

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université IBN KHALDOUN Tiaret



Faculté des sciences appliquées
Département Génie Mécanique
Construction Mécanique

Mémoire de fin d'études
Master

Influence des traitements thermiques sur la dureté d'une fonte alliée destinée à la fabrication des boulets de broyage

Présenté(e) par : MM

- DOB Arsalene
- BELAOUDMOU A.mokhtar

Encadré(e) par : Mr. A. SASSI

Membres du jury : MM

ABED Belgacem	MCA	UIK Tiaret Président
MOLGADA Abdelmadjid	MCA	UIK Tiaret Examineur
SASSI Ahmed	MCA	UIK Tiaret Encadreur

Juillet 2019

Dédicace

Je dédié ce modeste mémoire à
Mes parents qui m'ont soutenu le long de ma vie,
Mon cher frère Lotfi et sa femme Wahiba,
Ma sœur Rania et son mari Abdellah
Ma sœur Jouhaina
Mes belles nièces Miral, Ritel et Lina
Tous mes amis et mes copains d université

Remerciement

Nous tenons à remercier Dieu, le tout puissant pour l'aide et le courage qu'il nous a donné pour surmonter toutes les difficultés durant les années d'études et de nous avoir aidé à élaborer ce modeste mémoire.

Nous remercions particulièrement Mr. Sassi A. de nous avoir encadré tout au long de notre travail, ainsi que tous les enseignants du département de génie mécanique.

Nos remerciements vont également aux membres du jury qui a accepter de juger ce travail

Nous remercions tous les travailleurs de ALFET et en particulier Mr.Werti chef technique et, Mr Zidouri pour les explications et les documents qu'ils ont mis à notre disposition pendant la durée du stage.

Nous remercions toutes les personnes qui ont participé de loin ou de près à l'élaboration de ce travail.

Résumé

Les fontes blanches fortement alliées au chrome sont utilisées pour la fabrication des boulets de broyage dont la réalisation est effectuée dans le procédé de moulage en sable.

Les produits obtenus, pour résister à certaines sollicitations mécaniques telles que la résistance à l'abrasion et le choc, doivent passer nécessairement par un certain nombre de traitements thermiques qui ont fait l'objet de ce travail.

La dureté qui est l'une des propriétés mécaniques la plus demandée a été traitée ce qui montre que c'est un paramètre non négligeable afin d'améliorer les durées de service de ces produits.

Abstract

White smelts strongly alloyed with chromium are used for the manufacture of grinding balls which is carried out in the sand molding process.

The products obtained, to withstand certain mechanical stresses such as abrasion resistance and impact, must necessarily pass through a number of heat treatments that have been the subject of this work.

The hardness which is one of the most requested mechanical properties has been treated which shows that it is a significant parameter to improve the service lives of these products.

SOMMAIRE

	Page
Introduction Générale	1

CHAPITRE I ETUDE DU DIAGRAMME FER-CARBONE

I.1 Variétés allotropique et magnétique du fer	3
I.2 Les différentes phases du système Fer-Carbone	4
I.3 Diagramme d'équilibre Fer-Carbone	5
I.3.1 Diagramme stable- diagramme métastable	5
I.3.2 Analyse du diagramme Fer-carbone à cémentite	5
I.3.3 Influence des éléments d'alliages	7
I.4 Étude du refroidissement du diagramme métastable Fe ₃ -C	8
I.4.1 Cas de l'acier hypoeutectoïde à 0.4%C	8
I.4.2 Acier hypereutectoïdes 1. 2%C	9
I.4.3 Acier eutectoïde à 0.77%C	10
I.5 Transformation dans les fontes	10
I.5.1 Fonte hypoeutectique à 3%C	11
I.5.2 Fonte hypereutectique à 5%C	12

CHAPITRE II GENERALITES SUR LES TRAITEMENTS THERMIQUES

II.1 L'austénitisation	14
II.1.1 Chauffage	14
II.1.2 Déformations au chauffage	15
II.1.3 Maintien à la température d'austénitisation	18
II.2 Trempe	20
II.2.1 Diagrammes T.R.C (transformation-refroidissement-continue)	20
II.2.2 Diagrammes T.T.T (temps-température-transformation)	22
II.2.3 Trempabilité de l'acier	23
II.2.4 Conditions de refroidissement lors de la trempe	23
II.2.5 Trempe à l'eau	24
II.2.6 Trempe à l'huile	25
II.2.7 Trempe à gaz	26
II.2.8 Trempe au brouillard	26
II.2.9 Trempe en bain fluidisé	27
II.3 Revenu	27
II.3.1 Choix des conditions de revenu après trempe	28
II.3.2 Le revenu de détente	28

II.3.3 Le revenu usuel	29
II.3.4 Le revenu de durcissement secondaire	29
II.4 Recuit	30
II.4.1 Le recuit d'homogénéisation	30
II.4.2 Le recuit de régénération	31
II.4.3 Le recuit complet	31
II.4.4 Le recuit de détente	31
II.5 Traitement thermique des fontes	32
II.5.2 Décomposition et mise en solution des carbures eutectiques	33
II.5.3 Saturation et homogénéisation de l'austénite	33
II.5.4 Austénitisation	34
II.5.5 Transformation isotherme	34

CHAPITRE .III

FABRICATION DES BOULETS DE BROYAGE

III.1 Introduction	36
III.2 Composition chimique du produit	36
III.3 Description du broyeur à boulets	37
III.3.1 Fonte blanche	38
III.4 Fabrication des boulets	38
III.4.1 Appareils de fusion	38
III.4.1.1 Fours à induction de 5 tonnes	38
III.4.1.2 Caractéristique d'équipement	38
III.4.1.3 La charge métallique	38
III.4.1.4 Traitements du métal liquide	39
III.4.1.5 Décrassage	39
III.4.1.6 Manutention du métal liquide	39
III.4.2 Moulage en sable	40
III.4.2.1 Le Moulage Mécanique	42
III.4.2.2 Atelier moulage	42
III.4.2.3 Caractéristique de procédé	43
III.4.2.4 Caractéristique d'équipement	43
III.4.2.5 Procédé de moulage	43
III.4.3 Traitement thermique des boulets de concassage	44

CHAPITRE .IV

ETUDE EXPERIMENTALE ET RESULTATS

IV.1 Les techniques expérimentales	48
IV.1.1 Les boulets utilisés pour les essais	48
IV.1.2 Analyses chimiques	48
IV.1.3 Essais de dureté	49
IV.1.4 Etude métallographique	50
IV.2 Résultats des essais réalisés sur les boulets de broyage	50
IV.2.1 Analyse de la composition chimique	50

IV.2.2 Résultats des essais de dureté	51
IV.2.2.1 A l'état brut de coulée	51
IV.2.2.2 Après traitements thermiques	51
IV.2.2.3 Influence de la température de trempe sur la dureté	52
IV.2.2.4 L'influence de la vitesse de refroidissement sur la dureté	53
IV.2.2.5 L'influence de la température de revenu sur la dureté	55

Introduction générale

Introduction générale

Le boulet de broyage est une pièce maîtresse dans les industries du ciment, il est utilisé pour transformer la roche en fines particules dont le calibre est inférieur au millimètre.

Cette pièce (boulet) subit des usures très fréquentes voire même la casse. Elle est soumise à l'action des produits abrasifs tels que la roche et le blindage du broyeur ainsi que les boulets entre eux-mêmes.

Elle doit répondre aux exigences suivantes :

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

Dans cette optique, les fontes blanches alliées sont les matériaux de choix pour la réalisation de ces pièces. Par suite du coût des éléments d'alliages et des conditions de leur production ainsi que les difficultés accrues dans l'élaboration des fontes spéciales qui nécessitent d'une part un équipement particulier souvent des fours électrique permettant un contrôle précis de la composition et de la température et d'autre part une grande maîtrise des processus de fabrication.

L'entreprise nationale de fonderie de TIARET n'a pas connu de progrès remarquable dans l'élaboration de ces compositions et dans l'emploi de pièces en fontes spéciales. Par contre, elle a surtout concentrée ses moyens techniques et personnels dans l'amélioration de la qualité des pièces en agissant sur leur constitution et sur leur structure par traitement thermique de certaines fontes afin d'assurer une utilisation aussi économique que possible des éléments d'alliages et d'obtenir une meilleure efficacité dans la fabrication des produits.

Grâce à son importance, le traitement thermique des fontes blanches alliées doit être bien compris et bien dominé. Différents facteurs (température de chauffage, temps de maintien, milieu de refroidissement, vitesse de refroidissement, ...etc.) influencent cette technique.

L'application incorrecte des traitements thermiques aux fontes blanches alliées peut donner lieu à une dégradation des caractéristiques mécaniques qui peuvent avoir des valeurs inférieures à celles obtenues à l'état brut de coulée.

La plupart des études ont porté sur le comportement de l'usure par abrasion, mais peu sur l'influence de différents facteurs sur la microstructure et les propriétés mécaniques des fontes blanches alliées, le but de ce travail consiste à connaître l'influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques en l'occurrence la dureté fonte hautement alliée au chrome utilisée dans la fabrication des boulets de broyage.

Introduction générale

Notre travail comporte quatre chapitres. Le premier porte sur l'étude du diagramme fer-carbone qui revêt une importance capitale dans ce genre d'étude.

Le deuxième chapitre présente les généralités sur les traitements thermiques (acier-fonte)

Le troisième chapitre illustre la fabrication des boulets de broyage, définition du produit, description du broyeur à boulets, les traitements thermiques appropriés les techniques expérimentales utilisées.

Le dernier chapitre est consacré aux techniques expérimentales utilisées , les résultats obtenus ainsi que leurs leurs interprétations.

Introduction

Les fontes sont des alliages Fer-Carbone, Ils s'agissent d'alliages contenant entre 2,11 et 6,67 % de carbone. Contrairement aux aciers, on ne peut pas obtenir d'austénitisation complète à haute température ; lors d'une coulée, il se forme de la cémentite ou du graphite, nous le verrons plus tard la solidification complète. Le terme « fonte » est parfois utilisé pour désigner des objets moulés, comme par exemple dans l'expression « fonte d'aluminium » (en général de l'alpax). Il s'agit d'un abus de langage. La fabrication de la fonte a été décrite au chapitre concernant l'élaboration de l'acier. La fonte est une étape intermédiaire dans la fabrication de l'acier à partir du minerai, on parle alors de fonte brute « pig iron » ou fonte de première fusion. Une partie de cette fonte peut être coulée spécifiquement pour être utilisée en tant que telle, on parle alors de fonte élaborée « castiron » ou de fonte de seconde fusion. On peut synthétiser de la fonte élaborée par fusion d'acier non allié et de graphite [1].

I.1 Variétés allotropique et magnétique du fer

Le Fer existe sous deux variétés allotropiques différentes, c'est-à-dire avec deux formes cristallines : CC et CFC.

- À des basses températures et jusqu'à 912°C , ses atomes sont disposés suivant un réseau cubique centré (CC) : On l'appelle alors Fer α . Le fer α ne dissout pratiquement pas le carbone : 0.02%C au maximum à 723°C , moins de 0.01%C à 300°C .
- À des températures supérieures à 912°C et jusqu'à 1394°C le réseau cristallin est du type cubique à faces centrées (CFC) : on l'appelle Fer γ . Le fer γ dissout facilement le carbone : 0.8%C à 723°C , 2.14%C à 1147°C .
- Au-dessus de 1394°C et jusqu'au point de fusion à 1538°C , le fer retrouve la structure cubique centrée du Fer α : On l'appelle alors Fer δ . Il dissout un peu mieux le carbone que le Fer α (0.07%C au maximum à 1493°C).
- Jusqu'à 768°C point de Curie, le fer est ferromagnétique, au-delà il devient paramagnétique. Le caractère ferromagnétique se dit d'une substance qui peut prendre une forte aimantation [2].

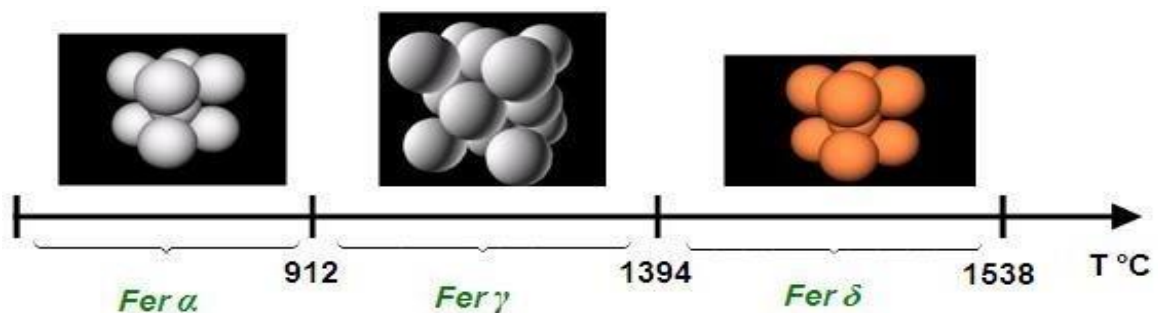


Fig. I.1 : Transformation allotropique du Fer [2]

Chapitre I: Etude du diagramme fer-carbone

I.2 Les différentes phases du système Fer-Carbone

I.2.1 La ferrite α

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre ($HB \approx 80$), peu tenace ($R \approx 300$ MPa), mais très ductile ($A \approx 35\%$) [2].

I.2.2 La ferrite δ

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centrée CC. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone [2].

I.2.3 L'austénite γ

Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer γ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint $\approx 2\%$ C à 1145°C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile [2].

I.2.4 La cémentite (Carbone de fer Fe_3C)

La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile [2].

I.2.5 La perlite

Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8%C, La perlite est dure ($HB \approx 200$), résistante ($R_m \approx 850$ MPa) et assez ductile ($A \% \approx 10$) [2].

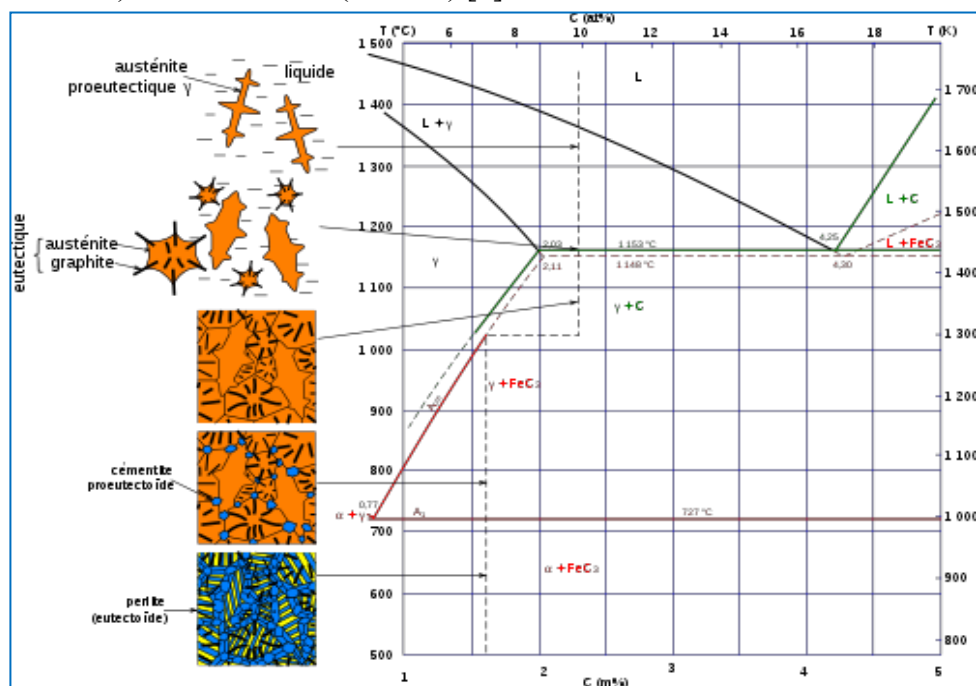


Fig. I.2 : Illustration schématique des principaux constituants des systèmes Fe₃-C [2]

I.3 Diagramme d'équilibre Fer-Carbone

I.3.1 Diagramme stable-diagramme métastable

L'étude dans les conditions d'équilibre des alliages Fe₃-C, montre qu'ils subissent deux types d'évolution :

- La première produit une phase riche en carbone de formule Fe₃C appelé carbone de fer ou cémentite. Le diagramme correspondant est dit métastable ou à cémentite.
- La deuxième forme une phase riche en carbone qui reste à l'état de graphite pur Cgr, qui a une miscibilité nulle avec le fer. Le diagramme correspondant est dit stable ou à graphite. Son obtention exige la décomposition du carbone Fe₃C en refroidissant avec une vitesse très lente et en ajoutant un catalyseur à grande pouvoir de graphitisation tel que le silicium [2].

