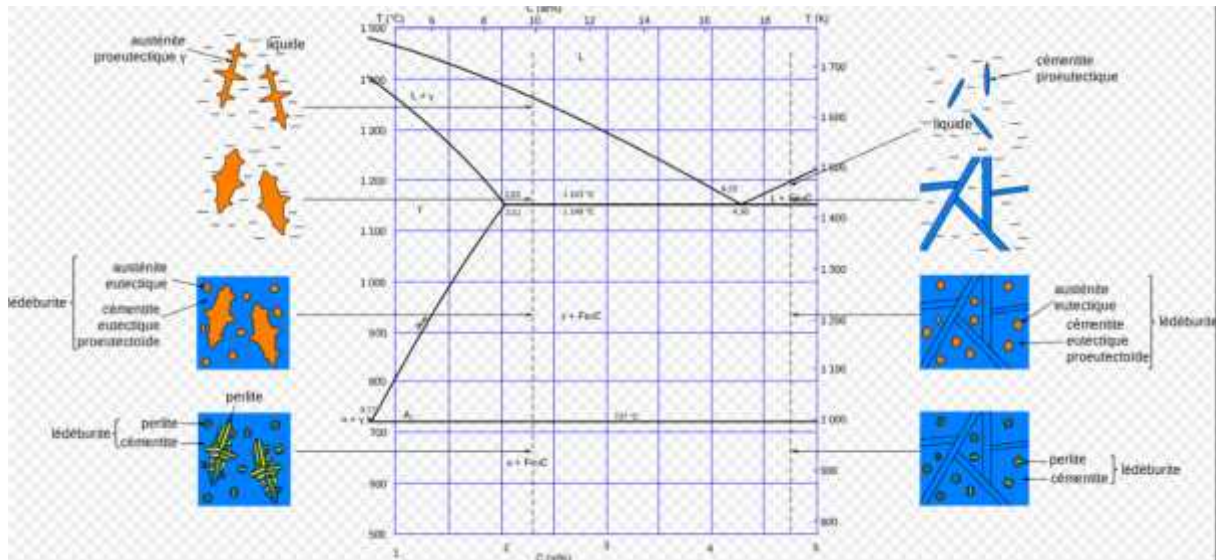
Ainsi les fontes blanches, dures mais malheureusement plus ou moins fragiles, conviennent excellentement pour résister à l'usure abrasive. En conséquence, il est très difficile, sinon impossible, de les usiner à l'aide d'outils coupants ordinaires.

Les fontes blanches ne se moulent pas facilement que les autres fontes à cause de leur température de solidification est généralement plus élevée et qu'elles solidifient avec la totalité du carbone présent sous forme combinée de fer.[7]

Les fontes blanches présentent un aspect blanc à la cassure. Le carbone qu'elles contiennent est combiné au fer sous forme de carbure (cémentite). Contrairement aux fontes grises, elles sont obtenues à partir de minerais de fer pauvres en silicium mais riche en manganèse. Les fontes



blanches sont très dures et cassantes et se prêtent mal au moulage. Elles servent surtout de matière première pour la fabrication de l'acier par décarburation dans des fours spéciaux. Des traitements thermiques de la fonte blanche (chauffage et refroidissement lent) permettent de décomposer le carbure de fer en nodules fins de graphite, ce qui rend la fonte blanche plus apte au façonnage.



**Figure 3 :**Germination des phases de la fonte blanche à partir du liquide au cours du refroidissement ; fonte hypo- et hypereutectique.

Dans le cas d'une fonte blanche (sans graphite), la solidification et le refroidissement s'opèrent suivant le diagramme métastable : fer-cémentite . Les structures des fontes peuvent être décrites à partir de diagramme d'équilibre fer-carbone.[7]

1.7<%C<6.67 : fonte		
Hypoeutectique	1.7<%C<4.3	Lédeburite +perlite
Eutectique	%C=4.3	Lédeburite=(austénite 1.7%C+cémentite 6.67 %C)
Hypereutectique	4.3<%C<6.67	Lédeburite + cémentite

**Tableau 2 :** Les phases qui se trouvent dans les fontes selon le diagramme d'équilibre.

Par rapport aux aciers, les fontes blanches présentent une dureté élevée, d'où une grande résistance à l'usure par frottement et par abrasion, par contre cette dureté les rend fragiles et pratiquement non usinables par les moyens courants (tableau 2).[7]

	Fonte blanche
Ct%	2.8 à 3.6
Si%	0.5 à 1.3
Mn%	0.4 à 0.9
HB	300 à 575
Rm(N/mm)	140 à 350

**Tableau 3 :**Caractéristique chimique et mécanique d'une fonte blanche

### I-2-3-Les fontes spéciales alliées :

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

-Les fontes peu alliées ou modérément alliées en nickel,chrome,cuivre,étain,molybdène, titane ...ne modifiant pas la structure mais rendant seulement la matrice plus fine, plus homogène, plus sensible aux traitements thermiques.

- Les fontes grises, GS ou blanche fortement alliées (jusqu'à 40% de métaux divers) dont la structure et les propriétés sont profondément influencées par la composition : fontes austénitiques au nickel (cuivre) chrome, fontes ferritiques à haute teneur en silicium ou en aluminium ....

#### - fontes blanches à forte teneur en chrome :

Comparativement aux fontes blanches martensitiques, les fontes blanches à fort teneur en chrome sont moins couteuses .Elles sont produites industriellement pour la fabrication des pièces d'épaisseur moyenne et elles peuvent mieux résister au choc mécanique que la fonte martensitiques mais elles s'usent plus rapidement. lorsque ces fontes ne contiennent que du chrome comme élément d'alliage, elles doivent leurs caractéristiques de résistance à l'abrasion aux carbures de fer et de chrome dont la dureté Vickers varie entre 840 et 1800 Hv. la nature de ces carbures varie en fonction de rapport Cr/C .Ces fontes doivent subir un traitement thermique pour permettre l'obtention d'une matrice martensitique. [7]

### I-3- Composition chimique des fontes :

D'un point de vue chimique, les fontes sont des alliages fer-carbone contenant une phase eutectique, appelée lédéburite. Sur le diagramme de phase fer-carbone métastable, il s'agit donc des alliages fer-carbone ayant plus de 2,11 % de carbone (mais ce diagramme n'est plus valable en présence d'éléments d'alliage).

On distingue les différentes fontes par leur pourcentage de carbone. Dans le cas d'un alliage pur de fer et de carbone (cas théorique car la fonte contient toujours du silicium et du manganèse en quantités non négligeables), on relève les seuils suivants :

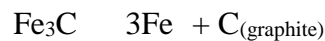
] fonte hypoeutectique : de 2,11 à 4,3 % de carbone ;

] fonte eutectique : 4,3 % de carbone ;

cette fonte a la température de fusion la plus basse à 1 148 °C ;

] fonte hypereutectique : de 4,3 à 6,67 % de carbone.

Les aciers cristallisent dans le diagramme fer-carbone métastable fer-cémentite (représenté ci-contre), bien que ce soit le graphite qui soit thermodynamiquement stable. La cémentite devrait se décomposer suivant la réaction :



Mais la mobilité des atomes de carbone n'est pas suffisante pour que cela ait lieu. Le cas est différent pour les fontes qui ont une teneur plus importante en carbone, et peuvent ainsi cristalliser dans le diagramme fer-carbone stable : fer-graphite. La différence entre ces 2 diagrammes réside en premier lieu dans la vitesse de refroidissement : quand la vitesse de refroidissement est rapide, le carbone dissous dans le fer n'a pas le temps de migrer sur de grandes distances et forme des carbures  $\text{Fe}_3\text{C}$ , la cémentite, sur place; alors que si la vitesse de refroidissement est assez lente, le carbone peut se « rassembler » et former du graphite.

Sur le diagramme fer-carbone stable, l'eutectique est à une teneur de 4,25 % de carbone, et fond à une température de 1 153 °C. L'obtention d'une fonte grise ou blanche dépend à la fois de leur composition et de la vitesse de refroidissement.

L'ajout d'éléments d'alliage peut favoriser la solidification de la fonte soit selon le diagramme stable (graphite), soit selon le diagramme métastable (cémentite). On retrouve notamment comme éléments d'alliage le silicium qui va favoriser la solidification de la fonte selon le diagramme stable ou encore le manganèse qui va favoriser la formation de perlite (lamelles de

ferrite et de cémentite). Une fonte n'est cependant pas considérée comme alliée si le manganèse est compris entre 0,5% et 1,5%, le silicium est compris en 0,5 et 3%, le phosphore entre 0,05 et 2,5%<sup>1</sup>

Une fonte est dite alliée si, en plus des éléments ci-dessus, elle contient, en quantité suffisante, au moins un élément d'addition tel que : nickel, cuivre (plus de 0,30 %) ; chrome (plus de 0,20 %) ; titane, molybdène, vanadium, aluminium (plus de 0,10 %). De même, une fonte renfermant plus de 3 % de silicium ou plus de 1,5 % de manganèse est considérée comme spéciale (c'est notamment le cas des fontes GS à matrice ferritique renforcée)

## **I-4-Modes d'obtention :**

**a/ fontes de première fusion :** c'est la fonte de base qui est obtenue directement par le traitement du minerai, le déroulement des opérations est le suivant :

\*extraction du minerai.