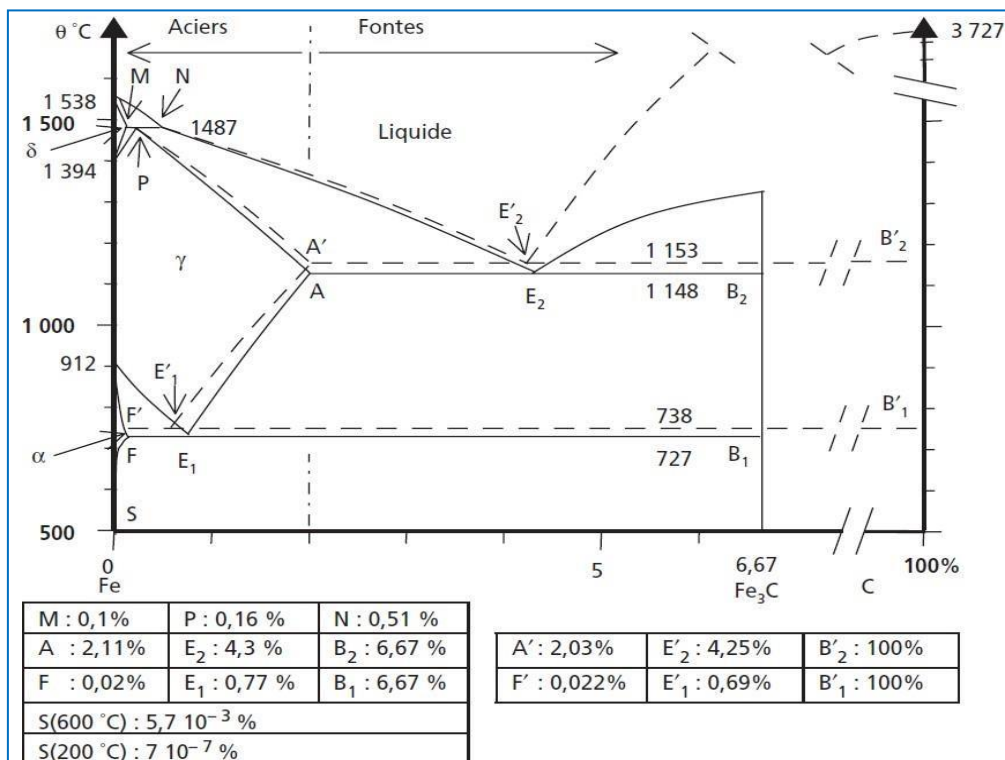


Fig. I.3 : Diagrammes Fe₃-C pour les aciers et les fontes. En pointillés: diagramme stable Fe₃-C. En traits pleins: diagramme métastable Fe-Fe₃C [2]

I.3.2 Analyse du diagramme Fer-carbone à cémentite

Le diagramme d'équilibre Fer-carbone est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il est limité à droite par la cémentite Fe₃C (6.67%C) et fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : les aciers (entre 0.008%C et 2%C) et les fontes (de 2%C à 6.67%C) [2].

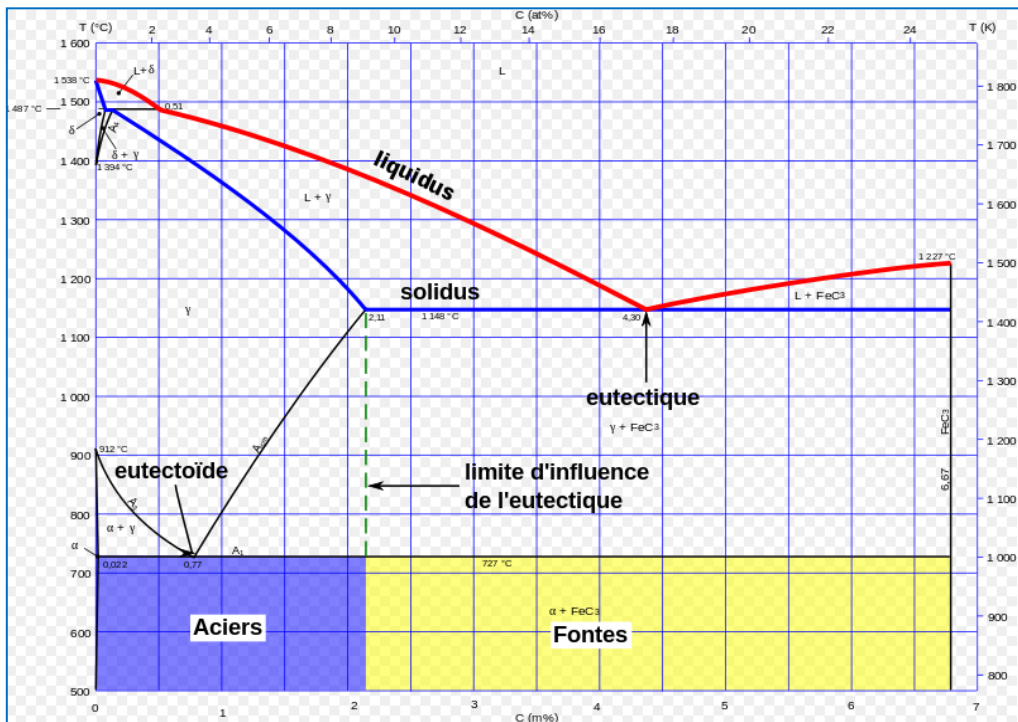


Fig. I.4 : Diagramme métastable Fe₃-C

a. Courbes

- **A_{cm}**: indique la fin de la dissolution après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.
- **A₀**: (210°C) précise la température de la transformation magnétique de la cémentite.
- **A₁** : précise la fin de la transformation au refroidissement de l'austénite. L'austénite n'existe plus au-dessous de cette ligne.
- **A₂** : (point de Curie ≈ 768°C) précise la température de la perte de magnétisme du Fe α . en générale ce point ne figure pas sur le diagramme Fe₃-C.
- **A₃**: précise la fin de la transformation au chauffage de la ferrite en austénite. La ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne.
- **A₄**: précise la fin de la transformation au chauffage de l'austénite en ferrite δ et/ou liquide. L'austénite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

On peut trouver A_{c3}, A_{c4}... pour indiquer que le point est tracé en chauffage, ou A_{r3}, A_{r4} lorsqu'il s'agit de refroidissement.

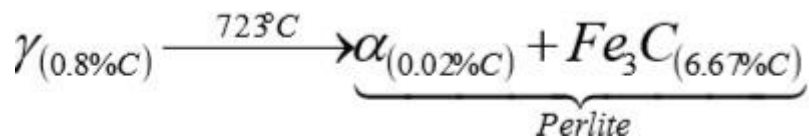
Chapitre I: Etude du diagramme fer-carbone

b. Les transformations de phases

Le diagramme Fer-carbone contient trois réactions isothermes caractérisées par des paliers : [3]

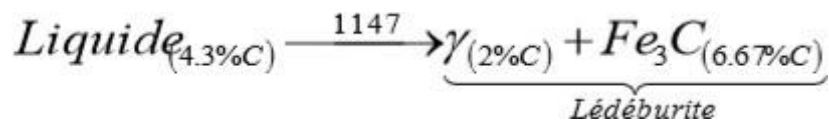
➤ Réaction eutectoïde

Un premier point remarquable doit être noté, correspondant à la teneur de 0.8%C à 723°C, ce point est dit eutectoïde ; les aciers qui contiennent moins de 0.8%C sont dits hypoeutectoïdes et ceux qui sont plus carburés hypoeutectoïdes [4].



➤ Réaction eutectique

Un deuxième point remarquable doit être noté correspondant à la teneur de 4.3% de carbone à 1147°C, ce point est dit eutectique. A la température eutectique il existe trois phases en équilibre [4].



Le liquide se solidifie, pour former les phases d'austénite et de cémentite on l'appelle le débrutie.

➤ Réaction péritectique

Un troisième point remarquable correspondant à la teneur de 0.51% de carbone à 1487°C, ce point est dit péritectique [4].



I33 Influence des éléments d'alliages

La mise en solution solide d'éléments d'alliage dans le fer modifie la position des points A₃ et A₄. Ces éléments sont classés selon leurs influences sur la position de ces points.

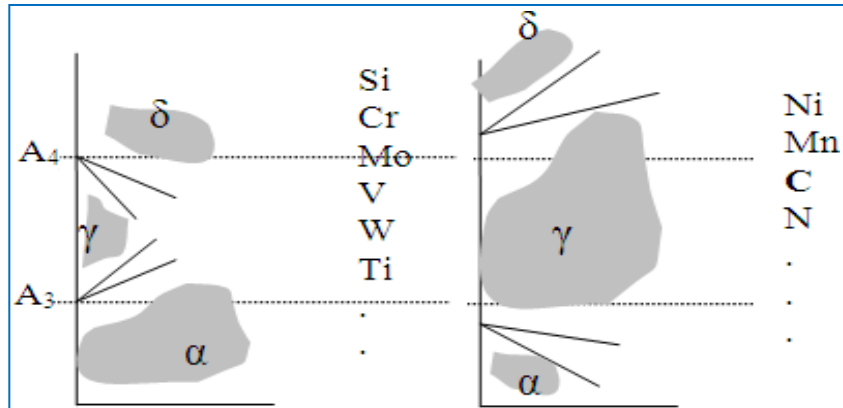


Fig. I.5 : Eléments α -gènes et γ -gènes [5]

- On appelle α -gènes tout élément qui stabilise la phase CC, il élève la température du point A_4 et abaisse celle du point A_3 .
- On appelle γ -gènes tout élément qui stabilise la phase CFC, il abaisse la température du point A_3 et élève celle du point A_4 [5].

I.4 Étude du refroidissement du diagramme métastable Fe₃-C

I41 Cas de l'acier hypoeutectoïde à 0.4%C

À T_1 : apparition des premiers cristaux de la ferrite α proeutectoïde.

À $T = 727 + \varepsilon$: les fractions massiques des différentes phases présentes sont :

$$y_{\alpha_{\text{proeutectoïde}}} = \frac{0.77 - 0.4}{0.77 - 0.02} = 0.5$$

$$y_{\gamma} = \frac{0.4 - 0.02}{0.77 - 0.02} = 0.5$$

À cette température l'austénite a une composition chimique très proche à celle de l'eutectoïde soit $\approx 0.77\%C$.

À $T = 727$: température de transformation eutectoïde, L'austénite γ subit la transformation eutectoïde pour donner naissance à la perlite. La structure finale typique des aciers hypoeutectoïdes à la température ambiante est : Ferrite proeutectoïde + perlite [6].

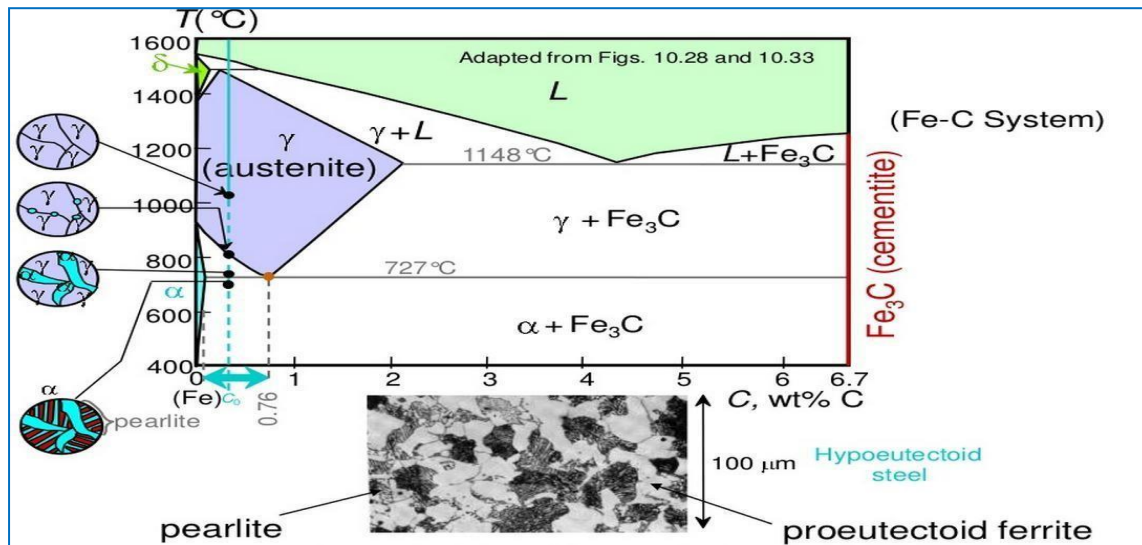


Fig I.6 : Acier hypoeutectoïde à 0.4%C

I.42 Acier hypereutectoïdes à 1.2%C

La description du refroidissement des aciers hypoeutectoïdes est semblable à ceux des aciers hypoeutectoïdes sauf que cette fois ci la phase proeutectoïde est la cémentite. La structure finale typique des aciers hypoeutectoïdes à la température ambiante est : Cémentite proeutectoïde + perlite [6].

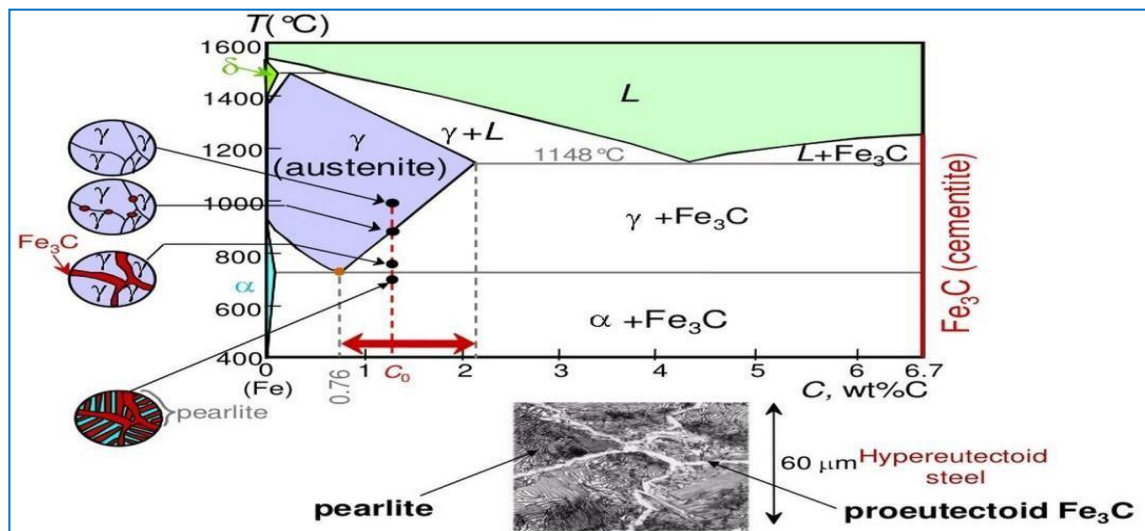


Fig. I.7 : Acier hypereutectoïde à 1.2%C

Chapitre I: Etude du diagramme fer-carbone

I.43 Acier eutectoïde à 0.77%C

La spécificité de cet acier c'est qu'il ne possède pas de phase proeutectoïde donc sa structure à la température ambiante est 100% de perlite [6].

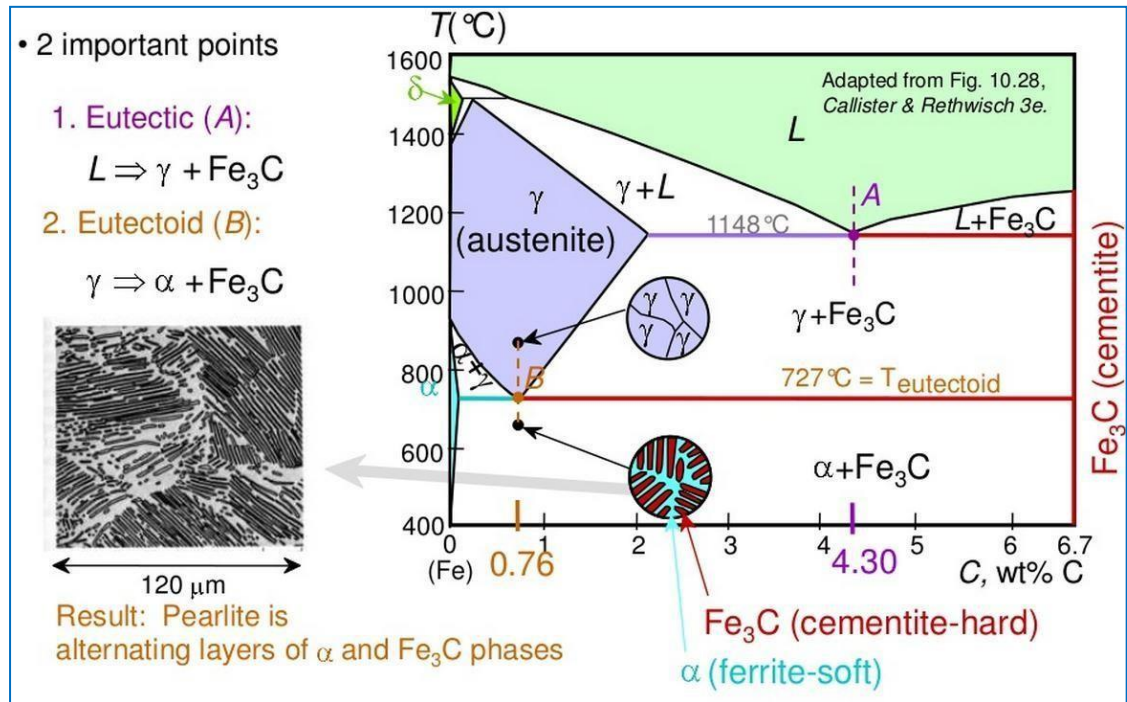


Fig. I.8 : Acier eutectoïde à 0.77%C

I.5 Transformation dans les fontes

Les fontes contiennent plus de 2 %C et toutes terminent leur solidification au palier eutectique à 1148 ou 1153°C : leur aptitude au moulage et leur nom de « fontes » proviennent de cette basse température de solidus. Ce sont des matériaux bon marché mais dans l'ensemble plus fragiles que les aciers. Comme les aciers, elles peuvent subir des traitements thermiques de trempe et revenu, et contenir des éléments d'alliages [6].

I.5.1 Fonte hypoeutectique à 3%C

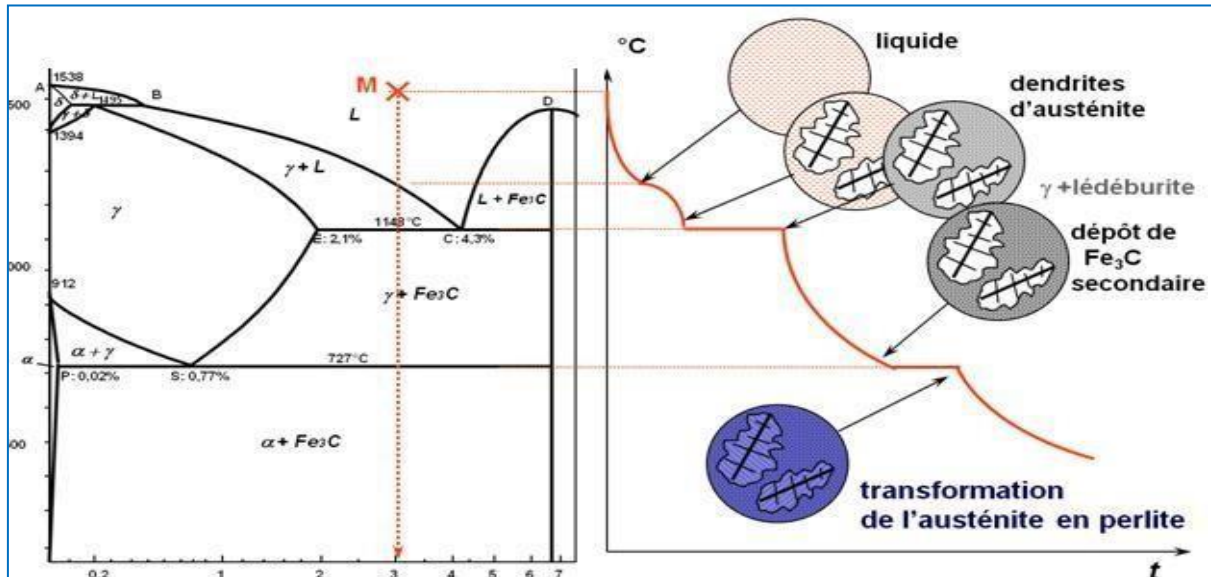


Fig. I.9 : Fonte hypoeutectique à 3%C

À **T₁** : début de solidification, il y a formation de cristaux d'austénite, en général sous forme dendritique. La température étant relativement élevée, l'homogénéisation par diffusion des phases liquides et solide est rapide.

À **T = 1148°C + ε** : l'alliage est biphasé et constitué de dendrites d'austénite à environ 2% de C et de liquide à 4,3% C. La fraction de l'austénite = $(4,3 - 3) / (4,3 - 2,1) = 0,59$

À **1148°C « température eutectique »** : Le liquide se transforme en un agrégat eutectique (lédéburite) formé d'îlots d'austénite à 2% C dans une matrice de cémentite. Les dendrites d'austénite proeutectique ne subissent aucune transformation.

En dessous de 1148°C jusqu'à 727°C : Il y a appauvrissement en C (de 0,8 %) de la phase austénite avec formation de cémentite proeutectoïde (ou secondaire).

À **T = 727°C + ε** : la fraction massique de l'austénite est de l'ordre de 0,37.

À **T = 727°C** : l'austénite va se transformer en perlite.

À **l'ambiante** : une fonte blanche hypo-eutectique est donc constituée par une matrice de cémentite (eutectique + proeutectoïde) et de blocs de perlite [6].

I52 Fonte hypereutectique à 5%C

Les transformations sont alors celles décrites pour les fontes hypo-eutectiques. Sauf que cette fois-ci la phase proeutectique est la cémentite (cémentite primaire) [6].

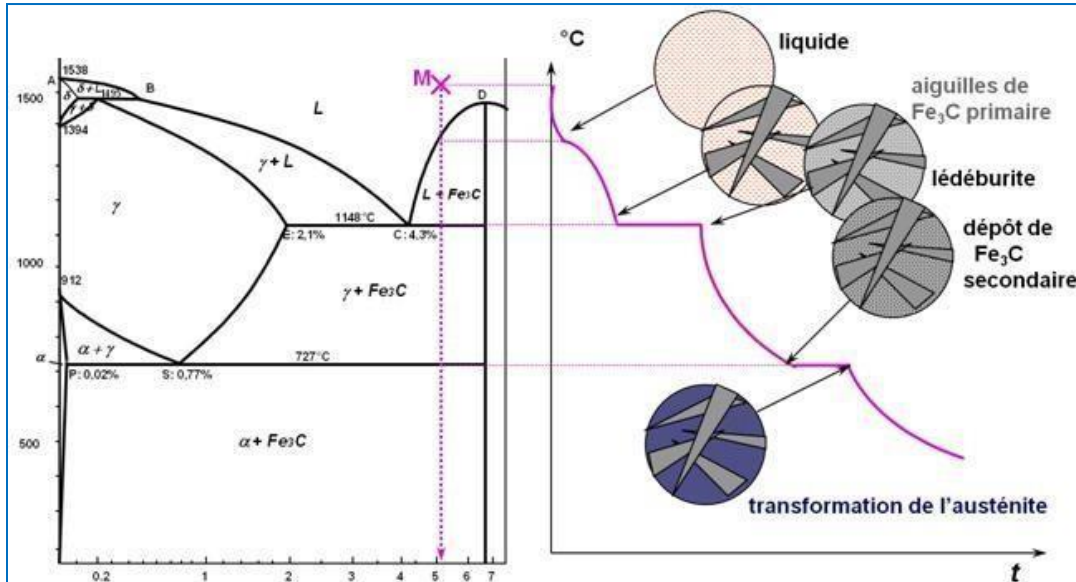


Fig. I.10 : Fonte hypereutectique à 5%C

Introduction

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but d'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e ,
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
- De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant d'être soumis à une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).
- En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité [7].

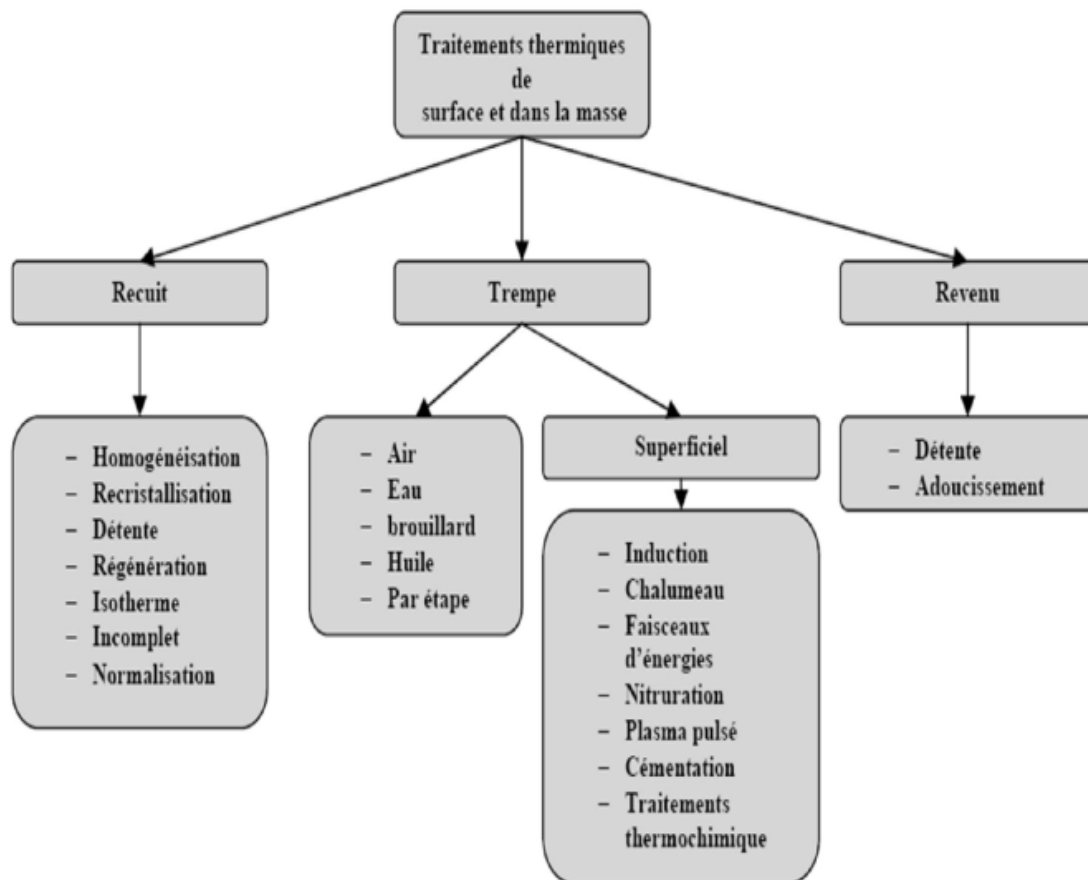


Fig.II.1 : traitement thermique[8]

II.1 l'Austénitisation

L'austénitisation a pour objet de mettre en solution le carbone et, éventuellement, les éléments d'alliage précipités sous forme de carbures. Pour ce faire, il est nécessaire de se placer dans les conditions où le carbone est soluble dans le fer c'est-à-dire de provoquer, par chauffage, la transformation du fer α en fer γ . l'examen des diagrammes d'équilibre montre que les carbures précipités après solidification ou formage à chaud peuvent être de la cémentite (dans les aciers non alliés), de la cémentite substituée (dans les aciers peu alliés) ou être formés à partir d'éléments carburigènes (dans les aciers alliés) et qu'alors leurs conditions de mise en solution sont généralement fort différentes [7].

L'austénitisation comporte deux étapes :

- un chauffage jusqu'à la température dite température d'austénitisation (et, de manière incorrecte, température de trempe) ;
- un maintien à cette température.

La température d'austénitisation doit être choisie de telle sorte qu'après le maintien, non seulement le carbone nécessaire au durcissement soit en solution mais aussi que cet élément d'alliage soit bien réparti dans l'austénite afin que puisse être acquis in fine un durcissement homogène.

Ce résultat peut être obtenu si la température d'austénitisation est supérieure à Ac_3 tout en ne s'élevant pas trop pour éviter le risque de grossissement des grains d'austénite. **La Figure II.1** montre qu'il est possible de retenir divers couples température-durée de maintien, la température pouvant être d'autant plus proche de Ac_3 que le maintien à température est plus long. Les conditions optimales sont donc définies après examen des spécificités du chauffage et du maintien [7].

II.1.1 Chauffage

Le chauffage doit permettre de porter l'ensemble de la pièce à la température d'austénitisation. Or, la chaleur étant apportée par transmission à travers sa surface, la température de cette dernière est toujours supérieure à celle du cœur, l'opération s'achevant quand, justement, la différence entre ces deux températures est devenue nulle ou tout au moins inférieure à la tolérance admise.

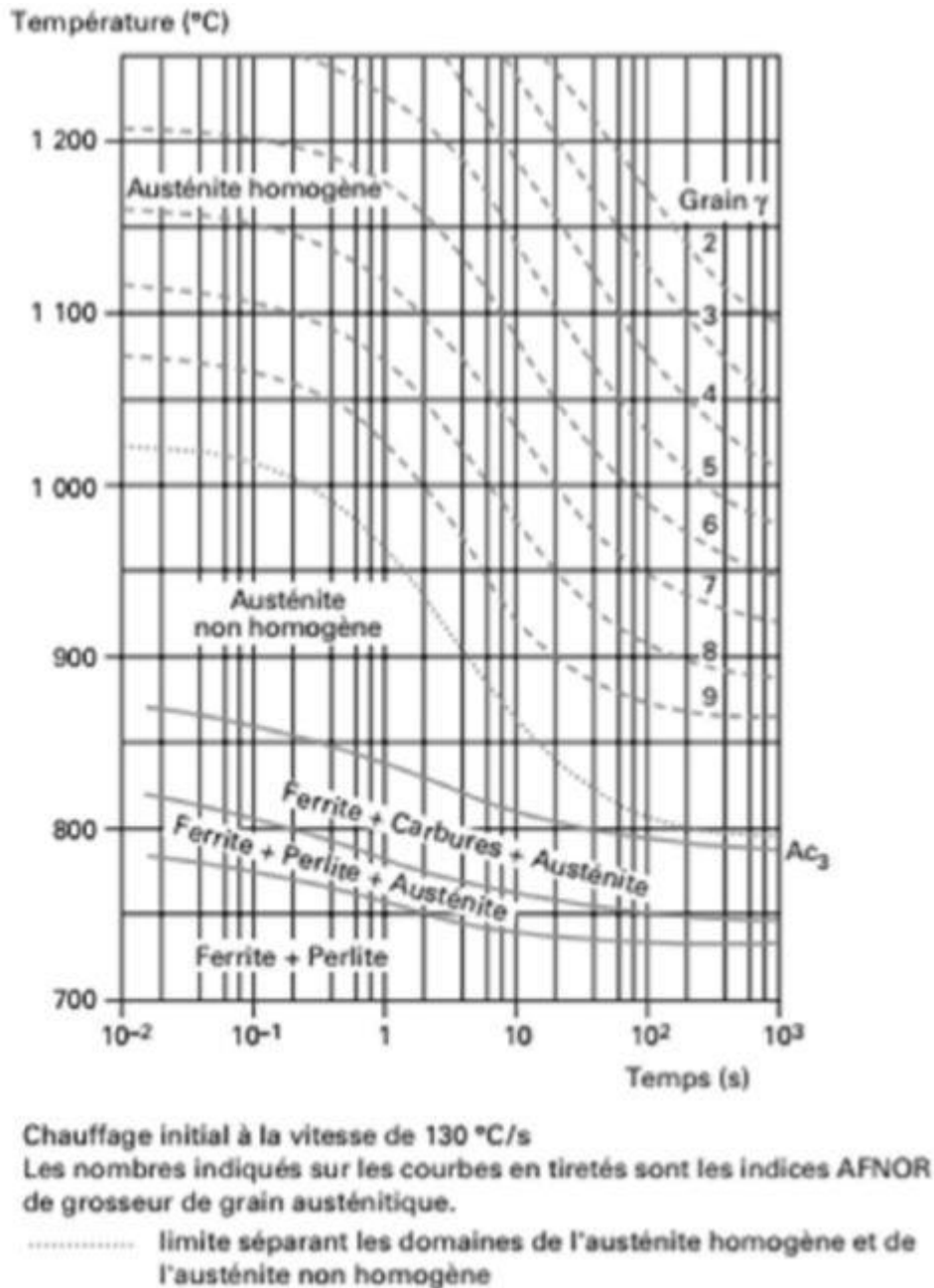


Fig. II.2 : Diagramme de transformation isotherme d'un acier 35CrMo4[7]

II.1.2 Déformations au chauffage

Pendant tout le chauffage, il existe un gradient de température entre la peau et le cœur de la pièce, gradient d'autant plus important que le chauffage est plus rapide et la pièce de plus forte section. Ce gradient crée des hétérogénéités de dilatation qui peuvent, à l'instant où elles apparaissent, engendrer soit des déformations élastiques (c'est-à-dire, dans ce cas, une mise en contrainte de l'acier), soit des déformations plastiques, suivant les propriétés de l'acier à la température correspondante. Par ailleurs la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ engendre, au moment où elle se produit, une contraction volumique importante (de l'ordre de 1 %) [8].