\*concassage, broyage.

\*enrichissement pour éliminer le plus possible de gangue.

\*agglomération pour en faire des blocs.

\*réduction de ce minerai dans un haut fourneau pour obtenir de la fonte de première fusion, dont une partie sera affinée pour mouler des pièces en fonte.

**b/ Fontes de composition chimique définie :** ces fontes peuvent être élaborées dans plusieurs sortes d'appareils, les cubilots qui sont les plus utilisés, les fours électriques fixes ou non, à arcs ou à induction.

**c/ fontes de seconde fusion :** elles sont obtenues par refusions des gueuses de premières fusion, affinage et dosage en fonction de la nuance voulue. Il faut remarquer que la plupart du temps on rajoute à ces gueuses des retours de fonderie.

**d/ fontes synthétique :** elles sont obtenues par fusion d'une charge permettant de réaliser une synthèse chimique de tous les éléments simples qui constituent la fonte. Le fer est alors rapporté par des riblons d'acier non alliés. Les éléments à introduire, par des ferro-alliages correspondants. Pour le carbone en ajoute des ferromanganèse carburé ou du graphite.

**I-5- Diagramme d'équilibre des phases :[8]**

**I-5-1-Diagramme d'équilibre binaire (fer-carbone) :**

L'étude du diagramme binaire fer-carbone sera légitimée puisqu'elle permet de comprendre le comportement et les propriétés des aciers et des fontes dont l'importance technique et primordiale .Il existe deux diagrammes d'équilibre fer-carbone

- diagramme d'équilibre métastable.
- diagramme d'équilibre stable.

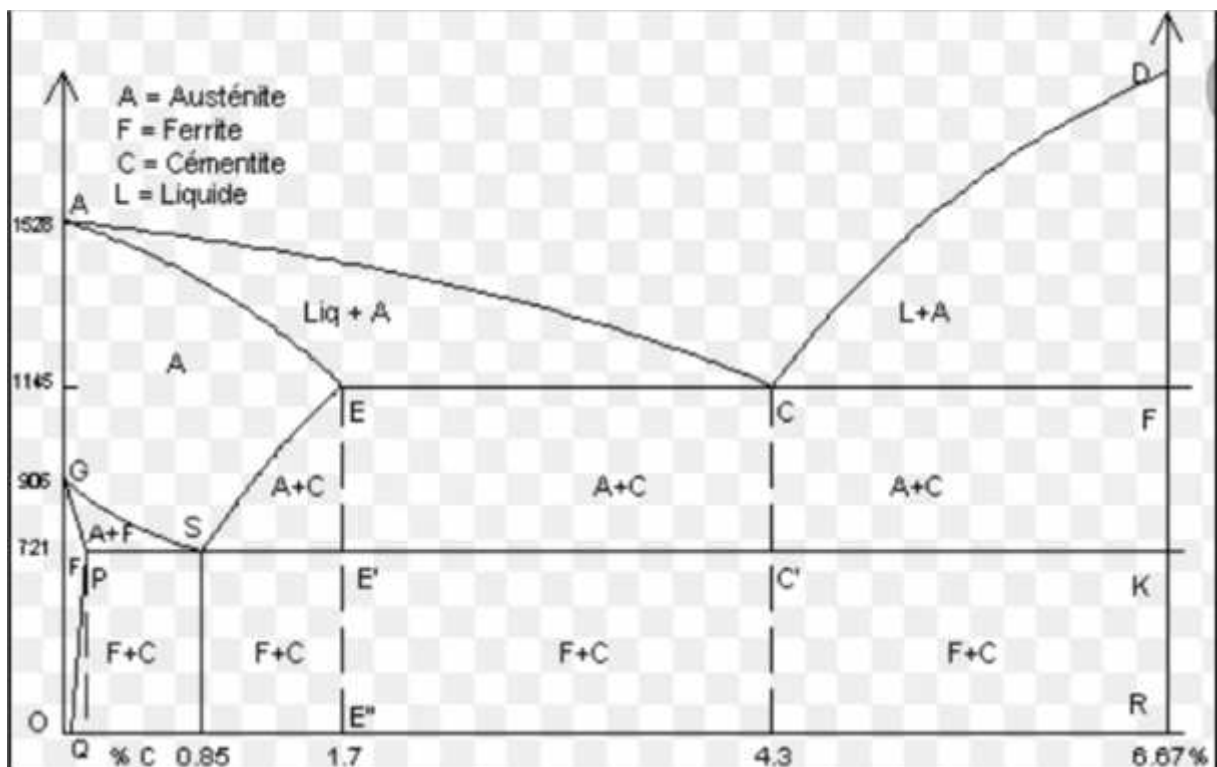
**\* Diagramme fer-carbone métastable :**

Ce diagramme peut être ainsi considéré comme le diagramme d'équilibre fer-cémentite .Ces alliages contiennent le carbone sous forme d'une combinaison  $Fe_3 C$  et correspondent à un état métastable permettant l'étude des aciers et les fontes blanches.

Ce diagramme est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques.

Il est limité à droite par la cémentite (6.67%C, matériau fragile, cassant, très dur) et apparaitre les deux grande familles de métaux ferreux :

- Les aciers (entre 0.008et 1.7%C)
- Les fontes (entre 1.7 et 6.67%C)



**Figure 4 : Diagramme fer-carbone métastable**

➤ **Description du diagramme :**

**-les ligne :**

**ACD** : liquidus.

**AEF** : solidus

**ECF** :eutectiques

**A1(723°C)(PK)** :eutectoïde (palier).

Il marque la fin de solidification de la perlite, mixture de fer contenant 0.83%C, en austénite, au-dessus de 723°C la perlite n'existe plus.

**A3** : elle précise la fin de la transformation de la ferrite en austénite, la ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

**Acm** : elle indique la fin de la dissolution, aux normes internationales. Après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.

**-les phases :**

**Austénite** : c'est une solution solide de carbone dans le fer cette solution solide occupe seule le domaine AESG(fer ) et coexiste avec d'autre phases dans le domaine adjacents :

-avec la ferrite (GSP)

-Avec la cémentite (ESKF)

**Ferrite** : c'est une solution solide de carbone dans le fer . Cette solution occupe seule le domaine GPQ et coexiste avec l'austénite dans le domaine GPS et avec la cémentite PQRK.

**Cémentite** : c'est une combinaison chimiquement définie (carbure de fer à 6.67% de carbone). La cémentite coexiste avec l'austénite dans le domaine (SEFK) et avec la ferrite dans le domaine (PQRK).

➤ **les points particuliers :**

Point eutectiques à 4.3% de carbone	<p>A 1145°C, le liquide eutectique à 4.3% de carbone en a solidifié en point C à 4.3% de carbone donnant la lédéburite (eutectique forme de cémentite et d'austénite à 1.7%C). La règle de segments inverse donne le rapport des masses de ces constituants.</p> <p>% austénite= <math>(CF/EF).100 = [(6.7-4.3)/(6.7-1.7)].100</math></p> <p>% cémentite = <math>(CE/EF).100 = [(4.3-1.7)/(6.7-1.7)].100</math></p>
---	---

Point eutectoides point S à 0.83% de carbone	<p>Au point S, l'austénite de composition 0.83% de carbone est convertie en perlite eutectoïde formée de ferrite et de cémentite dans des proportions :</p> <p>% cémentite = <math>(SP/PK).100 = [(0.83-0) / (6.7-0)].100</math></p> <p>% ferrite = <math>n(SK/PK).100 = [(6.7-0.85)/(6.7-0)].100</math></p>
--	--

➤ **Interprétation du diagramme :**

Tout alliage contenant moins de 4.3% C, sa solidification commence par un dépôt de solution solide de carbone dans le fer le long de la branche AC et tout alliage contenant plus de 4.3% jusqu'à 6.7 de carbone, sa solidification commence par un dépôt de cémentite primaire. Tout alliage à température et une teneur donnée, situé au-dessous de AECF représente un alliage entièrement solide formé de 1 ou 2 phases et 1 ou plusieurs constituants (voir le tableau ci-dessous).

Domaine	Zones	Phases	Constituants
AESG	AESG	1	Austénite
GSP	GSP	2	Austénite + ferrite
GPQ	GPQ	1	Ferrite
ECFKS	EE'S	2	Austénite+cémentite
	ECC'E'	2	Austénite + cémentite secondaire + lédéburite
	CFKC'	2	Lédéburite +cémentite primaire
PSKLQ	PSS'Q	2	Ferrite + perlite
	SE'ES	2	Cémentite secondaire +perlite
	E'C'C''E''	2	Cémentite secondaire +perlite +lédéburite
	C'KRC''	2	Cémentite primaire + lédéburite

**\* Diagramme fer-carbone stable ou à graphite :**

L'étude de ce diagramme est analogue à celle faite précédemment (fer-cémentite), il suffit donc de remplacer le mot cémentite par le mot graphite. On doit seulement noter que les températures de l'eutectique et de l'eutectoïde sont plus élevées de quelques degrés (1153°C ou lieu

de 1148°C et 738°C ou lieu de 727°C). Il s'ensuit que toutes les teneurs en carbone des points d'intersections des isothermes (paliers) correspondant avec les blanches obliques du diagramme sont légèrement abaissées. C'est ainsi que la teneur en carbone de l'austénite à 1152°C est de 2% au lieu de 2.11% et que la lédéburite ne contient que 4.25% au lieu de 4.3%. De même la perlite ne contient que 0.68% ou lieu de 0.77%.

Ce diagramme présente d'intérêt pratique que pour les alliages dont les teneurs en carbone sont supérieures à 2% puisque les seuls alliages industriels contenant du carbone libre sont les fontes. L'interprétation de ce diagramme est similaire de diagramme fer-cémentite néanmoins il ne faut pas omettre que pour certain calculs ce diagramme n'est pas limité à 6.7% de carbone mes bien à 100% et par conséquent les proportions de l'austénite eutectique et du graphite dans la lédéburte sont donnés par :

$$\% \text{ austénite eutectique} = (C'F' / E'F') \cdot 100 = [(100 - 4.2) / (100 - 1.55)] \cdot 100$$

$$\% \text{ graphite} = (C'E' / E'F') \cdot 100 = [(4.2 - 1.55) / (100 - 1.55)] \cdot 100$$

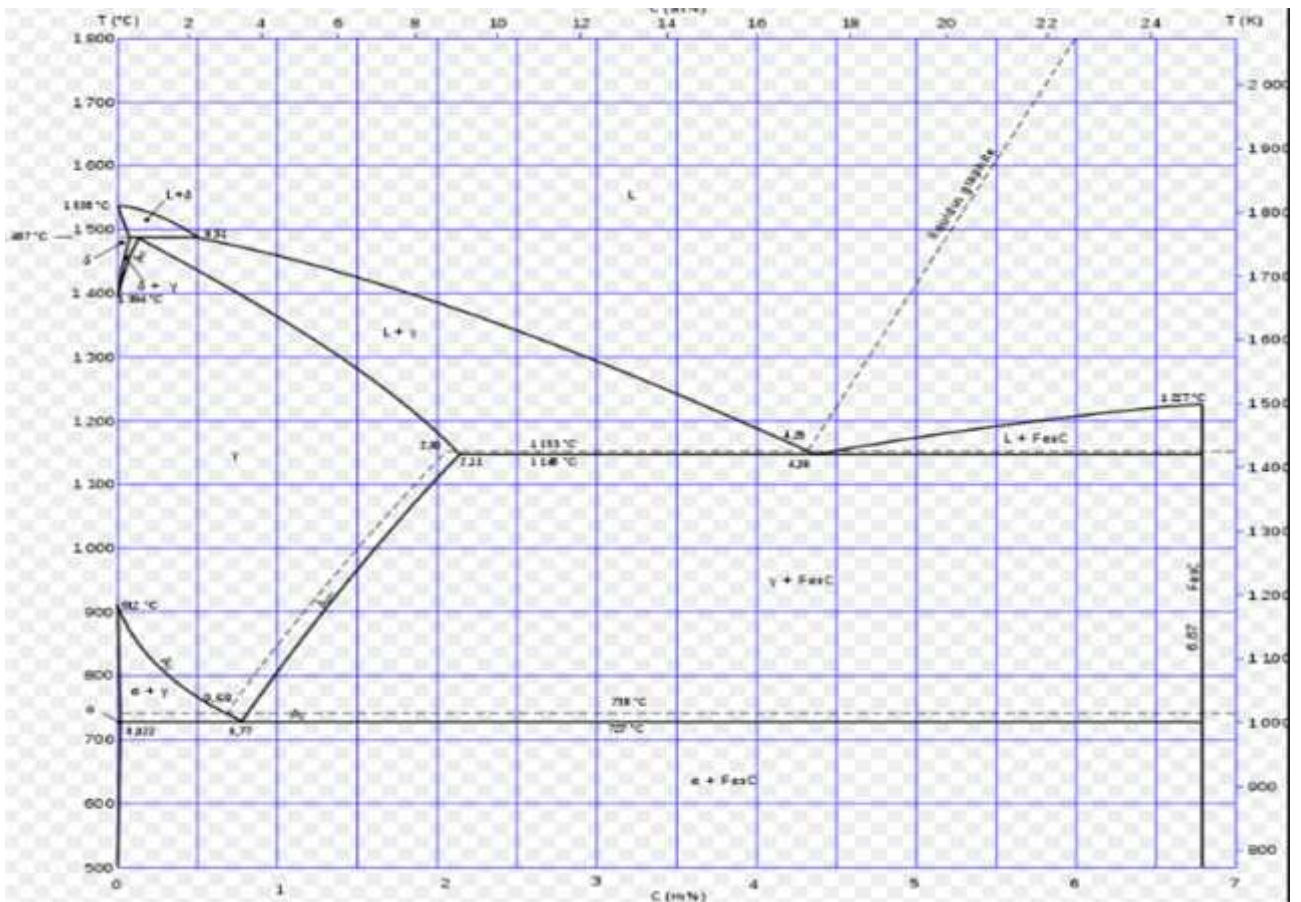
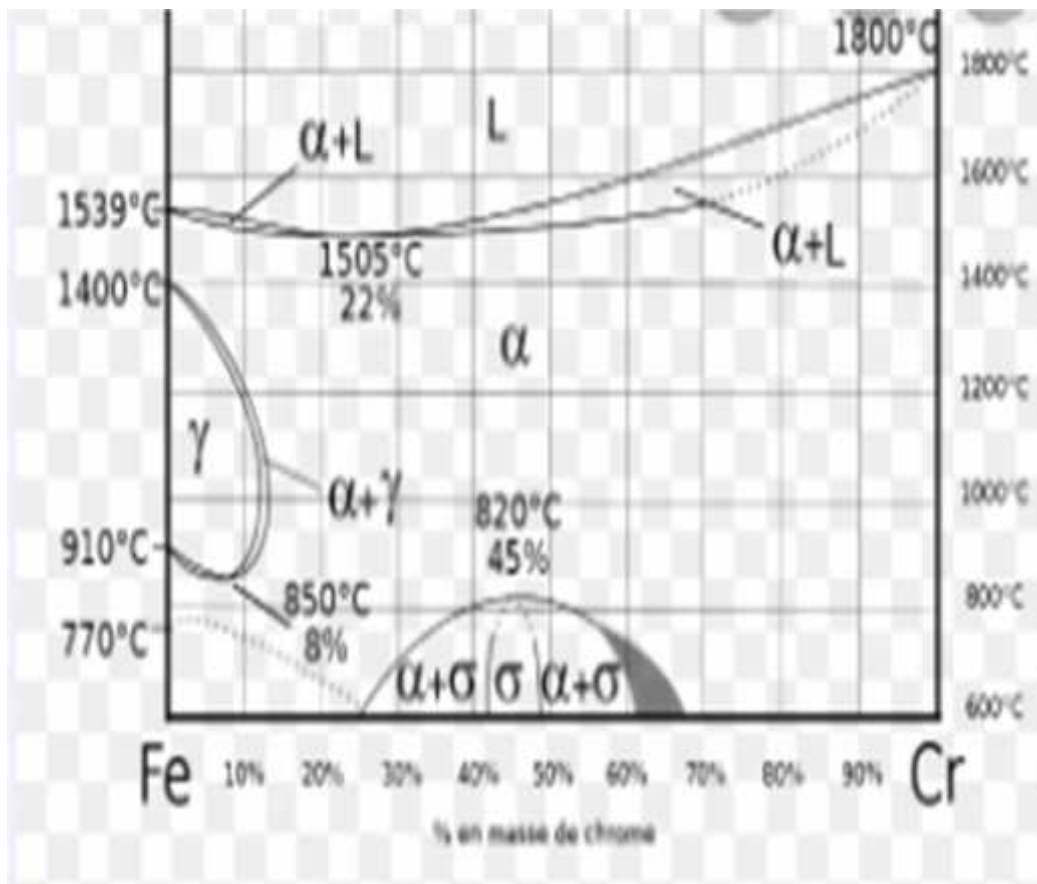


Figure 5 : Diagramme fer-carbone Diagramme fer-carbone à cémentite (trait plein) et à graphite (traits pointillés)



**I-5-2-Diagramme fer-chrome :[10]**

Certains éléments d’alliages, et leurs proportions, peuvent modifier le diagramme d’équilibre fer-carbone. Certains éléments comme le chrome, tendent à favoriser la cristallisation en phase (élément alphasène). Comme le montre le diagramme fer chrome (figure ...), sur lequel le domaine est très étendu. Le domaine est donc réduit à une zone fermée appelée « boucle ».