Chapitre II: Généralités sur les traitements thermiques

La Figure II.2 montre comment, à partir des lois de chauffage enregistrées à la peau et au cœur d'un cylindre (de 100 mm de diamètre ici) en acier à 0,25 % C, il peut mettre en évidence (à l'aide des courbes dilatométriques) les écarts de dilatation susceptibles d'apparaître lors d'un chauffage (réalisé ici par immersion dans un bain de sel porté à 1 000 °C). On constate que :

- La déformation apparaissant au début du chauffage conduit toujours (peau plus chaude que le cœur) à une mise en compression de la peau et, donc, à une mise en tension du cœur, situation qui n'engendre pas de gros risques de fissuration ;
- Lorsque la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ de la peau commence, le sens de la déformation s'inverse ; la peau est donc sollicitée en traction mais, compte tenu de sa température, elle va subir un allongement plastique ;
- La transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ du cœur provoque à nouveau une inversion du sens de la déformation ; la peau se trouve une nouvelle fois comprimée et subit donc un raccourcissement plastique. Cette dernière déformation tend à se résorber quand le gradient de température s'annule [8].

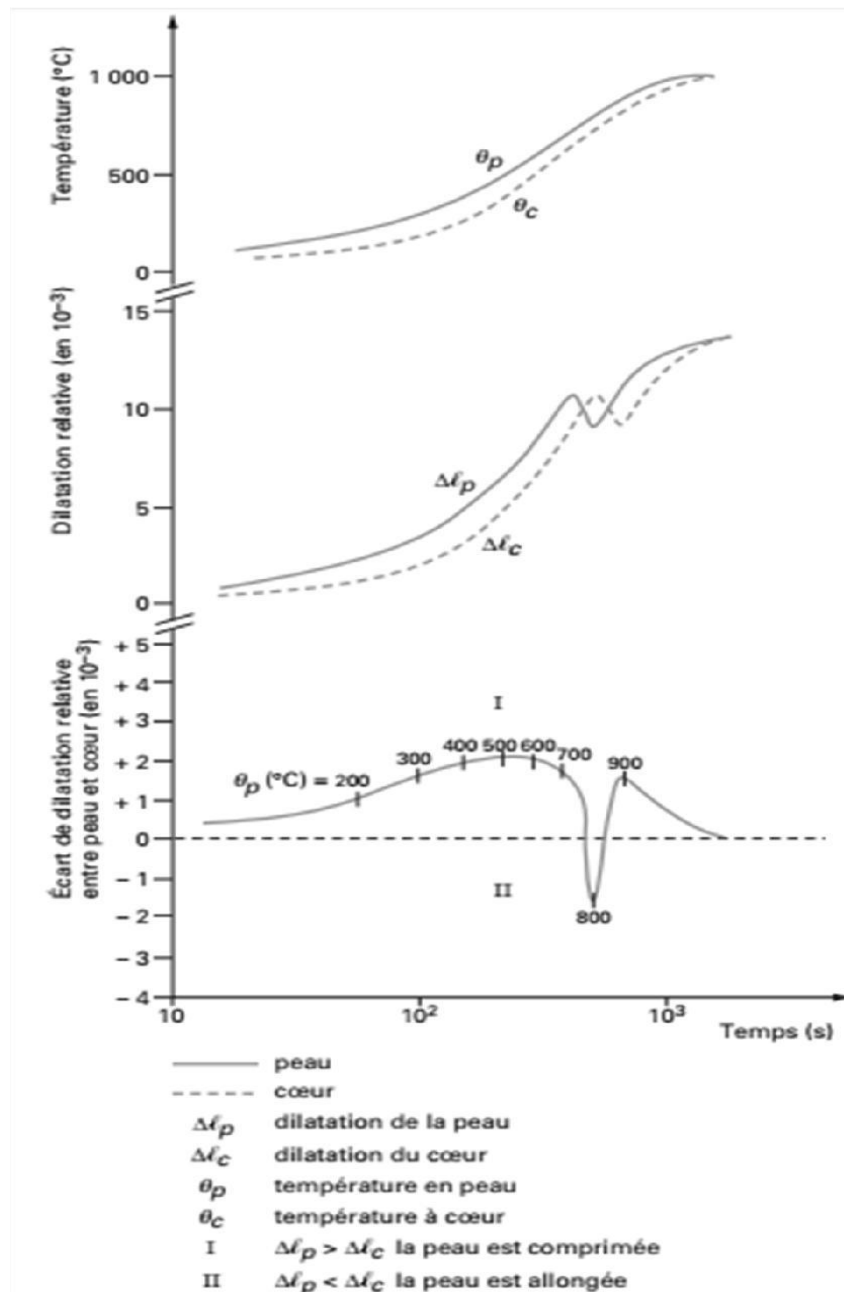


Fig. II.3 : Évolutions, en fonction du temps, de la température, de la dilatation en peau et à cœur[8]

Au cours du chauffage, ils assistent donc à une sorte de « pétrissage » de la peau, dont l'ampleur croît avec la rapidité du chauffage et la dimension de la pièce. Si, dans le cas des aciers de construction pour traitement thermique dans la masse, ce pétrissage ne crée pas un risque de fissuration, il engendre par contre des modifications de la géométrie de la pièce, qui constituent une part non négligeable des déformations dues au traitement thermique. Il est donc préférable de réaliser un chauffage d'autant plus lent que la section de la pièce à traiter est plus forte et, éventuellement, de procéder à des interruptions du chauffage pendant lesquelles le gradient de température se

résorbera, tout au moins pour sa plus grande part. De telles interruptions peuvent être prévues aux températures suivantes :

- Vers 300 °C, ce qui permet de diminuer sensiblement l'importance du gradient maximal ;
- Légèrement au-dessous de Ac1 (environ entre $Ac1 - 50$ °C et $Ac1 - 25$ °C); le gradient thermique est fortement diminué avant que ne se manifestent les anomalies de transformation [7].

II.1.3 Maintien à la température d'austénitisation

Le maintien à la température d'austénitisation le temps pendant lequel la température de l'ensemble de la pièce est conservée constante et égale à la température d'austénitisation, étant entendu que le chauffage ne s'achève que lorsque la température est uniforme dans toute la section de la pièce (ou lorsque l'écart de température entre peau et cœur est inférieur ou égal à la tolérance admise). Comme le montre la Figure.1, ce maintien a essentiellement pour objet de parfaire l'austénitisation, c'est-à-dire de permettre d'achever la mise en solution des carbures et d'homogénéiser la répartition du carbone dissous. Cette même **Figure II.1** montre aussi que la durée de ce maintien doit être d'autant plus longue que la température d'austénitisation est plus proche de Ac3 et, a contrario, que le maintien peut être écourté si l'on adopte une température d'austénitisation plus élevée (tout en la limitant pour éviter le grossissement des grains d'austénite).

Étant à l'état austénitique, l'acier n'a plus, à chaud, qu'une limite d'élasticité basse, voire très basse. De ce fait, il est susceptible de se déformer plastiquement sous son propre poids que ce soit par déformation banale ou par fluage. Il est donc indispensable d'éviter ce risque et, pour ce faire, il est nécessaire de bien positionner les pièces et de les soutenir lorsqu'elles sont en porte-à-faux (**Figure II.3**).

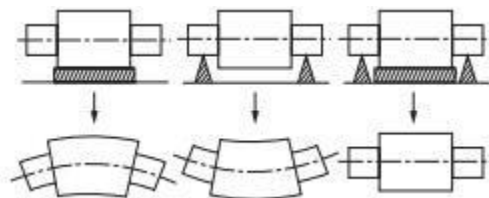


Fig. II.4 : les distorsions subies par un cylindre arbré au cours d'un maintien à haute température, à l'état austénitique[7]

a) Pour les aciers hypoeutectoïdes :

L'austénitisation entre $Ac_3 + 25\text{ °C}$ et $Ac_3 + 50\text{ °C}$ (souvent, lors du traitement des aciers non alliés trempés à l'huile, on relève ces températures de 25 °C environ pour augmenter un peu la trempabilité en provoquant un léger grossissement des grains d'austénite) ; La durée du maintien très souvent définie en fonction de la taille de la pièce chauffée et dans le but de parvenir à une mise en température uniforme. Cette façon de faire découle du choix de température indiqué ci-dessus ($Ac_3 + 25\text{ °C}$ à 50 °C) ; la durée du maintien nécessaire (maintien qui ne débute que lorsque l'isotherme de la pièce est acquise, à la tolérance près admise dans la pratique pour l'écart de température entre peau et cœur) est alors très courte (quelques minutes suffisent, en général, pour les aciers hypoeutectoïdes non alliés et faiblement alliés). La relation empirique qui peut lier le temps nécessaire pour porter le cœur de la pièce à la température d'austénitisation et l'épaisseur de la pièce est propre à chaque équipement et ne peut donc être généralisée [8].

b) Pour les aciers hypereutectoïdes :

L'austénitisation vers $Ac_1 + 50\text{ °C}$ environ (ce dernier cas est surtout celui des aciers à outils ; la quantité de carbone dissous dans l'austénite est suffisante pour obtenir un durcissement important, on évite le grossissement du grain austénitique, on limite la quantité d'austénite résiduelle subsistant après la trempe et on conserve des carbures non dissous, relativement grossiers, qui concourent à améliorer la résistance à l'usure et à l'abrasion). La durée du maintien surtout définie en fonction de la quantité de carbone que l'on souhaite mettre en solution, puisque l'austénitisation est généralement réalisée à une température comprise entre Ac_1 et A_{cm} et donc dans le domaine mixte : ferrite + carbures + austénite, en notant toutefois qu'une légère modification de la température d'austénitisation a, dans ce domaine, beaucoup plus d'influence qu'un changement de la durée du maintien. Pour les aciers alliés contenant des éléments carburigènes, il faut tenir compte des conditions particulières de mise en solution des carbures, qui peuvent obliger à adopter une température d'austénitisation élevée et une durée de maintien assez importante. Dans ce cas, comme dans tous les cas où les informations disponibles sont jugées insuffisantes, on peut procéder à une série d'essais relativement simples qui permettent de définir les conditions optimales d'austénitisation.

II.2 Trempe

La trempe a pour objet d'empêcher la précipitation du carbone au cours du retour depuis la température d'austénitisation jusqu'à la température ambiante, et cela dans la plus grande partie possible de la section de la pièce. Pour des raisons économiques (économie d'éléments d'alliage), on admet qu'une certaine proportion de bainite puisse se substituer à la martensite dans la mesure où le revenu est réalisé à une température supérieure à 500 °C. Pour un acier donné, les deux facteurs qui vont conditionner le résultat de la trempe sont :

- la trempabilité de l'acier dans les conditions d'austénitisation adoptées;
- les conditions de refroidissement de l'austénite [9].

II.2.1 Diagrammes T.R.C (transformation-refroidissement-continue)

Le diagramme TRC résume les résultats d'un refroidissement en continue tel qu'il a eu lieu lors d'une trempe dans les différents milieux de refroidissement tel que l'eau, l'huile, l'air comprimé, l'air tout court et d'autres. Ces diagrammes permettent de trouver :

- La microstructure qui s'établit à une vitesse de refroidissement donnée.
- Le temps après lequel la transformation commence et se termine.
- Quelle dureté en résulte pour le matériau.

Le diagramme TRC représente le lieu des points (T,t) qui correspondent à une structure donnée. Selon la vitesse de refroidissement, on peut suivre les transformations de l'austénite pendant la traversée des différents domaines.

Les chiffres sur les courbes donnent la quantité (% poids) d'austénite qui s'est décomposée dans le domaine traversé.

La dureté finale, après les transformations successives est portée à la fin des courbes de refroidissement. Ces courbes correspondent au refroidissement des petites éprouvettes dilatométriques qui ont été utilisées pour la détermination du diagramme.

Pour connaître le comportement d'un barreau de diamètre donné refroidi dans un milieu donné, il faudra utiliser la courbe de refroidissement correspondante (en superposant des courbes tracées sur un support transparent par exemple).

Les courbes tracées sur la figure délimitent différents domaines dans lesquels coexistent les produits de la transformation de l'austénite.

L'austénite se transforme en :

- Ferrite dans la zone A+ F
- Constituant de type perlitique dans la zone A+C+F

Chapitre II: Généralités sur les traitements thermiques

- Bainite dans la zone A+F+C
- Martensite dans la zone A+M

Les courbes en traits fin représentent l'allure du refroidissement à différentes vitesses sur chacune, des nombres indiquent la proportion d'austénite transformée.

Comme exemple : la Courbe à 204 HV : l'austénite se transforme en 60% de ferrite et en 40% de perlite (la dureté Vickers finale est de 204).

Les lignes en pointillé indiquent les transformations à 50 %. On a indiqué le début, M_s , de la transformation martensitique mais pas sa fin, M_f , qui se situe en dessous de 0°C .

On remarquera qu'à 180°C on a atteint 90 % de la transformation martensitique [10].

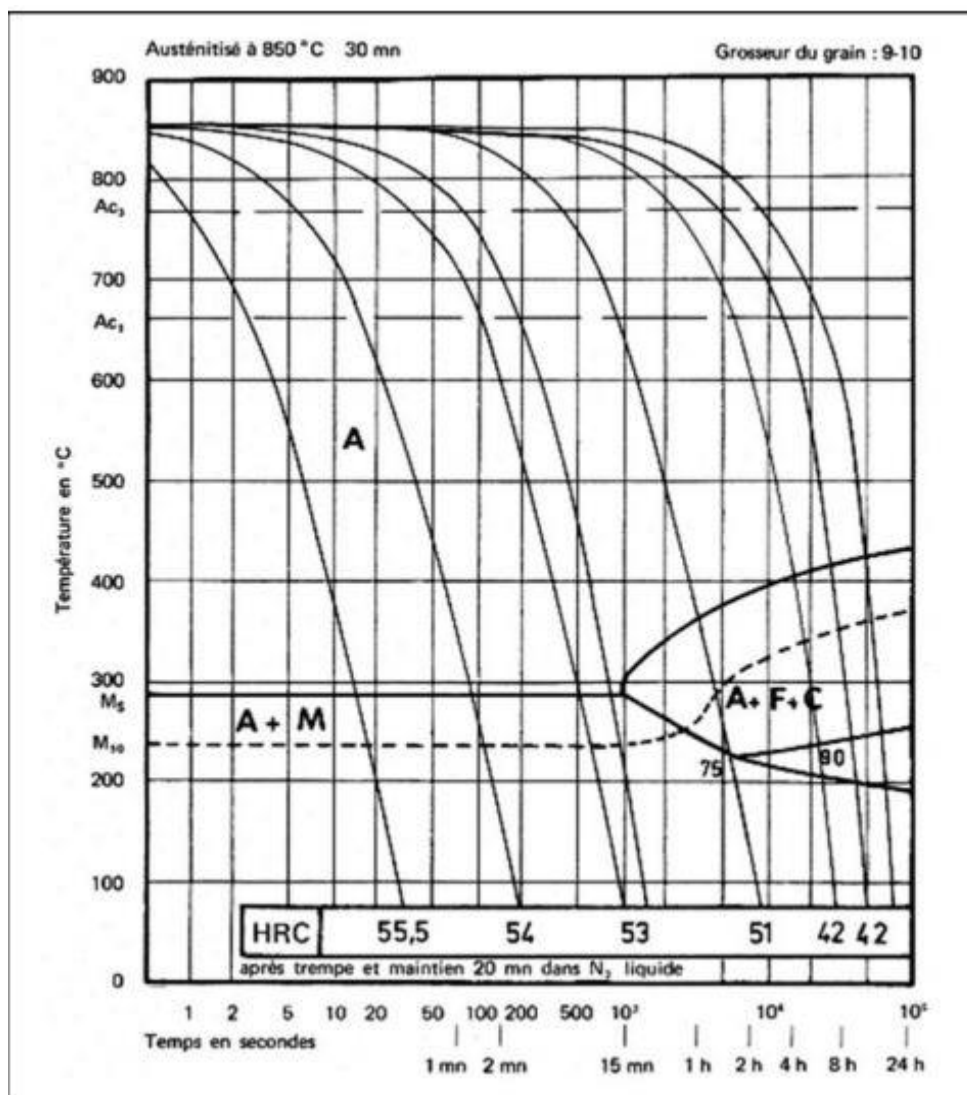


Fig.II.5 : Exemple de diagramme TRC (fonte 36NiCrMo16, d'après les travaux de L'IRSID) [10]

II.2.2 Diagrammes T.T.T (temps-température-transformation)

Les diagrammes TTT indiquent les résultats d'une transformation isotherme après refroidissement ultra-rapide. Physiquement, un tel traitement est réalisé en trempant un bout de métal dans un bain liquide à la température souhaité. On peut utiliser les principes de la décomposition isotherme des métaux pour réaliser des traitements thermiques. Au lieu de tremper directement les pièces jusqu'au domaine martensitique, on effectue une trempe isotherme. Cette trempe isotherme consiste à amener rapidement la pièce à une température donnée en restant dans le domaine austénitique, puis à la maintenir à cette température un temps suffisant pour obtenir les transformations. A tout moment on peut interrompre la décomposition par une trempe dans le domaine martensitique pour obtenir une structure mixte. **Figure II.6** montre de telles structures mixtes. L'échelle de dureté (à droite) correspond à un traitement isotherme complet. On voit bien qu'il faut éviter le nez de la transformation pour n'obtenir que de la martensite [10].

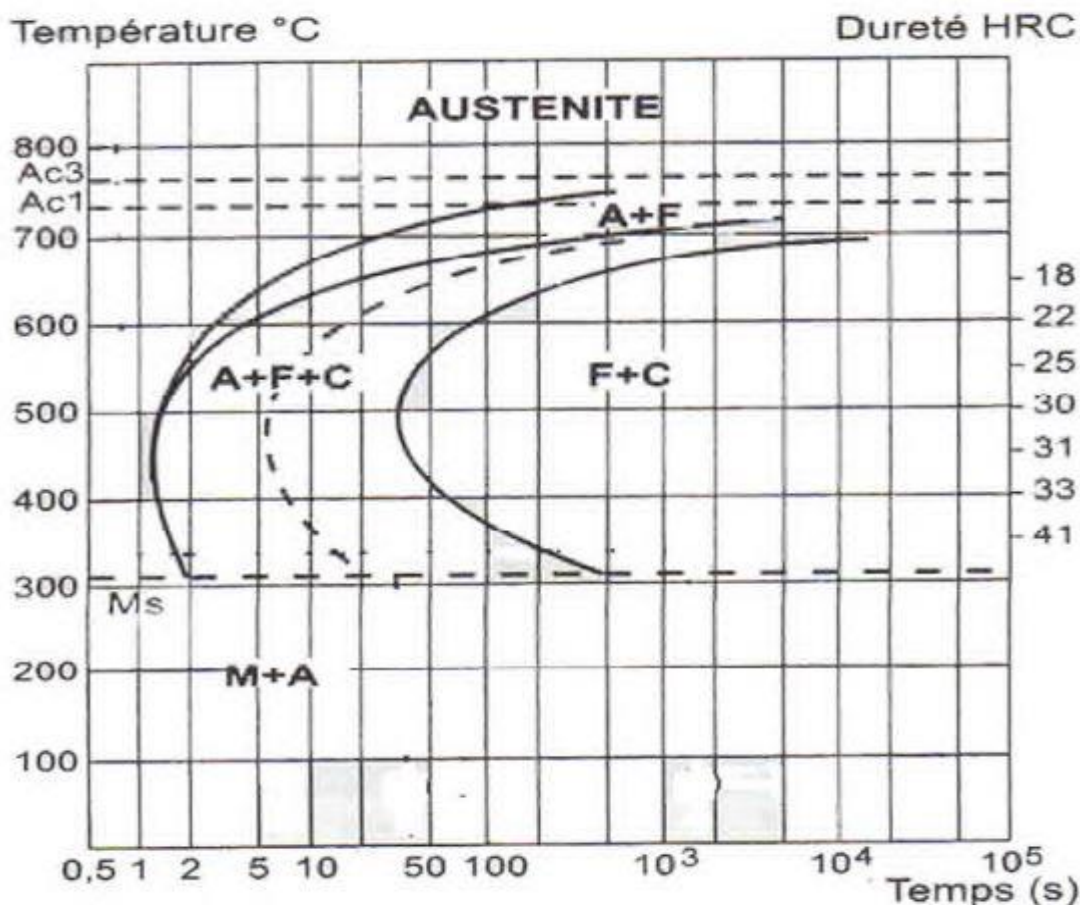


Fig.II.6 : Exemple de diagramme TTT pour un acier C55 : A = austénite, F = ferrite, C = cémentite, M = martensite [10].

La zone de formation des bainites n'est pas délimitée mais on peut évaluer sa position en observant l'échelle des duretés, à droite [10].

II.2.3 Trempabilité de l'acier

Pour les procédés habituels de trempe, la trempabilité est caractérisée à l'aide des diagrammes de transformation en refroidissement continu (diagramme TRC) et indirectement, à l'aide des courbes Dureté (HV) = f (conditions de refroidissement). Plus la trempabilité d'un acier est grande :

- plus est grande la section des pièces dans lesquelles, pour des conditions de refroidissement données, on peut provoquer la transformation martensitique à cœur ;
- moins il est nécessaire de refroidir rapidement une pièce de dimensions données pour engendrer la transformation martensitique à cœur [7].

II.2.4 Conditions de refroidissement lors de la trempe

Dans la pratique, la trempe est généralement réalisée par immersion de la pièce dans un milieu qui extrait la chaleur contenue dans celle-ci, ce milieu peut être :

- gazeux : air, gaz (N₂, Ar, H₂, He, etc.) ;
- liquide : eau, huiles et bains de sels fondus (l'eau et les huiles peuvent contenir des additifs qui modifient leur pouvoir refroidissant) ;
- mixte : brouillard (gaz + liquide atomisé), lit fluidisé (gaz + solide pulvérulent).

Le milieu de trempe peut être plus ou moins agité (brassage) ou projeté (refroidissement par aspersion). Le refroidissement en chaque point d'un volume d'acier dépend :

- des propriétés thermiques du métal ;
- de la géométrie de la pièce (forme, dimensions, etc.) ;
- de la position du point considéré dans la section de la pièce ;
- des propriétés thermiques du milieu de trempe et de certaines de ses propriétés physiques (viscosité notamment) ;
- de la température du milieu de trempe ;
- des conditions dans lesquelles se déroule l'échange thermique entre pièce et milieu de trempe (volume et agitation du milieu de trempe, état de surface de la pièce, etc.).

Cette énumération montre que le praticien dispose d'un petit nombre de moyens de refroidissement et qu'il va devoir tenir compte d'un très grand nombre de paramètres. Mais

compte tenu du fait que l'eau et les huiles sont les principaux fluides de trempe utilisés dans la pratique, il nous semble utile ici d'insister sur certaines de leurs particularités [8].

II.2.5 Trempe à l'eau

L'eau constitue le milieu de refroidissement le moins cher qui permette, dans la pratique de tous les jours, de réaliser les refroidissements les plus énergiques. Toutefois, il faut noter qu'au cours d'une trempe à l'eau la vitesse de refroidissement n'est pas constante et qu'elle est maximale lorsque la température de surface de la pièce est voisine de 300 °C. Cette situation peut être responsable de la formation de tapures et c'est la raison pour laquelle, lorsque le risque d'apparition d'un tel incident est trop grand, on préfère arrêter la trempe à l'eau lorsque la température de surface de la pièce est voisine de 200 – 400 °C pour poursuivre le refroidissement (et la transformation martensitique) dans des conditions moins sévères (huile ou air). L'eau a l'avantage de faire éclater la calamine au début du refroidissement et donc de nettoyer la surface et d'améliorer l'échange thermique.

Lorsque la géométrie de la pièce le permet, l'eau peut former facilement des bulles de vapeur prisonnières qui ralentissent localement le refroidissement du métal et donnent naissance à des points doux ; la circulation de l'eau, l'agitation de la pièce ainsi que sa présentation doivent donc être adaptées. Si la température de l'eau s'élève, son pouvoir refroidissant diminue très sensiblement (la période de caléfaction est prolongée). Ainsi donc, l'exécution d'une bonne trempe à l'eau exige le contrôle permanent :

- de la température de l'eau ;
- de l'agitation des pièces ;
- de la circulation de l'eau et de son renouvellement éventuel.

Par ailleurs, il est nécessaire d'éviter toute contamination de l'eau par des produits étrangers (sels notamment), qui changerait sa sévérité de trempe et empêcherait d'obtenir des résultats constants.

En revanche, il est possible de modifier volontairement le pouvoir refroidissant de l'eau en lui incorporant divers produits [11].

a) Augmentation de sa sévérité de trempe

Chapitre II: Généralités sur les traitements thermiques

En mettant en solution des sels (NaCl, CaCl₂, par exemple) ; une telle addition présente l'avantage de décaler vers le haut (vers 500 à 600 °C) le domaine des températures de surface pour lesquelles la vitesse de refroidissement est maximale ; ainsi sont réduits les risques de développement de la transformation martensitique en présence du gradient thermique le plus élevé ; à titre d'indication, la concentration de la solution doit être régulièrement contrôlée et il est nécessaire de prendre des mesures (nettoyage et protection de la surface) pour éviter la corrosion des pièces à leur sortie du bain de trempe.

b) Abaissement de sa sévérité de trempe

En lui ajoutant des polymères organiques dont la solubilité dans l'eau diminue quand la température s'élève. Lors de l'immersion de la pièce, il se forme à sa surface un film visqueux qui ralentit le refroidissement ; ce ralentissement varie avec la proportion d'additif dissous dans l'eau ; l'emploi de ce procédé exige le respect des précautions suivantes :

- éviter l'échauffement du bain au-dessus de 40 °C ;
- sortir les pièces du bain après total refroidissement afin de permettre la redissolution de l'additif pour éviter d'entraîner celui-ci avec les pièces et, ainsi, d'appauvrir la solution ;
- contrôler régulièrement la concentration en additif (ou mesurer le pouvoir refroidissant du liquide) afin de faire les ajustements nécessaires à l'obtention de résultats constants [12].

II.2.6 Trempe à l'huile

Il existe une très grande variété d'huiles de trempe qui peuvent différer :

- par l'huile de base (minérale ou synthétique) ;
- par les additifs qu'elles contiennent, additifs qui ont pour objet soit de modifier le pouvoir refroidissant, soit d'améliorer certaines propriétés (notamment la résistance à l'oxydation).

Lors d'une trempe à l'huile, la vitesse de refroidissement n'est pas constante; elle est maximale lorsque la température de surface de la pièce est encore assez élevée et généralement comprise, suivant les propriétés de l'huile considérée, entre 400 et 600 °C, soit à un niveau bien supérieur à celui correspondant à la trempe à l'eau.

La viscosité de l'huile diminue quand sa température augmente. Ce phénomène provoque une augmentation du pouvoir refroidissant. Il est donc nécessaire de contrôler en permanence la température du bain et de mettre en œuvre un moyen de refroidissement.

Il est important d'éviter l'introduction d'eau dans un bain d'huile, eau qui diminue les vitesses de refroidissement à haute température mais les augmente à basse température, c'est-à-dire dans les conditions les plus critiques pour l'apparition de tapures.

Enfin, l'utilisation de la trempe à l'huile impose la mise en œuvre de moyens de prévention et de lutte contre les incendies [12].

II.2.7 Trempe à gaz

La trempe par refroidissement à l'aide d'un gaz quand les lois de refroidissement réalisées sont plus rapides que celles obtenues par refroidissement de la même pièce dans l'air calme.

Les conditions de refroidissement dépendent ici :

- De la nature du gaz (et essentiellement de sa capacité thermique)
- De la température du gaz
- De la pression du gaz
- De la vitesse relative du gaz par rapport à la surface de la pièce

L'utilisation d'un gaz neutre permet d'éviter toute altération chimique de la surface de la pièce. Ce mode de refroidissement connaît un grand développement dans le cadre de l'utilisation des fours à vide. Il permet, avec l'utilisation de gaz performant (azote, hélium, hydrogène) sous pression et le recours à une circulation intense, d'espérer la réalisation de conditions de refroidissement peu inférieures à celles obtenues avec la trempe à l'huile avec l'avantage d'une circulation plus maîtrisable du fluide de trempe. La réalisation de cette dernière dans une chambre froide permet d'améliorer encore les résultats. Lorsque le gaz utilisé doit être recyclé, il est nécessaire de prévoir un moyen de refroidissement (échangeur) qui permette d'en extraire la chaleur avant de le renvoyer au contact de la pièce [7].

II.2.8 Trempe au brouillard

La trempe au brouillard est réalisée en projetant à la surface de la pièce un fort courant d'air dans lequel de fines gouttelettes d'eau sont mises en suspension. Le refroidissement est dû à fois au pouvoir refroidissant de l'air en circulation et à la vaporisation des gouttelettes d'eau lorsqu'elles entrent en contact avec la surface de la pièce.

Le pouvoir refroidissant d'un tel brouillard peut être de quatre à cinq fois plus grand que celui de l'air utilisé ; les vitesses de refroidissement obtenues sont grandes lorsque la température de la surface de la pièce est peu élevée [11].

II.2.9 Trempe en bain fluidisé

Un bain fluidisé pour la trempe est constitué par de fines particules (généralement d'alumine) en suspension dans un courant gazeux. Un tel bain doit être refroidi afin d'extraire la chaleur apportée par la pièce. Il assure des refroidissements en des temps comparables à ceux obtenus dans les huiles, mais alors la vitesse de refroidissement décroît régulièrement au cours du temps (sans subir les conséquences de la vaporisation de l'huile).

La présentation des pièces doit être étudiée pour éviter que le courant gazeux ne soit localement interrompu, ce qui, en entraînant le compactage des particules, ralentirait très sensiblement le refroidissement dans la zone considérée. Si les dispositifs nécessaires sont prévus, la température d'un bain fluidisé peut être ajustée à des niveaux différents de l'ambiante pour répondre à des besoins particuliers. Mais alors l'action des moyens de refroidissement (nécessaires à l'extraction de la chaleur apportée par les pièces) et celle des moyens de chauffage (pour maintenir le bain à une température supérieure à l'ambiante) doivent être très bien coordonnées par le régulateur de température du bain.

Un tel bain pourrait aussi être stabilisé à une température inférieure à l'ambiante si cela était jugé utile pour réaliser une trempe martensitique plus complète [7].

II.3 Revenu

Appliqué aux aciers au carbone alliés ou non alliés, après une trempe martensitique et/ou martensito-bainitique, le revenu a pour objet de provoquer une précipitation du carbone sous une forme et dans des conditions contrôlées afin de parvenir au durcissement optimal. Cette opération engendre une évolution structurale depuis l'état métastable obtenu après trempe vers un état plus proche de l'équilibre physico-chimique. Éventuellement, ce revenu peut provoquer la transformation de l'austénite résiduelle en bainite pendant le maintien ou en martensite secondaire au cours du refroidissement final.

- Les paramètres qui définissent les conditions d'exécution d'un revenu sont : la température de revenu ou température maximale à laquelle est porté l'acier ;

- La durée du maintien à la température maximale, c'est-à-dire le temps pendant lequel la température des zones martensitiques et/ ou martensito-bainitiques est maintenue constante et égale à la température de revenu ;
- La loi de refroidissement à laquelle la pièce est soumise à la fin du revenu. Pour apprécier ou prévoir le comportement au revenu d'un acier.