**Figure 6 :** Diagramme d’équilibre fer-chrome

D’après le diagramme fer-carbone on peut définir deux régions de teneur en chrome :

- chrome < 13% / ces alliages sont austénites et peuvent subir la transformation de l’austénite vers ferrite par refroidissement lent ou rapide.
- chrome > 13% : ces alliages sont toujours ferritiques et ne peuvent pas subir de durcissement par trempe martensitique.

Pour les températures en dessous 820°C et pour les teneurs déterminées en chrome, il y a possibilité d’apparition d’une phase intermédiaire dite phase fragilisant.

**I-6- caractéristique métallographiques :[4]**

**a- Bainite** : constituant de trempe, structure en aiguilles de ferrite+cémentite, dure et facile à usiner.

**b- Cémentite  $Fe_3C$**  : c'est le composant principal des fontes à maille orthorhombique elle est très dure (750HB), cassante ( $R_m = 700N/mm^2, A = 0\%$ ). Confère une bonne tenue à l'érosion et à l'abrasion. contient environ 6.7%C.

**c- Martensite** : constituant de trempe composé de carbone en insertion saturée dans le fer, très dure (800Hv) et fragile.

**d- Perlite** : alliage de fer et de carbone à 0.83% de carbone et qui a une structure lamellaire ou globulaire de ferrite+cémentite. elle est très dure (200HB), tenace ( $R_m = 850N/mm^2$ ), ductile ( $A\% = 10\%$ ). Facile à usiner, bonne résistance aux efforts statique et à l'usure par frottements.

**e- Troostite** : constituant obtenu par trempe douce, c.-à-d. pour une vitesse de refroidissement inférieure à la vitesse critique de trempe.

**) Propriétés :**

La résistance à la traction de la perlite est supérieure à celle de la ferrite.

-**Allongement** :  $A\%(\text{ferrite}) = 5 * A\%(\text{perlite})$  – la cémentite ne s'allonge pas.

-**Dureté** :  $HB(\text{cémentite}) = 10 * HB(\text{ferrite}) = 3.5 * HB(\text{perlite})$ .

**II-Les fontes alliées au chrome:**

Les fontes au chrome sont largement sollicitées dans divers domaines industriels pour leurs facultés de résister à une usure importante. On les rencontre dans les industries minières, cimentières, sidérurgiques et de nombreuses autres. Ces fontes se solidifient selon le diagramme FeCr-C. Leur solidification débute par la précipitation d'austénite primaire pour les compositions hypoeutectiques ou par des carbures primaires lorsque la fonte est hypereutectique. Cette solidification se termine par la transformation eutectique qui donne lieu à un agrégat d'austénite eutectique et de carbures eutectiques du type  $M_7C_3$ . Les carbures eutectiques apparaissent dans la microstructure sous forme de réseau dont les branches sont interconnectées et qui sont maintenues par la matrice. Cette dernière, selon la destination de la fonte, peut être austénitique ou martensitique ; ses propriétés sont très influencées par le type et le taux d'éléments d'alliage. En

cours de service, ces fontes sont sujettes à de multiples sollicitations qui induisent une usure et donc une perte de matière influençant leur durée de vie. Pour y remédier, les chercheurs ont recouru à l'introduction d'éléments d'alliages fortement carburigènes tels que le titane, le vanadium et d'autres. Ces éléments favorisent la formation de carbures proeutectiques dans les fontes hypoeutectiques. Ils se forment avant l'austénite primaire et permettent un affinement des grains. Cette propriété entraîne une amélioration des caractéristiques de la matrice et lui permet de bien soutenir les carbures en cours de service. Le présent travail traite de l'effet du niobium sur le comportement à l'usure d'une fonte au chrome. L'approche consiste à faire varier la teneur en niobium entre 0,5 et 3 % et à voir par la suite son effet sur la résistance à l'abrasion et au frottement. À partir de ce travail, on détermine aussi l'effet qu'apportera le niobium sur la variation de la microstructure.[7]

## **- Fonte à haute teneur en chrome :**

On réserve la désignation de « fontes alliées » ou « fontes spéciales » à l'ensemble des fontes contenant d'autres éléments, dits d'addition, tels que le nickel, le chrome, le cuivre, l'aluminium, le molybdène, le titane, le vanadium etc... ou à une proportion volontairement accrue au cours d'une refusions , et pour des emplois spéciaux définis, de l'un des composants normaux : silicium et manganèse.

On remarque que certaines fontes ordinaires contiennent des traces d'un ou de plusieurs éléments « spéciaux », parce que ces éléments sont présents dans les minerais employés, en proportion très faible. Leur présence dans la fonte n'apporte en général aucune modification sensible aux caractéristiques de ces fontes, à leur structure, à leurs conditions d'emploi, et qu'elle est par conséquent négligeable.

Outre leurs caractères alphagènes et gammagènes et leur action sur la trempabilité, valables pour tous les alliages ferreux, les éléments introduits dans les fontes sont caractérisés par leurs actions graphitisantes (Al, C, Cu, Ni, Si,...) ou anti-graphitisantes (Cr, Mo, Mn, S, V, W, B,...).

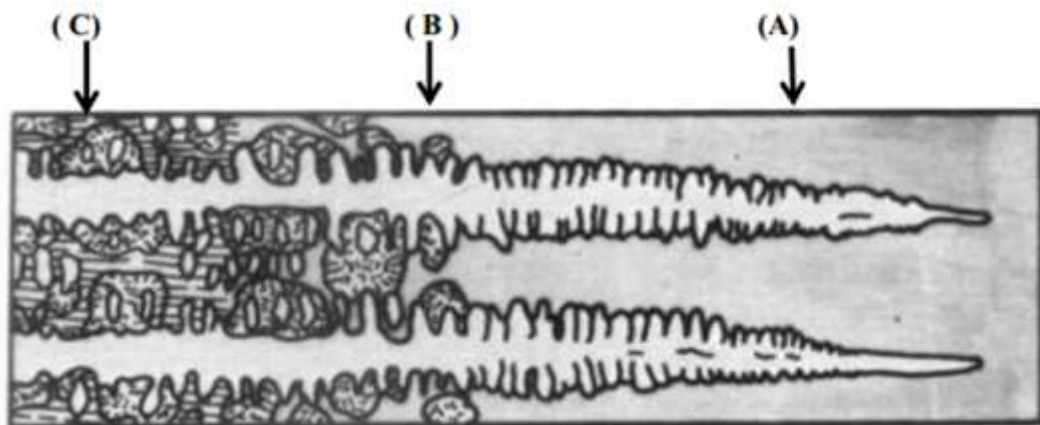
Les éléments d'alliages essentiels dans les fontes sont : Cr, Cu, Ni, Mo, Al, Ti, Nb et Mg. Ces éléments influent sensiblement sur la formation de la structure.[6]

## **II-2-Solidification des fontes à haute teneur en chrome :**

La solidification des fontes au chrome dépend du fait qu'elles soient hypoeutectiques, eutectiques ou hypereutectiques. Elle se fait selon le diagramme d'équilibre Fe-Cr-C. Des phases

primaires (austénite primaire si la fonte est hypoeutectique ou carbure  $M_7C_3$  primaire si la fonte est hypereutectique) sont celles qui se forment en premier. Avec la diminution de la température, le mélange s'enrichit en austénite ou en carbure jusqu'à la transformation eutectique où le liquide restant se transforme en un agrégat constitué d'austénite eutectique et de carbures eutectiques de type  $M_7C_3$ .

La solidification des fontes au chrome a été traitée par plusieurs auteurs. Des fontes alliées à plusieurs éléments fortement carburigènes ont été développées en vue de répondre aux besoins des secteurs de broyage et de concassage. Le niobium, le vanadium, le molybdène et le titane ont été les éléments les plus couramment utilisés en vue d'obtenir des carbures durs de type MC,  $M_2C$ ,  $M_{23}C_6$  et  $M_7C_3$ . Ces travaux ont déterminé, en fonction de la composition des fontes, des éléments d'alliages utilisés, du mode de refroidissement et aussi du type de traitement thermique utilisés, les phases microstructurales formées et leurs proportions. Les principaux éléments de la fonte au chrome sont le fer, le chrome et le carbone. La solidification est généralement expliquée en faisant référence à ce système ternaire.