Différents types de revenu (après trempe) existe :

- Le revenu de détente
- Le revenu habituel (ou banal)
- Le revenu de durcissement secondaire [12]

II.3.1 Choix des conditions de revenu après trempe

Le choix des conditions de revenu commence par la définition du type de revenu qui est réalisé (fonction des propriétés recherchées) :

- Dureté maximale et conditions de service n'imposent pas une certaine ductilité par exemple ; revenu de détente à la T 180-220°C, compatible avec les exigences de dureté)
- Compromis bien déterminé entre le niveau haut de la résistance et un niveau haut de ductilité revenu banal.
- Pour les aciers contenant des éléments carburigènes revenu de durcissement secondaire Tenir compte que la périphérie d'une pièce subit toujours un maintien à la température de revenu plus long que celui auquel est soumis le cœur. Cette différence est d'autant plus grande que le chauffage est plus rapide et la section de la pièce plus importante chauffage lent et contrôlé [11].

II.3.2 Le revenu de détente

- Réalisé à une température comprise entre 180 et 220°C
- Appliqué uniquement une structure totalement martensitique
- Provoque une précipitation souvent incomplète (fonction T) du C sous forme de Carbone
- Permet une diminution des contraintes interne

Évolution des propriétés :

- Faible \hat{t} de la résistance à la traction et de la dureté
- très sensiblement la limite d'élasticité
- améliore un peu le niveau des caractéristiques de ductilité

Réalisé lorsque les conditions d'emploi exigent :

- conservation des caractéristiques de résistance à leur niveau le plus élevé
- sans imposer de contrainte en ce qui concerne la ductilité

Ne provoquant pas de transformation de l'austénite résiduelle (si ce n'est sa stabilisation), il peut être précédé d'un traitement par le froid si l'on veut disposer du durcissement maximal [7].

II.3.3 Le revenu usuel

- Réalisé à une température comprise entre 500 et 575°C
- Provoque la précipitation complète du carbone sous forme de cémentite Fe₃C

Suivant la température de revenu, ces carbures sont plus ou moins fins, dispersés et durcissant ou globalisés, coalescés et peu durcissant.

Suivant la température de revenu, dans le domaine considéré, on provoque une baisse plus ou moins forte des caractéristiques de résistance mais aussi un relèvement très sensible des caractéristiques de ductilité

II.3.4 Le revenu de durcissement secondaire

- Réalisé à une température comprise entre 600 et 675°C
- Provoque précipitation complète du C sous forme de carbures spéciaux (Cr₇C₃, Cr₂₃C₆, Mo₂C, ...)
- Provoquer un durcissement important accompagné d'une diminution des caractéristiques de ductilité.
- Particulièrement effectué sur les pièces devant travailler à haute T [7]

II.4 Recuit

Objectif : éliminé toute l'histoire thermique de l'acier en ramenant le métal à l'équilibre physico-chimique et mécanique

Principe : réalisé un cycle thermique

- Chauffage à une température de recuit
- Maintien isotherme à cette température
- Refroidissement lent dans l'air ou le four

Propriété recherchée :

- Ductilité maximale
- Dureté minimale
- Bonnes propriétés mécaniques

Dans la pratique, on distingue différents recuits en fonction des buts à atteindre :

- Le recuit d'homogénéisation
- Le recuit de régénération
- Le recuit complet
- Le recuit de détente

II.4.1 Le recuit d'homogénéisation

Objectif : réduire les hétérogénéités de composition chimique engendrées par le procédé de solidification

Pour réduire ces hétérogénéités, on fait intervenir la diffusion en portant l'acier à haute température ($T > 1100^{\circ}\text{C}$) et en le maintenant à cette température pendant le temps nécessaire pour obtenir le résultat souhaité

Le maintien est suivi d'un refroidissement assez rapide, provoquant généralement un fort grossissement des grains, nécessité d'affiner ultérieurement (réalisation d'un recuit de régénération).

II.4.2 Le recuit de régénération

Objectif : affiner le grain de l'acier après que celui-ci ait subi un grossissement excessif à la suite d'une surchauffe accidentelle ou d'un recuit d'homogénéisation par exemple :

L'affinement des grains de l'acier est possible grâce à la transformation austénitique et au processus de germination et de croissance de l'austénite.

Le maintien à T maximale du cycle assurer la mise à T uniforme de la pièce A T ambiante la structure de l'acier est constituée de ferrite (ou de cémentite) et de perlite.

II.4.3 Le recuit complet

Objectif : homogénéiser la structure d'un acier non allié ou faiblement allié; il permet aussi d'affiner le grain de cet acier.

Il se définit essentiellement par son cycle thermique qui comporte :

- Une austénitisation (conditions identique que celle qui précède la trempe)
- Un refroidissement à l'air libre

Un des intérêts de ce recuit est d'obtenir un matériau dont l'usinage et la déformation à froid est facilitée.

II.4.4 Le recuit de détente

Objectif : diminuer les contraintes résiduelles préalablement générées par des cycles thermiques ayant créé, des gradients thermiques et donc des déformations hétérogènes (à l'occasion d'opération de formage, de soudage ou de traitements thermiques)

Un traitement de relaxation comporte

- Un chauffage relativement lent (limiter les contraintes liées au gradient thermique) à la température choisie ;
- Un maintien à la température choisie ;
- Un refroidissement relativement lent (limiter les nouvelles contraintes liées au gradient thermique)

II.5 Traitement thermique des fontes

II.5.1 Généralités

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.

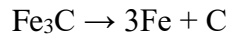
Le graphite et les carbures sont des réserves de carbone qui permettent à la matrice de se saturer par dissolution et diffusion en tendant vers l'état d'équilibre prévu par les diagrammes, notamment en phase austénitique au cours d'un maintien au-dessus du point de transformation A_{c3} (il suffit parfois de quelques minutes pour que cet effet soit appréciable). Par le processus inverse, lorsque la solubilité du carbone décroît, l'austénite rejette cet élément qui tend le plus souvent à précipiter sous forme de graphite ou de carbures sur les constituants de cette nature qui préexistent. Cela permet de dire que les matrices des fontes se transforment par traitement thermique comme des aciers, mais dont la teneur en carbone varierait en fonction de la température et du temps.

En outre, pourvu qu'ils ne soient pas excessivement stabilisés par les éléments carburigènes (Cr, V, Mn, Mo, etc.), les carbures peuvent se décomposer avec libération de graphite (graphitisation) au cours de maintiens prolongés (plusieurs dizaines de minutes à plusieurs dizaines d'heures) à une température suffisante, (au-delà de 500°C), mais pas obligatoirement supérieure au point de transformation A_{c3} , quoi qu'il en soit ainsi le plus fréquemment (850°C à 1000°C).

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 [12].

II.5.2 Décomposition et mise en solution des carbures eutectiques

Dans le cas des fontes, le recuit graphitisant est un traitement thermique d'adoucissement et qui décompose les carbures libres suivant des réactions du type :



Le carbone résultant de cette décomposition précipite à l'état de graphite, du fait de l'évolution naturelle du système métastable vers la forme stable. Ce principe appelle les remarques fondamentales suivantes :

- La réaction mettant en jeu la germination et la croissance du graphite, liées à la dissolution des carbures, dépend de la diffusion et se trouve donc thermoactive, on considère en générale, que c'est la vitesse de dissolution de la cémentite dans l'austénite qui limite la transformation dans le cas des fontes industrielle.
- Les carbures qui se décomposent ne sont pas, dans les fontes industrielle (même non alliées), exclusivement de la cémentite Fe_3C mais contiennent des éléments qui diminuent (graphitisant) ou augmentent (carburigène) leur stabilité ou leur résistance à la graphitisation, certains carbures notamment dans les fontes au chrome, sont pratiquement indécomposables.
- Le graphite obtenu en phase solide se présente en particules compactes (nodulaires, sphéroïdale, etc), généralement très différentes des formes laminaire résultant directement de la solidification des fontes grises.
- La transformation engendre une expansion due à la différence de masse volumique entre le graphite (2.2 g/cm^3) et la matrice ou les carbures (environ 7.8 g/cm^3) [12].

II.5.3 Saturation et homogénéisation de l'austénite

Afin de pouvoir réaliser un réglage précis des propriétés après trempe et revenu, il convient, comme dans les aciers, que l'austénite initiale soit correctement homogénéisée, mais ici la température et la durée d'austénitisation conditionnent l'activité du carbone dans cette austénite qui tend vers l'équilibre avec le graphite ou les carbures. Par le jeu des microségrégations initiales dont l'atténuation est souvent incomplète après les traitements de durée praticable industriellement, on observe généralement des faciès dendritiques et des effets de halo autour du graphite et des carbures avec variations locales de composition chimique, de structure et de micro-dureté. Dans certains cas, par exemple celui des fontes blanches au chrome-vanadium est particulièrement complexe (séquences incluant des dissolutions et précipitations successives de micro-carbures) [12].

II.5.4 Austénitisation

Comme pour tous les traitements thermiques des fontes, l'austénitisation doit être conduite de façon à donner à la fin du maintien isotherme (en général une à deux heures entre 850°C et 900°C) une austénite suffisamment homogène et à teneur en carbone définie.

On a montré qu'une élévation de la température d'austénitisation (entre 850 et 950 °C) avait pour effet de retarder et de ralentir la transformation bainitique et de donner une structure finale plus grossière avec plus d'austénite résiduelle. L'équipement doit donc permettre une bonne uniformité de la température de la charge dès la fin de l'échauffement et pendant le maintien isotherme, à 5°C près. En outre, la protection des pièces contre la décarburation et l'oxydation superficielle doit être assurée par une atmosphère contrôlée (potentiel carbone proche de 0.8 % par exemple) et les déformations [12].

II.5.5 Transformation isotherme

La température de transformation isotherme sera choisie en fonction des caractéristiques mécaniques visées. D'une façon plus générale, on retiendra les principes suivants :

- Entre 250°C et 325 °C environ, on obtient une structure à base de bainite inférieure avec peu d'austénite résiduelle et des traces de martensite qui confère des résistances mécaniques élevées avec relativement peu d'allongement. Les durées de maintien sont de l'ordre de 3h
- Entre 350 °C et 420 °C environ. La décomposition de l'austénite se divise en deux étapes. Au cours de la première, l'austénite mère se transforme progressivement en ferrite et s'enrichit en carbone. Ce qui a pour effet d'accroître sa stabilité, la ferrite à elle se développe sous forme aciculaire avec une teneur en carbone supérieure à celle de l'équilibre [9].

Ensuite, et c'est la seconde étape, l'évolution vers l'équilibre entraîne la croissance de la ferrite aux dépens de l'austénite avec précipitation de silico-carbures. Afin d'obtenir une bonne ductilité (associée à une résistance mécanique encore très remarquable), le maintien isotherme doit être interrompu avant le commencement de la seconde étape, la structure optimale étant entièrement composée de ferrite aciculaire dans une matrice d'austénite en majeure partie enrichie en carbone et ainsi stabilisée.

Le moment favorable se situe donc vers la fin de la première étape, l'étendue de cette période favorable dépend de la composition chimique de la fonte (Si, Mo, Ni, Al, etc.) et, en particulier, elle augmente sensiblement avec la teneur en silicium. La détermination de la

Chapitre II: Généralités sur les traitements thermiques

durée de maintien isotherme nécessaire et suffisante constitue une difficulté spécifique de cette fabrication, surtout si, pour diverses raisons (cas des fontes malléables par exemple), la teneur en silicium est limitée, et compte tenu du fait qu'en raison des micro-ségrégations inévitables, le démarrage des diverses étapes de transformation n'est pas parfaitement concomitant en tous points de la microstructure.

En pratique, les durées de maintien isotherme sont de l'ordre de 1 point de la microstructure.

En pratique, les durées de maintien isotherme sont de l'ordre de 1 à 2h [12].

Chapitre III: Fabrication des boulets de broyage

III.1 Introduction

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

Cette pièce (boulet) subit des usures très fréquentes voire même la casse. Elle est soumise à l'action des produits abrasifs tels que la roche et le blindage du broyeur ainsi que les boulets entre eux-mêmes

Elle doit répondre aux exigences suivantes :

- très bonne résistance aux suivantes ;
- très bonne résistance à l'abrasion ;
- très bonne résistance aux chocs.

Le critère important est la durée de vie utile du boulet de broyage (capacité du boulet à résister aux pertes de masse provoquée par abrasion). La durée de vie peut être limitée par l'aptitude du 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 du boulet dépend de sa capacité à résister à l'action des produits abrasifs avec un minimum de perte de métal [13].

III.2 Composition chimique du produit

Les fontes blanches alliées et en particulier les fontes blanches à forte teneur en chrome avec addition de molybdène employées pour la fabrication des boulets de broyage et la fabrication des blindages de forte épaisseur pour les broyeurs, assurent de nombreuses et importantes performances nettement supérieures à celles des fontes courantes pour des applications demandant une résistance élevée à l'usure par abrasion. Ces alliages figurent dans l'ensemble des normes sous différentes désignations (tableau) [13]

AFNOR	DIN 1695	BS 4844	ASTM
NF A32-401	Juillet 1977	1974	A 532-75a
FB Cr 12 Mo Ni	//	//	II A
FB Cr 15 Mo Ni	G-X 300 Cr Mo 153	//	II B – II C
//	G-X 300 Cr Mo 1521	3A – 3B	//
FB Cr 20 Mo Ni	G-X 260 Cr Mo 2021	3C	II D - IIE

Tab.III.1 : Nuances des fontes blanches au chrome – molybdène [13]

Chapitre III: Fabrication des boulets de broyage

Les compositions chimiques telles qu'elles figurent dans la norme AFNOR NF A32-401 et ASTM A 532-75a sont données au tableau ci-après

Désignation	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
FB Cr 12 Mo Ni	2.0-3.6	0.2-0.8	0.5-1.0	//	//	11-14	0.5-3.0	0-2.0	//
FB Cr 15 Mo Ni	2.0-3.6	0.2-0.8	0.5-1.0	//	//	14-17	0.5-3.0	0-2.5	//
FB Cr 20 Mo Ni	2.0-3.6	0.2-1.2	0.5-1.5	//	//	11-22	0.5-3.0	0-2.5	0-1.5
II A 12%Cr	2.4-2.8	1.0 max	0.5-1.5	0.1 max	0.06 max	11-14	0.5-1.0	0.5 max	1.2 max
II B 15%Cr-Mo-Lc	2.4-2.8	1.0 max	0.5-1.5	0.1 max	0.06 max	14-18	1.0-3.0	0.5 max	1.2 max
II C 15%Cr-Mo-Hc	2.8-3.6	1.0 max	0.5-1.5	0.1 max	0.06 max	14-18	2.3-3.5	0.5 max	1.2 max
II D 20%Cr-Mo-Lc	2.0-2.6	1.0 max	0.5-1.5	0.1 max	0.06 max	18-23	1.5 max	1.5 max	1.2 max
II E 20%Cr-Mo-Hc	2.6-3.2	1.0 max	0.5-1.5	0.1 max	0.06 max	18-23	1.0-2.0	1.5 max	1.2 max

Tab.III.2 : Compositions chimiques des fontes blanches au chrome-molybdène

III.3 Description du broyeur à boulets

C'est un tube cylindrique horizontal rotatif et dont l'intérieur est revêtu de pièces d'un matériau à dureté élevée qui résiste à l'impact et à l'abrasion appelées blindage. Il est divisé en deux compartiments de broyage par une paroi intermédiaire dénommée diaphragme de qui permet le passage du produit à broyer. De même conception que la précédente, la paroi de sortie permet l'évacuation du produit broyé. La première chambre, chargée de boulets de grand diamètre (entre 90 et 60 mm), réalise un concassage par choc entre boulets afin d'éliminer les plus gros grains revêtus d'un blindage releveur qui soulève et laisse rouler les corps broyant sur le matériau. La deuxième chambre est plus longue, réalise un broyage plus fin grâce à des boulets de taille plus petite (entre 50 et 17mm), Elle est revêtue d'un blindage classant.[14]

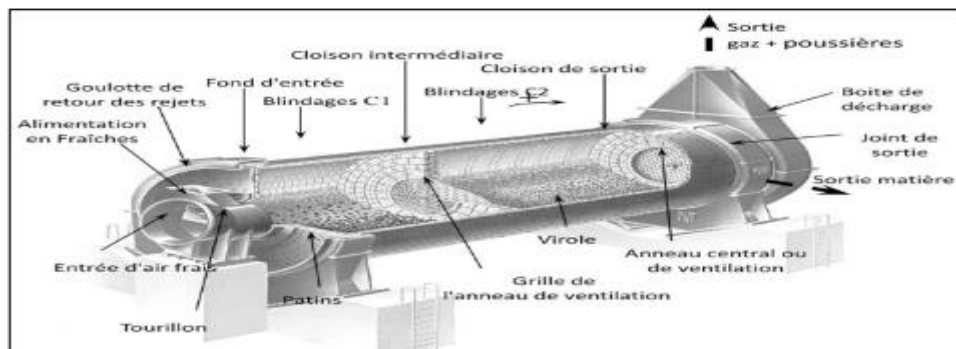


Fig. III.1 : Schéma descriptive d'un broyeur à ciment a deux compartiments[14]