**Figure 7 :** Vue schématique d'un échantillon en forme de barreau solidifié unidirectionnellement et trempé [9]

La figure I.10 représente une schématisation d'une microstructure d'un échantillon en fonte au chrome alliée au vanadium solidifiée unidirectionnellement. La cristallisation débute par la formation de dendrites d'austénite (partie A), se poursuit par des cellules eutectiques constituées de carbure de vanadium et d'austénite (partie B) et le liquide restant se solidifie en un eutectique ( $M_7C_3$  - austénite) (partie C).

### III- Domaine d'utilisation des fontes :

Les fontes blanches à haute teneur en chrome présentent une grande variété de structures et de propriétés physiques, mécanique et surtout chimiques. la principale propriété de ces fontes est leur

excellente résistance à l'usure. Ce qui leur donne une durée de vie importante dans la très grande majorité des milieux.

En raison de leur résistance à l'usure et leurs excellentes propriétés mécaniques, les fontes à haute teneur en chrome sont utilisées dans les domaines suivants :

A. Industrie lourde : fabriquer des tubes de récupérateurs, des barreaux de concasseurs et des plateaux pour fours de frittage, galets d'écrasement, plaque de blindage.

B. Eléments de machines-outils, boulets de broyage, battoires.

C. Industrie chimique et pétrolière : pièces de pompes pour matériaux abrasifs, piste pour broyeur à billes, pièces mécanique devant résister à l'abrasion et les plaques des pompes centrifuges.

### **III-1-boulets de broyage : [10]**

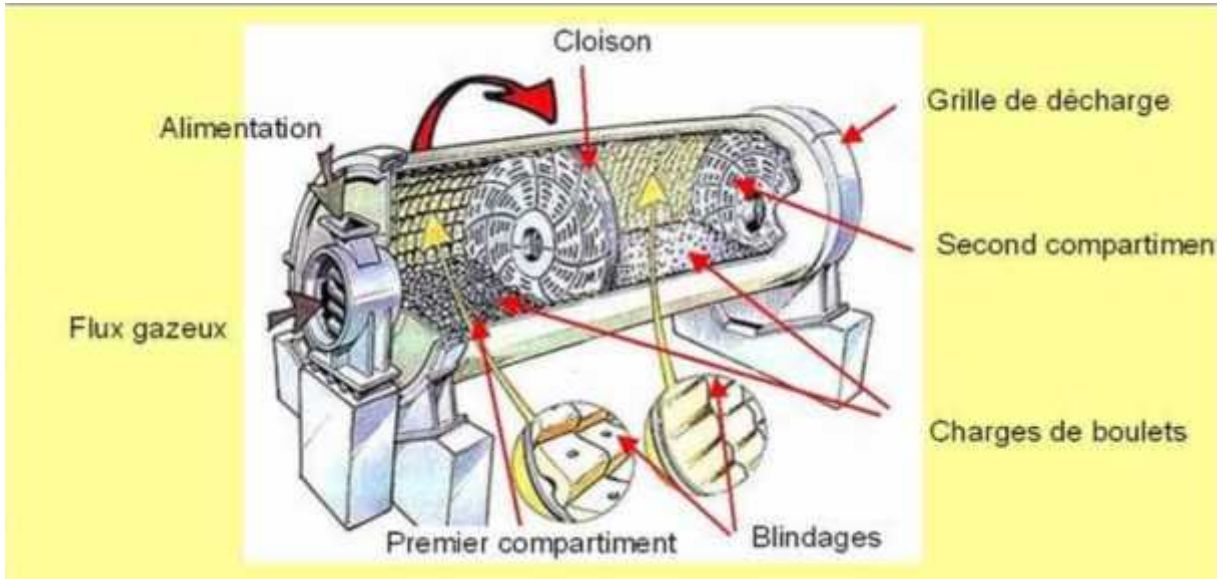
Le boulet de broyage est une pièce maîtresse dans les industries de ciment,est utilisé pour transformer la roche en fines dont le calibre est inférieur au millimètre (dimension moyenne sont de 15 microns).

Cette pièce (boulet) est soumise à l'action des produits abrasifs tels que la roche et la blindage du broyeur ainsi que les boulets entre eux-mêmes, ce qui provoque son usure et voire même la casse.

Elle doit répondre aux exigences suivantes :

- Très bonne résistance aux frottements.
- Très bonne résistance à l'abrasion.
- Très bonne résistance aux chocs.

Le critère important est la durée de vie utile de boulet de broyage (capacité du boulet à résister aux pertes de masse provoquer par abrasion).La durée de vie peut être limité par l'aptitude de boulet de broyage à supporter, sans rupture, les chocs mécaniques répétés.si les chocs mécaniques ne jouent pas un rôle important, la durée de vie de boulet dépend de sa capacité à la résistance à l'action des produits abrasifs avec un minimum de perte de métal.



**Figure 8 :** optimisation d’atelier de broyage ciment.

### III-2-propriétés mécanique des boulets de broyage : [11][12][13]

#### III-2-1-La dureté :

La dureté est la caractéristique qui est mesurée le plus couramment car la mesure est faite au moyen d’un essai simple, rapide, peu coûteux et non destructif, et la plupart des propriétés intéressantes de la fonte sont en relation directe avec sa dureté(cette relation n’est pas constante).

La dureté permet d’apprécier les difficultés d’usinage et de vérifier l’évolution des transformations structurales d’une pièce lors des traitements thermiques mais, en aucun cas, elle ne peut être utilisée lorsqu’il s’agit de comparer entre elles des fontes de nuances différentes.

La dureté subit l’influence du mode d’élaboration et de solidification de la fonte au chrome – molybdène, aussi bien que celle de sa composition .En effet, chacun de ces facteurs exerce une influence sur la microstructure .Les carbures durs qui se forment dans les fontes blanches au chrome-molybdène et la matrice austénitique qui peut se transformer en matrice martensitique que traitement thermique augmentent dureté et la résistance à l’usure.

D’une façon générale, la résistance à l’usure s’améliore lorsque la dureté augmente .Cependant, une meilleure corrélation existe entre la microstructure de la fonte et la résistance à l’usure.

L'essai de dureté utilisé dans l'ensemble de nos essais est celui de Rockwell, (HRC). Il nécessite que l'on prépare correctement la surface d'appui et la surface semis à l'essai du boulet de manière que les mesures puissent être faites avec précision et d'utiliser la moyenne de plusieurs valeurs pour chaque épaisseur.

La dureté élevée des boulets à l'état brut de coulée et après traitement thermique les rend inusinables par les procédés d'usinage courants sauf par meulage, ou au moyen d'outils spéciaux à plaquettes de carbure revêtues de nitrure.

### **III-2-2- Résistance à l'usure :**

L'usure se définit comme étant la perte de matière provoquée par la désintégration mécanique ou physique (érosion due à la cavitation) d'une surface ou contact d'une autre par suite du mouvement relatif de l'une par rapport à l'autre. L'usure dépend plus des conditions imposées en service que des propriétés des métaux en contact.

Ces conditions dans lesquelles l'usure se produit en service sont très diverses et même lorsqu'on les connaît elles ne peuvent être définies avec une très grande précision. Ainsi, la température, les vitesses relatives du mouvement, les forces de pression normale aux surfaces de frottement, l'incidence des vibrations, la nature de la lubrification et la nature des alliages en contact peuvent varier et se combiner entre elles de diverses manières et poser des problèmes très complexes. Ainsi, il est très difficile de réaliser une évaluation exacte des conditions de service à partir de laquelle le choix du matériau doit être fait de manière à réduire l'usure au minimum. En conséquence, il est d'une pratique courante de se fier, pour évaluer les matériaux aux résultats obtenus en service réel.

Les essais d'usure normalisés sont parfois utilisés comme guides dans les choix des matériaux. On n'a pas constaté de corrélation précise entre la résistance à l'usure et l'une quelconque des caractéristiques mécaniques mais dans la plupart des cas la résistance à l'usure des fontes augmente avec la dureté et une fonte de grande dureté résiste beaucoup mieux à l'usure et risque moins de se gripper en présence de particules abrasives car il s'oppose à leur pénétration dans sa couche superficielle.

Les fontes blanches chrome-molybdène présentent une excellente résistance à l'usure par abrasion par suite de la présence de carbures très durs dans leur microstructure. La matrice martensitique de ces fontes a aussi une influence sur la résistance à l'usure.

### **III-2-3- Résistance aux chocs :**

La résistance aux chocs se mesure par l'essai de résilience, il a pour but de mesurer l'énergie absorbée au cours de la rupture d'une éprouvette du type Charpy. La résistance aux chocs est généralement en corrélation avec la résistance à la traction. Elle est influencée de façon notable par la composition chimique. L'épaisseur influe sur la résilience en général la résistance au choc diminue lorsque l'épaisseur augmente.

Les fontes blanches au chrome-molybdène offrent une bonne résistance aux chocs que l'on ne peut pas trouver dans les autres fontes blanches. Ils sont de plus en plus, utilisés dans l'industrie minière (boulets et broyage).

Dans les cas où les chocs mécaniques répétés ne posent pas des problèmes majeurs, les pièces en fontes blanches au chrome-molybdène peuvent être utilisées dans l'état brut de coulée.

Dans le cas d'un choc mécanique important conduisant à des ruptures par fatigue, les meilleures performances sont obtenues avec une matrice martensite revenu dont le but est de décomposer l'austénite résiduelle, d'adoucir la martensite et de relâcher les contraintes résiduelles pour enfin obtenir la résistance aux chocs maximale. Ce type de traitement est préférable plutôt qu'une augmentation de la teneur en carbone qui induit une augmentation de la fragilité.

#### **IV-Traitement thermique des fontes :**

Les traitements thermiques agissent sur la matrice en modifiant la nature des constituants et parfois même en transformant profondément la structure.

Les divers résultats pratiques que l'on peut viser par traitements thermiques de la matrice des fontes sont les suivants :

- Accroître et uniformiser la propriété technologique appelée usinabilité dont on cherche actuellement à normaliser la mesure.
- Pour homogénéiser la dureté et les caractéristiques mécaniques et pour élever les valeurs de la résistance à la traction (R) et la dureté (HB), on effectue alors une trempe martensitique de la matrice suivie le plus tôt possible d'un revenu ;
- Pour éliminer les contraintes internes qui étant susceptibles de provoquer des ruptures en service, on effectue un revenu de détente.

Si l'on considère l'ensemble des fontes de toute nature, on constate que les différents traitements thermiques qui leur sont éventuellement appliqués reposent sur des bases métallurgiques communes. Ces traitements sont utiles pour stabiliser les dimensions des moulages et pour homogénéiser les structures ; ils sont nécessaires pour accroître les propriétés d'utilisation des



pièces soumises, dans leur ensemble, à de fortes sollicitations mécaniques, ou à des propriétés superficielles particulières.

Les fontes sont constituées par une matrice (analogue à un acier mais à teneur variable en carbone) dans laquelle se trouvent toujours des particules de graphite ou de carbures en proportion parfois importante (jusqu'à environ 50 % en volume) et ayant en majeure partie pour origine les eutectiques stable ou métastable dérivés des systèmes fer-carbone.

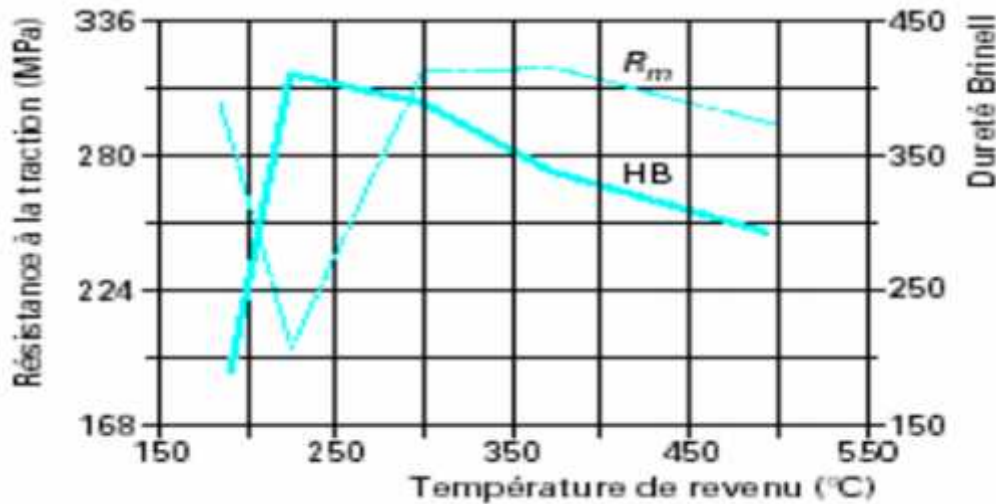
La matrice, qui peut être ferritique, perlitique, austénitique, martensitique, bainitique, etc., est modifiable par traitement thermique, compte tenu de sa composition chimique, suivant les mêmes principes qu'un acier : trempe, revenu, recuit, etc. il convient toutefois de souligner le rôle important joué par le graphite ou les carbures au cours des transformations de la matrice des fontes .

- Le graphite et les carbures sont des réserves de carbone qui permettent à la matrice de se saturer par dissolution et diffusion en tendant vers l'état d'équilibre prévu par les diagrammes ,notamment en phase austénitique au cours d'un maintien au-dessus du point de transformation  $Ac_3$  (il suffit parfois de quelques minutes pour que cet effet soit appréciable) ,

Enfin, les carbures et le graphite lamellaire rendent les fontes plus fragiles au choc thermique que les aciers, ce qui exclut généralement les traitements trop brusques, tels que les trempes à l'eau [8].

## **IV-1- Trempe et revenu**

La trempe et le revenu des fontes n'ont pas seulement pour but de régler la dureté mais visent plutôt à établir le meilleur compromis entre l'usinabilité, la résistance à l'usure et les caractéristiques mécaniques (résistance, résilience, plasticité) de pièces hautement sollicitées statiquement ou dynamiquement. Pour le traitement des fontes à graphite lamellaire ou blanches, on évite en général la trempe à l'eau et même à l'huile (sauf forme des pièces favorable à l'égalisation très rapide des températures) en raison des risques de tapures. En revanche, les fontes à graphite sphéroïdal et les fontes malléables peuvent être ainsi couramment améliorées pour atteindre de hautes performances (résistance à la traction de 800 à 1000 MPa).Le revenu achève la décomposition de l'austénite résiduelle, transforme plus ou moins les constituants aciculaires en les adoucissant, permet la relaxation des contraintes de coulée et de trempe ainsi que la stabilisation dimensionnelle. Le graphite et les carbures libres ne jouent pas alors de rôle notable (sauf dans certaines fontes alliées).La résistance est d'autant plus élevée et l'allongement à la rupture d'autant plus faible que la température du second palier est plus élevée et la température de revenu plus basse. Bien entendu, on peut aussi jouer sur la durée de revenu (1 à 6 h par exemple)[6].



**Figure 9:** Dureté et résistance à la traction d'une fonte modérément alliée trempée et revenue[6].

#### IV-2- Traitement des fontes à haute teneur en chrome

En dehors du traitement de relaxation des contraintes résiduelles de moulage à une température limitée supérieurement par les risques de transformation structurale, on peut appliquer les traitements de durcissement par trempe, d'adoucissement et d'amélioration de la tenue aux chocs

##### a. Durcissement par trempe

Pour les nuances contenant de 12 à 26 % de chrome, on obtient une structure à prédominance martensitique par un conditionnement de l'austénite à température élevée (de l'ordre de 1000°C avec maintien prolongé) suivi d'un refroidissement rapide, le plus souvent réalisé par ventilation, par gaz forcé ou par pulvérisation d'un brouillard. La trempe à l'huile étant réservée aux pièces de forme simple [6].

##### b. Adoucissement

L'adoucissement a pour but de permettre ou de faciliter l'usinage avant un traitement de durcissement ultérieur. Après une lente mise en température entre 920 et 975°C, on forme des structures à prédominance perlitique par un refroidissement dans le four, contrôlé, entre 800 et 600°C, suivi d'un refroidissement à l'air [6].

##### c. Amélioration de la tenue aux chocs

Le revenu peut être nécessaire pour transformer l'austénite résiduelle en martensite, celle-ci est ainsi adoucie et les contraintes résiduelles sont relaxées.

La température de revenu peut être comprise entre 200 et 550°C avec un chauffage lent et un refroidissement à l'air [6].