Chapitre III: Fabrication des boulets de broyage

III.3.1 Fonte blanche

Le carbone se trouve sous forme de carbure de fer (Fe_3C). Possédant une bonne coulabilité, et un aspect blanc brillant, la fonte blanche est principalement utilisée pour les pièces d'aspect, les pièces d'usure.[15]

III.4 Fabrication des boulets

III.4.1 Appareils de fusion

III.4.1.1 Fours à induction de 5 tonnes

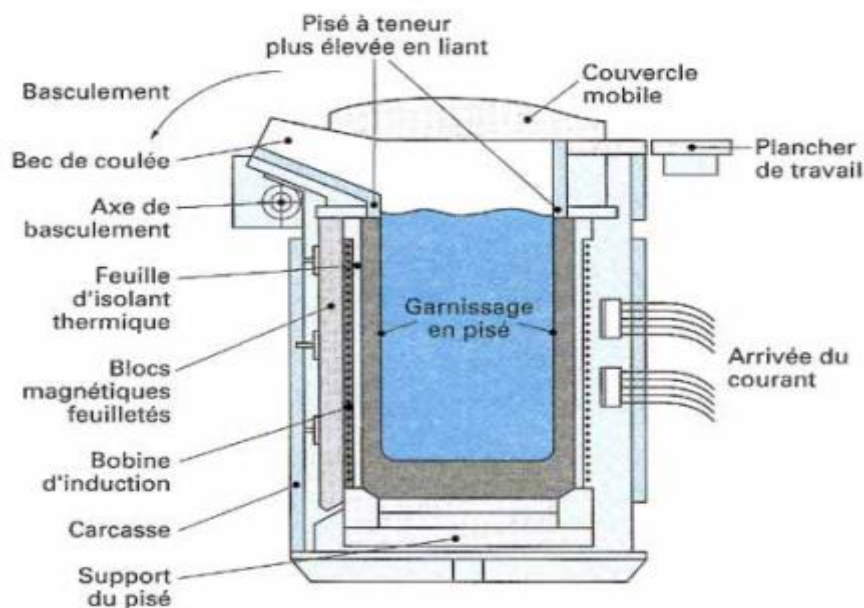


Fig. III.2 : Schéma descriptif d'un four à induction à creuset

III.4.1.2 Caractéristique d'équipement

- Masse nominale d'emploi 5 T.
- Rendement de transformation 1500 KVA.
- Gamme de tension 127 – 210 kV.
- Consommation d'eau réfrigérante 7 m³/h.
- Consommation spécifique d'énergie 470 kWh/to.
- La durée de fusion 90 à 180 min.
- Rendement de fusion nominal référé à 1650 C° près de 4 t/h.

III.4.1.3 La charge métallique

La qualité de la fonte dépend fortement des matières premières utilisées. La charge métallique à fondre est constituée habituellement de :

Chapitre III: Fabrication des boulets de broyage

- Des fontes neuves,
- Des ferrailles calibrées,
- Des paquets de chutes de tôles,
- Des bocages ou chutes de pièces de fontes diverses,
- Des retours de fabrication (descentes et jets de coulée, pièces rebutées en fonderie ou à l'usinage...),[16]

III.4.1.4 Traitements du métal liquide

Après fusion, il est nécessaire de traiter le métal liquide pour le débarrasser des crasses qui surnagent à la surface, l'affiner et améliorer ses caractéristiques avant de le couler dans les moules.

Ces traitements peuvent se faire directement dans le four, l'élimination des composants indésirables étant effectuée par partage entre deux phases (métal et laitier) par exemple le sulfure de Mg.

Après la fusion de tout la charge métallique, nous analyse les composants chimiques, puis nous corrigeons le résultat en ajoutant le Minerai du fer afin de réduire la proportion d'éléments ou d'augmenter la proportion d'un élément en ajoutant les Ferro alliage par exemple FeMn; FeSi; FeCrEts.[16]

III.4.1.5 Décrassage

C'est une opération commune à tous les modes d'élaboration et à tous les métaux et alliages qui a pour but de débarrasser le métal liquide de toutes les scories qui ont décanté et qui seraient source de défauts dans les pièces.

Pour décrasser le métal liquide, on utilise différents produits (fondants à base de chaux, spath fluor, ou dérivés), pour fluidifier les impuretés qui proviennent des charges métalliques, des retours (sable sur les jets, descentes de coulée...), etc., que l'on élimine par raclage sur la surface du bain, à l'aide de raclettes.

Le décrassage, en éliminant les impuretés du métal liquide est un facteur prépondérant pour la qualité des pièces coulées. Il doit être fait très soigneusement, à chacune des étapes du processus d'élaboration du métal ; au four de fusion, à la poche, et au moment de la coulée dans le moule. [16]

III.4.1.6 Manutention du métal liquide

Pour la manutention du métal liquide on utilise des poches garnies de matériaux réfractaires. Chaque transvasement refroidit le métal liquide.

Dans le cas de la fonte, on peut perdre 100°C entre le four et l'entrée dans le moule. Il faut donc :

Chapitre III: Fabrication des boulets de broyage

- préchauffer les poches le mieux possible ;
- utiliser des contenants bien isolés munis de couvercles ;
- limiter les transvasements et les faire rapidement.

Pour le transport du métal liquide on peut utiliser poches avec système de basculement (figure 2), capacités de 1000 kilogrammes à commande manuelle est le plus souvent du type théier.

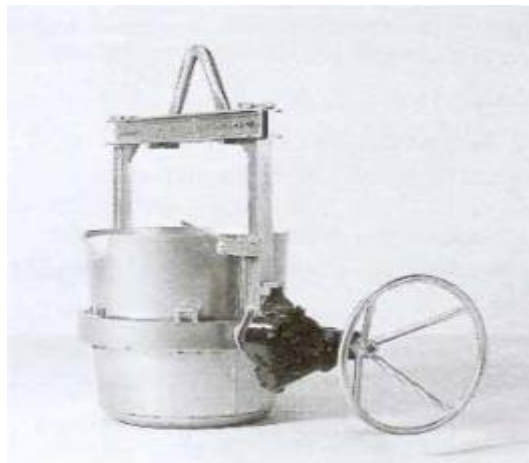


Fig. III.3 : Poche avec système de basculement

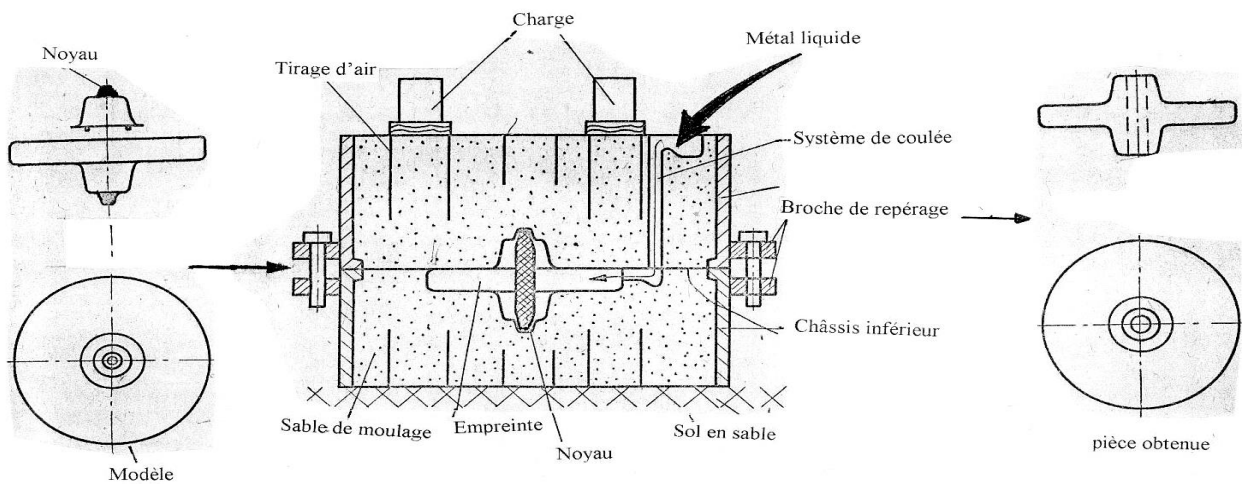
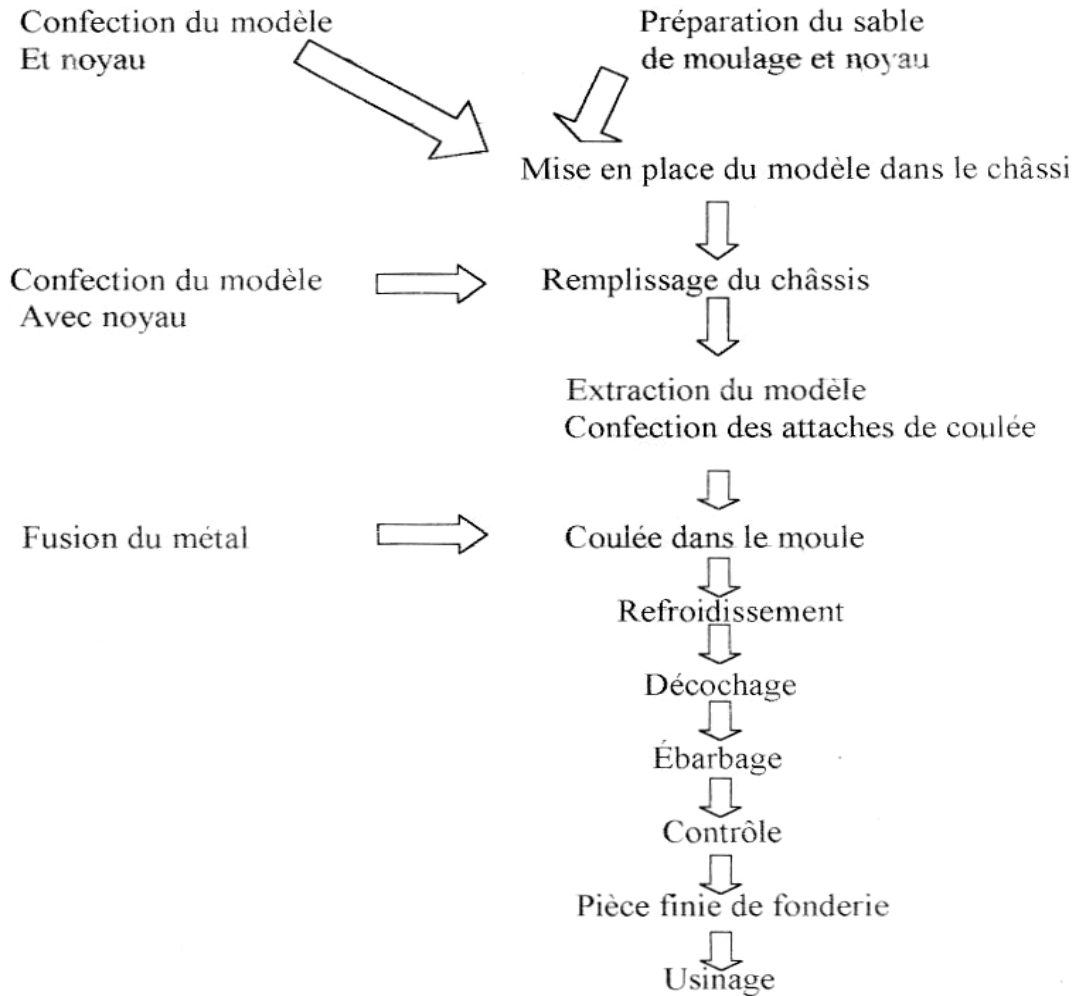
III.4.2 Moulage ensable

Le moulage en sable consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte du moule en sable, réalisée d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir. Le moulage en sable est le procédé le plus ancien et convient presque pour tous les métaux et alliages de moulage. Il s'adapte bien aux petites séries de production et surtout pour les pièces de grandes dimensions.

Un moule simple est constitué de deux parties : la partie supérieure et la partie inférieure. La figure 201 représente un moule en sable avec les différentes parties essentielles. Le métal en fusion est coulé à travers le trou du système de coulée, en traversant les canaux jusqu'au remplissage de l'empreinte. Après refroidissement et solidification, la pièce est sortie pour subir les différentes opérations de finition.[16]

Chapitre III: Fabrication des boulets de broyage

L'ensemble des opérations de moulage en sable est donné par le schéma ci-dessous :



Dans le moulage en sable on distingue deux types de moulages :

- Le moulage manuel.
- Le moulage mécanique.

Chapitre III: Fabrication des boulets de broyage

III.4.2.1 Le Moulage Mécanique

Ces plaques modèles correspondent à l'exécution de deux couches, l'une sur laquelle on serrerait. Les dessus, l'autre sur laquelle on serrerait les dessous. La superposition du dessus et du dessous serrés séparément donne le moule complet.

On voit donc que pour obtenir une pièce quelconque au moyen d'une plaque modèle du type double il faudra deux plaques qui matérialisent l'une, la surface de joint du dessus et la partie de modèle correspondant, l'autre la surface de joint du dessous et la partie de modèle complémentaire.

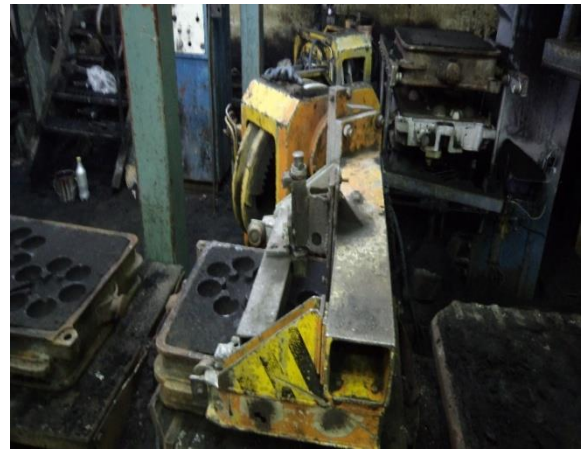
Il apparaît ici l'intérêt de ramener le moulage des pièces à un seul joint, au besoin par l'emploi de noyaux extérieurs, pour tirer tout le parti possible du moulage mécanique

III.4.2.2 Atelier moulage

On moule dans cet atelier une grande quantité des pièces de petit et moyennes dimensions, elle comprend deux chantiers de moulage avec deux lignes de moulage semi-automatique 500X 620X 200X 150X et deux machines à moules par secousse et pression, deux machines à démouler le châssis pour les déplacer vers l'atelier d'ébarbage (fig.III.4).



(1)



(2)



Fig. III.4 : les machines de serrage (1) et de montage (2).

Chapitre III: Fabrication des boulets de broyage

III.4.2.3 Caractéristique de procédé

- Le sable à mouler se compose du sable de remplissage à base de vieux sable et bentonite.
- La compression de sable de moulage s'effectue de manières mécaniques par secousses et pression.

III.4.2.4 Caractéristique d'équipement

Deux machines à mouler par secousses et pression type FRPUA 50 (basculant à droite et à gauche) à soulèvement par goupille couplage automatique :

- Charge utile : 2000 kgf.
- Force de pression : 40000 kgf.
- Course max de soulèvement : 250 mm.
- Dimensions du châssis : 1250x800x400.

III.4.2.5 Procédé de moulage

- Le sable à mouler se compose du sable de remplissage à base de vieux sable et bentonite.
- La compression de sable de moulage s'effectue de manières mécaniques par secousses et pression.

a. La coulée

Le remplissage de l'empreinte est réalisé par une descente de coulée d'environ 60 à 80 mm de diamètre qui est fixée à proximité d'un des quatre sommets à une distance de 150 à 200 mm du bord de l'empreinte.

b. Décochage

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

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

c. Dessablage

L'opération de dessablage est nécessaire, afin de débarrasser la pièce du sable qui adhère à ses surfaces. Au contact du sable froid, le métal se refroidit rapidement et sa surface extérieure est enrobée de grains de sable, on procède le plus souvent par décalaminage par sable (choc au sable siliceux bien sec) ou grenailage par acier projeté au moyen d'un jet d'air comprimé.



d. Ebarbage

Ici les pièces réparties en deux. L'un valable à l'expédition et l'autre non valable pour le recyclage et l'ébarbage consiste à éliminer le talon de coulée, les bavures aux joints, les picots de trous de coulée et les rugosités, on l'exécute le plus souvent à la meule.