## V-Effet du traitement thermique : [9]

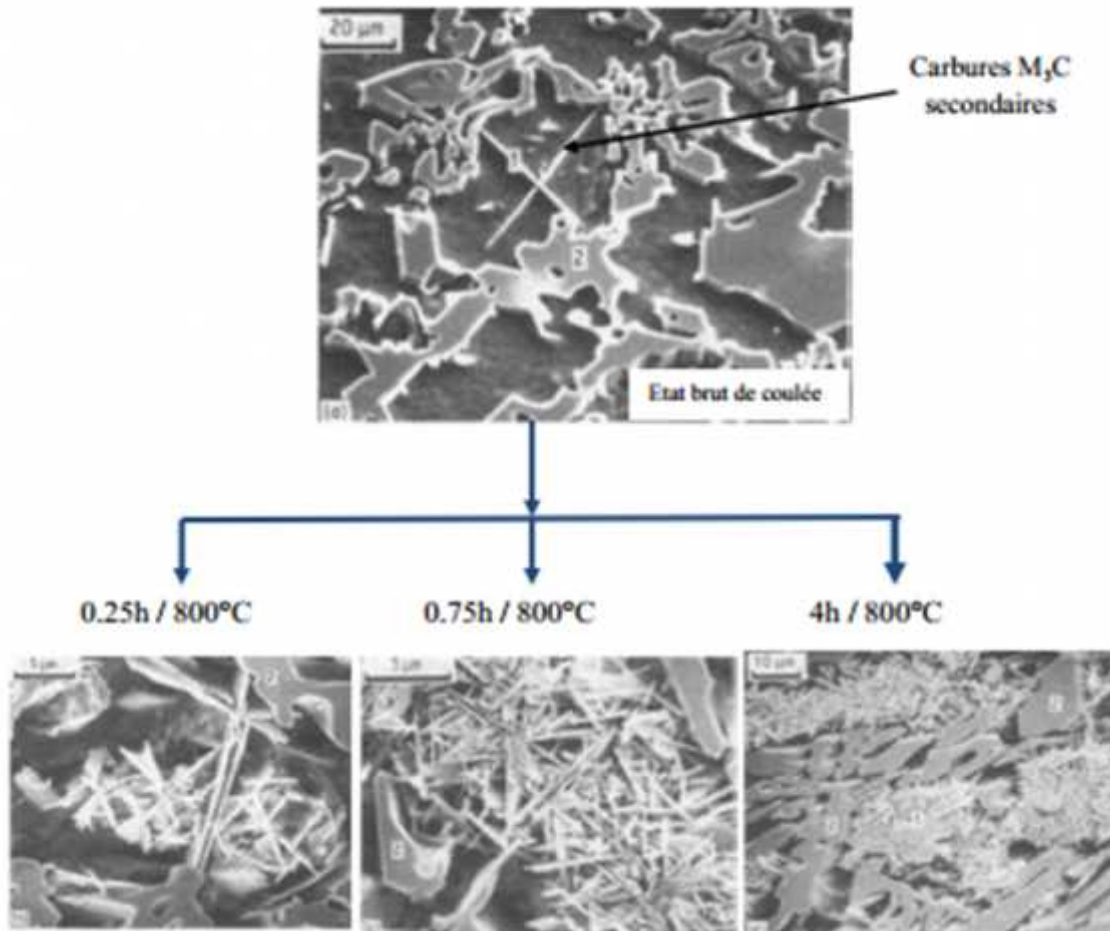
L'effet du traitement thermique des fontes au chrome a fait l'objet de plusieurs travaux. Les fontes au chrome n'atteignent leur plus grande résistance à l'usure qu'après un traitement thermique généralement effectué entre 900 et 1050°C avec un refroidissement à l'air libre ou à l'air soufflé. Les fontes au chrome alliées nécessitent un cycle de traitement thermique approprié.

La teneur en carbone conditionne la température de traitement. Au fur et à mesure que la teneur en carbone est élevée, la température d'austénitisation doit être aussi élevée afin de permettre une dissolution efficace des éléments d'alliage. L'effet des éléments d'alliage sur la transformation structurale est remarquable.

La résistance à l'usure est affectée non seulement par le type, la morphologie des carbures eutectiques mais aussi par la structure de la matrice. La précipitation des carbures secondaires réduit la proportion d'éléments d'alliage et principalement la teneur en carbone et en chrome dans la matrice. Elle déstabilise l'austénite, qui se transforme en martensite. Le temps de maintien joue aussi un rôle efficace quant à la proportion de carbures secondaires précipités. Ces derniers contribuent à l'amélioration de la résistance à l'usure induite par leur dureté élevée. La température ainsi que le temps de maintien ont un effet sur les dimensions des carbures secondaires.

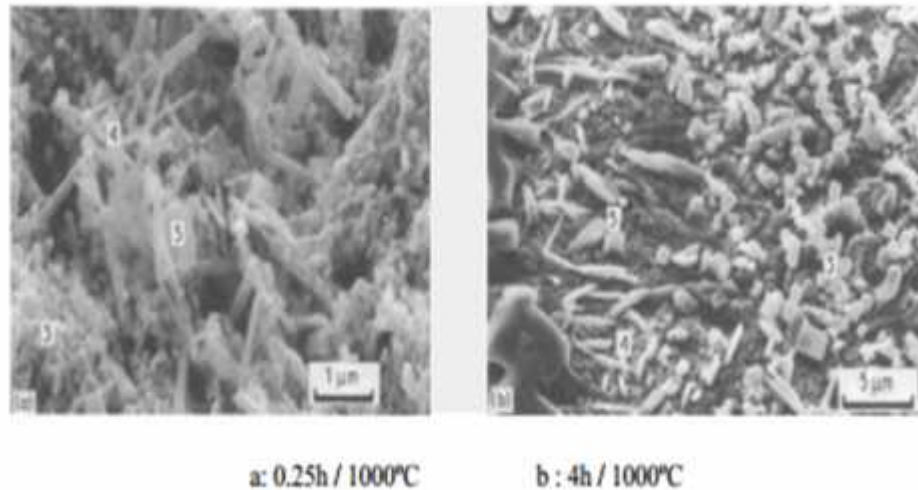
Le temps de maintien joue également un rôle important dans la précipitation secondaire. Son augmentation assure une précipitation significative des carbures secondaires et une amélioration des propriétés mécaniques. Ces derniers sont moins nombreux mais plus grossiers pour les plus fortes températures et nombreux pour les faibles températures et durées de maintien.

Après un maintien de un quart d'heure à 800°C, une précipitation remarquable de carbures M<sub>3</sub>C a lieu et s'est accentuée avec l'augmentation du temps de maintien (figure 1.10.b, c et d). Ces auteurs ont montré que la variation du temps de maintien n'influence que le taux de précipitation par contre la morphologie demeure inchangée.

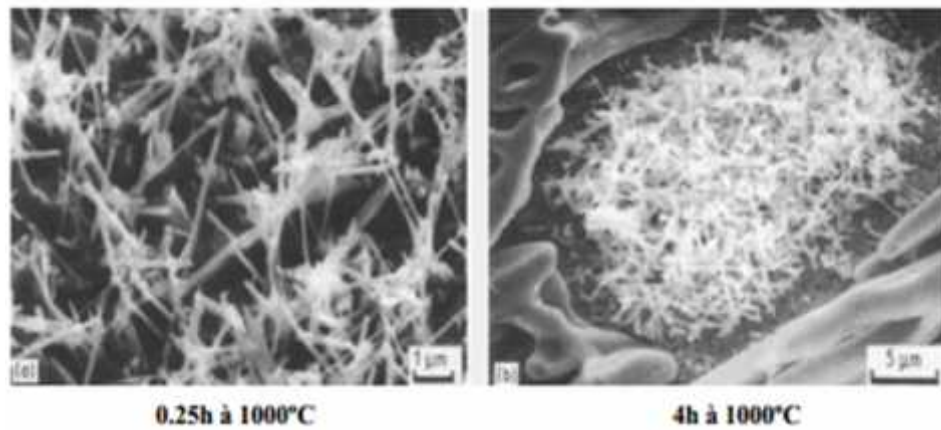


**Figure 10 :** Micrographie MEB montrant les Séquence de nucléation et de croissance des carbures secondaires  $M_3C$  d'une fonte blanche contenant 8,8%Cr 3%C et 6% N a : à l'état brut de coulée, b et c après traitement thermique à différent temps de maintien[9]

A 29,3%Cr, 2,5%C et à 0,1%Ni, une précipitation de carbures secondaires de type  $M_{23}C_6$  sous forme de fibres très fines connectées a eu lieu. L'augmentation du temps de maintien de 0,25h à 4h a provoqué une intensification de la précipitation de ces carbures (figure 10). Leur taux est tributaire de la composition de l'austénite primaire et aussi de la durée du temps de maintien.

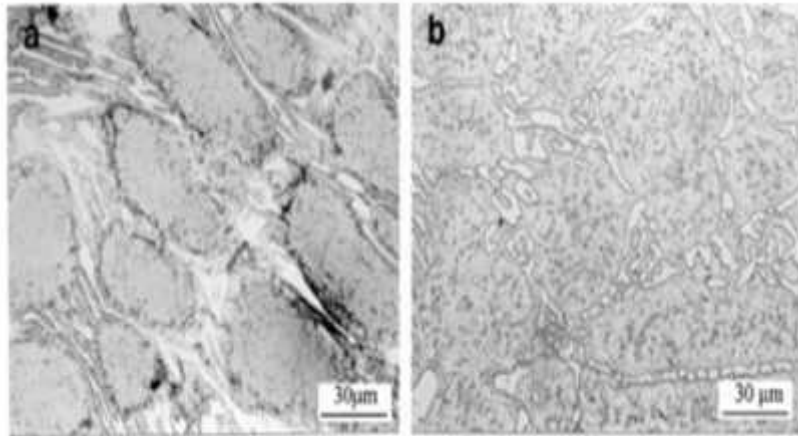


**Figure 11:** Micrographies MEB de carbures secondaires M7C3 à différents temps de maintien[9]



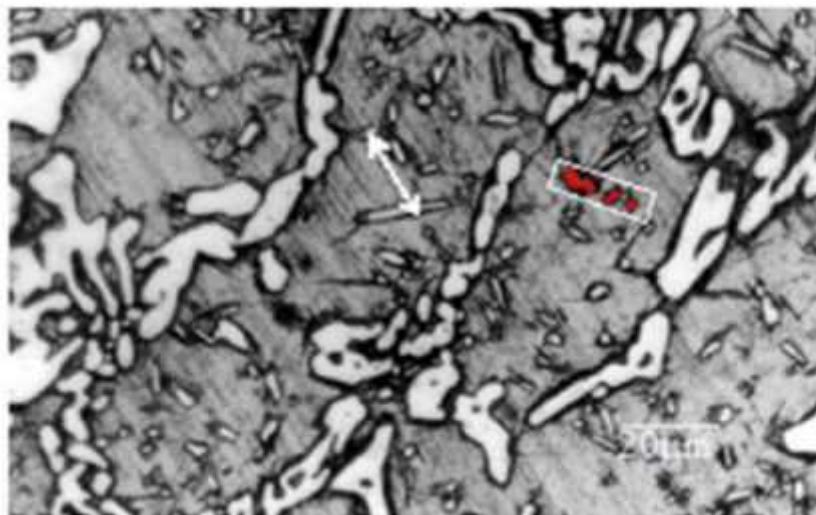
**Figure 12 :** Micrographies MEB de carbures secondaires M23C6 à différents temps de maintien[9]

M.-X. Zhang et al. ont étudié l'effet du traitement thermique sur les propriétés d'une fonte blanche avec différents taux de carbone (1,89 -1,72)% et de chrome (14,6 et 21)%. Ces chercheurs ont montré qu'une précipitation secondaire accrue est obtenue après une austénitisation à 1130°C, un maintien de 4h et un refroidissement à l'air (figure 12).[9]



**Figure 13 :** Micrographie optique d’une fonte au chrome traitée. a : Etat brut de coulée, b : après un traitement à 1130°C/ et un maintien de 4h.[9]

A. Kootsookos et al. ont observé une précipitation de carbures secondaires de différentes morphologies dans une fonte à 18,85% Cr et 1,87% C, traitée à 1125 °C, maintenue à quatre heures et revenue à 200°C (figure 13)[9]



**Figure 14 :**Micrographie MEB d’une fonte à haute teneur en chrome traitée[9]

L'effet du traitement thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques des fontes au chrome hypereutectiques contenant 17 % Cr, 4 % C, 1,5 % Ti a fait l'objet d'une recherche par Qiang LIU[9].

Les échantillons de cette fonte ont été traités thermiquement aux températures de 900° C, 1000° C et 1050° C pendant 2 h et 6 h, puis refroidis à l'air jusqu'à la température ambiante. A l'issu de cette recherche, les auteurs ont noté une précipitation accrue de carbures M7C3 très fins dans la matrice pour les plus faibles températures de traitement et temps de maintien. Par contre, un taux élevé de carbures M7C3 secondaires plus gros a été obtenu pour les fortes températures de traitement et long temps de maintien.

Ces auteurs ont suggéré que la température de 900°C est la plus appropriée pour une précipitation secondaire fine. D'un autre côté, ces derniers ont observé que la résistance à l'usure augmente avec l'augmentation du temps de maintien grâce à l'amélioration de la ténacité de la matrice.

Par contre, la dureté diminue avec l'augmentation du temps de maintien suite à la croissance des carbures secondaires. Dans cette recherche, les auteurs ont constaté une augmentation de la résistance à l'usure et de la dureté dans le cas de faible température de traitement.

Ceci a été justifié par la présence et l'effet des carbures secondaires fins dans la matrice martensitique. Le traitement thermique améliore ainsi le comportement à l'usure des fontes au chrome et assure une transformation de l'austénite en martensite. Un meilleur comportement à l'usure est obtenu par le biais de température de traitement thermique appropriée assurant un taux élevé de précipitations secondaires et d'austénite résiduelle.

## **Conclusion générale**



### Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'étude en a un but de déterminer les caractérisations d'une fonte fortement alliée au chrome qui nous permet de fabriquer des pièces qui sollicité à des forces lourds dans l'industrie minière et avoir une pièce qui à une bonne résistance à l'usure tels que les boulets de broyage, les mâchoires et les battoires .

les fontes blanches à fort teneur en chrome sont moins couteuses .Elles sont produites industriellement pour la fabrication des pièces d'épaisseur moyenne et elles peuvent mieux résister au choc mécanique que la fonte martensitiques mais elles s'usent plus rapidement. lorsque ces fontes ne contient que du chrome comme élément d'alliage, elles doivent leurs caractéristiques de résistance à l'abrasion aux carbure de fer et de chrome . la nature de ces carbures varie en fonction de rapport Cr/C .Ces fontes doivent subir un traitement thermique pour permettre l'obtention d'une matrice martensitique.

la principale propriété de ces fontes est leur excellente résistance à l'usure. Ce qui leur donne une durée de vie importante dans la très grande majorité des milieux. En raison de leur résistance à l'usure et leurs excellentes propriétés mécaniques, les fontes à haute teneur en chrome sont utilisées dans les domaines suivants : Industrie lourde , Eléments de machines-outils, boulets de broyage et Industrie chimique et pétrolière.

Le traitement de transformation de l'austénite consiste en premier lieu à maintenir les pièces à des températures élevées (950°C, 1000°C et 1050°C) suivi d'un refroidissement assez rapide avec la trempe . Le revenu consiste au chauffage des échantillons à des température déterminée, puis les refroidir dans le four jusqu'à la température ambiante.

## Références bibliographiques

- 1- G. Beranger, G. Sanz. livre de l'acier , Ed. soliac , 1996.
- 2- C. Chaussin et Hilly « Métallurgie, alliages métalliques » Tome 1, édition DUNOD, Montréal, 1976.
- 3- J. Paul bailon, J. Marie dorlot. "Des matériaux", 3eme édition 2000-2001.
- 4-Dupeux Michel Aide-mémoire science des matériaux / édition dunode /france.
- 5-Michel colombe et coll /matériaux métalliques/2eme édition dunod /france.
- 6- Maouche Hichem / Etude de l'influence des éléments carburigènes sur la structure et les propriétés des fontes au chrome/mémoire de magistère / U. ANNABA/2005
- 7- Beldjoudi badis / influence des traitement thermiques de revenus sur les propriétés mécaniques d'une fontes fortement alliée au chrome /2016-2017/université de béjaia.
- 8- Iset Kasserine / livre matériaux métallique/france .
- 9- Bouhamla Khédidja / Etude de l'influence de la composition chimique sur la formation de la structure et la tenue à l'usure des fontes au chrome/thèse doctorat / /2015/ université badji mokhetar – Annaba .
- 10- C.chaussin et G.hilly, Métallurgie ,Tome I , alliages métallique, BORDAS , 1976.

## ***Le résumé***

La modification des propriétés mécaniques de la fonte mélangée au chrome métallique se fait par plusieurs méthodes, y compris la modification de la composition chimique au moyen d'un traitement thermique ou d'un traitement mécanique. L'objectif de cette étude est d'obtenir une fonte répondant aux normes internationales et aux exigences du marché.

Cette recherche bibliographique porte sur les propriétés mécaniques de la fonte fortement mélangée au chrome utilisé dans l'industrie minière, et nous mentionnons des généralités sur la fonte et ses différents types, son domaine d'utilisation et le traitement thermique de cette fonte. Nous parlons également de sa résistance à la corrosion et la dureté .

## ***Abstract***

The modification of the mechanical properties of cast iron mixed with metallic chromium is done by several methods, including the modification of the chemical composition by means of heat treatment or mechanical treatment. The objective of this study is to obtain a cast iron meeting international standards and market requirements.

This bibliographical research concerns the mechanical properties of cast iron strongly mixed with chromium used in the mining industry, and we mention generalities on cast iron and its different types, its field of use and the heat treatment of this cast iron. We are also talking about its corrosion resistance and hardness.

ان تغيير الخصائص الميكانيكية لحديد الزهر الممزوج بمعدن الكروم يتم بواسطة عدة طرق و من بينها تغيير التركيب الكيميائي بواسطة معالجة حرارية او معالجة ميكانيكية . والهدف من هذه الدراسة هو الحصول على حديد زهر يطابق المعايير الدولية وتلبية متطلبات السوق

يتعلق هذا البحث الببليوغرافي بالخصائص الميكانيكية لحديد الزهر المخلوط بقوة بالكروم المستخدم في صناعة التعدين ، و نذك العموميات على الحديد الزهر وأنواعه المختلفة ، ومجال استخدامه والمعالجة الحرارية لهذا الحديد الزهر. وكذلك نتحدث عن قوة مقاومته للتآكل وصلابته...