III.4.3 Traitement thermique des boulets de concassage

Par suite du coût des éléments d'alliage et des conditions de leur production ainsi que les difficultés accrues dans l'élaboration des fontes spéciales que nécessitent d'une part un équipement particulier souvent des fours électriques permettant un contrôle précis de la composition et de la température et d'autre part une grande maîtrise des processus de fabrication. L'entreprise nationale de fonderie de TIARET n'a pas connu de progrès remarquables dans l'élaboration de ces compositions et dans l'emploi de pièces en fontes spéciales (fontes au vanadium, fontes Ni-Hard, ...). Par contre, elle a surtout concentrée ses moyens techniques et personnels dans l'amélioration de la qualité des pièces en agissant sur leur constitution et sur leur structure par traitements thermiques de certaines fontes afin d'assurer une utilisation aussi économique que possible des éléments d'alliage et d'obtenir une meilleure efficacité dans la fabrication des produits.

Mais en pleine évolution industrielle et sous une menace continue des produits étrangers et malgré son importance, le problème des traitements thermiques des fontes blanches alliées demeure mal compris et mal dominé par les techniciens de l'E.N.F sous la présence de différents facteurs (température de chauffage, temps de maintien, milieu de refroidissement, vitesse de refroidissement, ...etc.) influençant cette technique.

L'application incorrecte des traitements thermiques aux fontes blanches alliées peut donner lieu à une dégradation des caractéristiques mécaniques qui peuvent avoir des valeurs inférieures à celles obtenues à l'état brut de coulée. Ceci se traduit par une réduction de l'utilisation de ces fontes dans des applications qui mettent en jeu des conditions de service sévères.

Chapitre III: Fabrication des boulets de broyage

Après une étude bibliographique, nous avons mené une étude systématique et approfondie portant sur les traitements thermiques des nuances utilisées par l' ALFET (type Cr – Mo) pour la fabrication des boulets de broyage en vue d'obtenir des gammes donnant un produit dur, résistant à l'usure par abrasion et peut fragile.

Ces traitements ont été réalisés sur des boulets de diamètres 60 et 80 et ils ont porté sur certains facteurs influençant leur application correcte et qui sont :

1. l'influence de la température de trempe (température d'austénisation) ;
2. l'influence de la vitesse de refroidissement après déstabilisation de l'austénite ;
3. l'influence de la température de revenu ;

Les traitements thermiques réalisés sont schématisés par l'organigramme qui suit

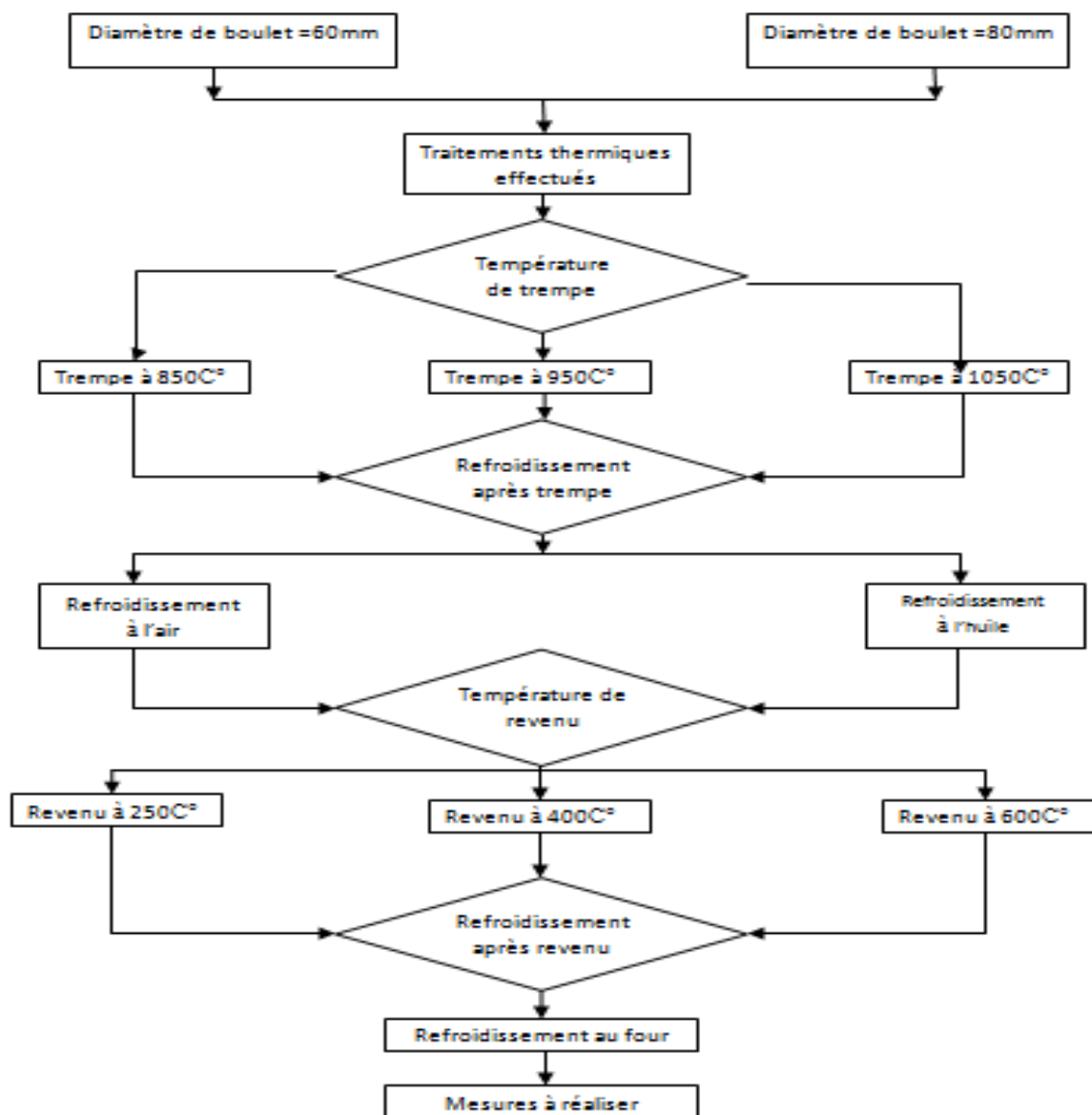


Fig. III.5 : Organigramme des traitements thermiques réalisés

Chapitre III: Fabrication des boulets de broyage

Le durcissement par trempe à 850°C , 950°C et 1050°C suivi d'un revenu à 250°C , 400°C et 600°C sont accomplis d'après le cycle thermique ci-dessous

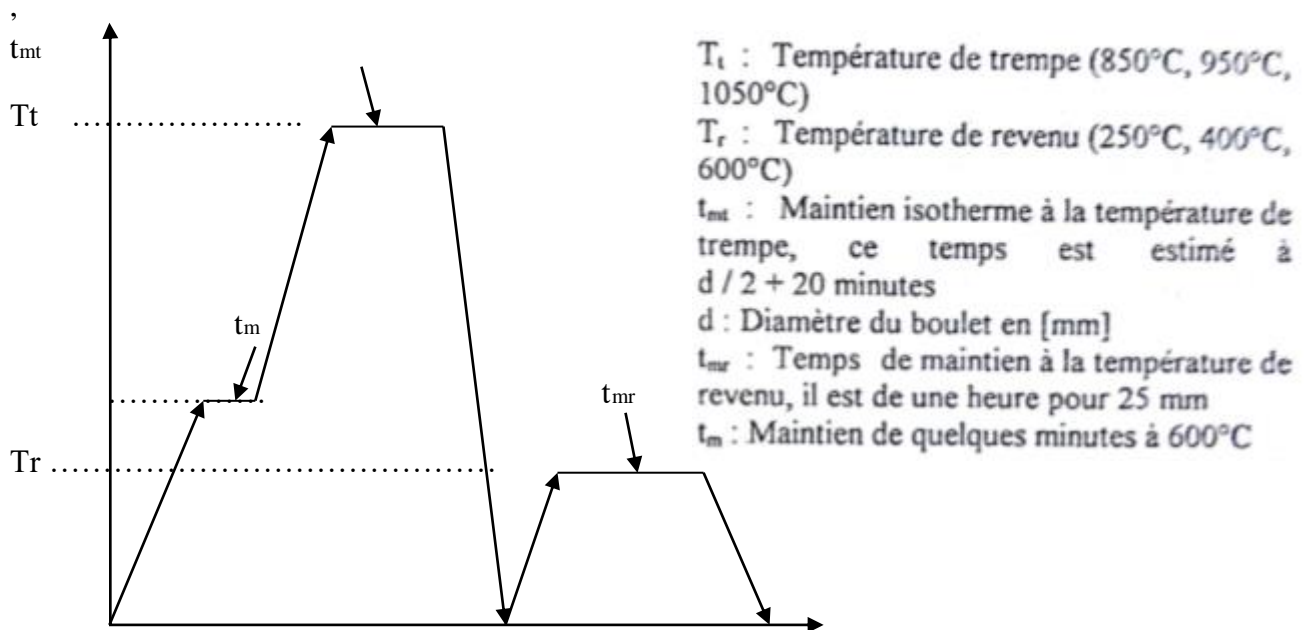


Fig. III.6 :Cycle thermique des trempes et revenus réalisés [13]

La trempe débute par un préchauffage (chauffage lent avec une intensité admissible de 11A) à 600°C pour éviter la formation de fissures dues aux contraintes de chauffage, un maintien de quelques minutes à cette température, puis un chauffage plus rapide (avec une intensité admissible de 19 A) à la température de trempe T_t , un maintien isotherme (t_{mt}) à cette température, suivi par un refroidissement brusque à l'air soufflé ou à l'huile.

Pour l'ensemble à la température de trempe est fonction des dimensions de la pièce ; il doit être suffisamment prolongé jusqu'à l'achèvement des transformations.

Il est de 50 minutes pour les boulets de diamètre 60 et de 1h pour les boulets de diamètre 80

La vitesse de refroidissement des boulets refroidis à l'air soufflé est d'environ 40°C à $60^{\circ}\text{C}/\text{minute}$, tandis qu'elle est égale à $100^{\circ}\text{C}/\text{seconde}$ avec un refroidissement dans l'huile.

La trempe est un traitement thermique très sensible, elle doit être exécutée correctement pour éviter les défauts qui peuvent surgir comme la dureté insuffisante qui résulte d'un chauffage incomplet ou d'un refroidissement lent, l'oxydation et la décarbonisation de la surface qui résulte d'un chauffage sous atmosphère oxydante.

Le revenu des boulets intervient après chaque trempe ; son but est de supprimer partiellement ou complètement les tensions internes dues à la trempe. Il consiste à les chauffer à une température T_r (température de revenu), les maintenir à cette température pendant un temps déterminé t_{mr} , puis les refroidir au four jusqu'à la température ambiante.

Chapitre III: Fabrication des boulets de broyage

Le temps de maintien des boulets de diamètre 60 est de 2h et 30min celui des boulets de diamètre 80 est de 3h et 20min. La vitesse de refroidissement des boulets est de l'ordre de 100C°/heures

La trempe réalisée sur les boulets de broyage permet la formation d'une matrice dure et résistante de martensite par suppression de la transformation normale de l'austénite (matrice obtenue après coulée) en perlite au cours du refroidissement.

Ce traitement favorise la précipitation des carbures dans l'austénite, améliore la trempabilité de l'austénite par suite de la réduction de sa teneur en carbone et augmente le domaine de la transformation martensitique.

La martensite est obtenue par un refroidissement continu et rapide des boulets à partir de la température de trempe. Elle est toujours associée à une certaine quantité d'austénite résiduelle et elle à une microdureté supérieure à 60 HRC.

Le revenu est souvent conseillé après un durcissement par trempe ; Il permet d'adoucir la martensite, de réduire les risques de criquage et la quantité d'austénite résiduelle qui se transforme en martensite.

IV.1 Les techniques expérimentales

IV.1.1 Les boulets utilisés pour les essais

Ces boulets sont employés pour le broyage du ciment dans des broyeurs à deux chambres (chambre de concassage et chambre de finition) séparées par une cloison permettant le passage d'une certaine granulométrie.

La charge broyant dans la première chambre comporte des boulets de diamètres qui varient de 90mm à 60mm tandis que la deuxième chambre, comporte des boulets de 60mm à 20mm de diamètre.

Nous avons choisi des boulets de diamètre 60 et 80 à l'état brut de coulée pour la réalisation de nos travaux. Ils sont pesés et analysés avant d'entreprendre les essais.

Le tableau qui suit fait apparaître certaines données numériques des boulets de différents diamètres [16]

Diamètre des boulets en (mm)	Surface du boulet (cm ²)	Poids unitaire (Kg)
90	254	3.090
80	201	2.150
70	153	1.410
60	113	0.920
50	78	0.550
40	50	0.260
30	28	0.120
25	19	0.065
20	12	0.033

Tab.IV.1 : Caractéristiques des boulets fabriqués par l'E.N.F de TIARET [19].

IV.1.2 Analyses chimiques

Les boulets ont été analysés au début de notre recherche pour pouvoir déterminer leur composition chimique et ainsi spécifier leurs températures de transformation et les traitements thermiques à effectuer pour ces nuances.

Ces analyses étaient réalisées par spectrographie qui présente l'avantage d'être très rapide et donne directement le pourcentage des différents éléments d'alliage y compris le pourcentage du carbone et du fer grâce à un terminal d'ordinateur.

Les échantillons (boulets de diamètres 60 et 80) ont été prélevés de deux charges différentes, coulées à une journée d'intervalle. Les compositions chimiques ont été établies après quatre analyses spectrométriques par charge et trois attaques par analyse.

Les analyses au spectromètre ont été pratiquées sur des surfaces rendues planes après l'enlèvement de quelques millimètres par rectification.

IV.1.3 Essais de dureté

Nous avons réalisé des essais de dureté Rockwell HRC sur des boulets à l'état brut de coulée et après traitements thermiques.

Le pénétrateur est soit une bille en acier (diamètre $D = 1,5875$ ou $3,175$ mm) soit un cône à 120° avec une pointe en diamant de rayon $0,2$ mm. L'essai se déroule de la manière suivante (Fig. IV.1):

1- Une précharge P_0 de $98,07$ N est d'abord appliquée sur la surface par l'indenteur. Elle permet de "faire le zéro" en fixant la profondeur de mesure de référence, h_0 .

2- La surcharge de mesure, P est alors appliquée. Il existe trois valeurs de surcharges normalisées : $490,3$ - $882,6$ et 1373 N.

3- Après un temps de l'ordre de la dizaine de secondes, la charge P est retirée et la profondeur de pénétration de l'indenteur, h' , avec la précharge P_0 maintenue, est mesurée [17].

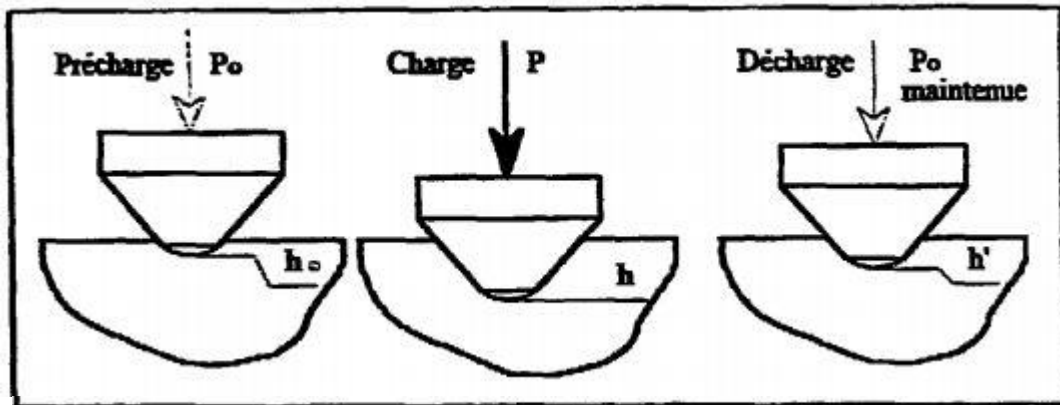


Fig. IV.1 : Déroulement d'un essai de dureté Rockwell [17]

Comme on peut le voir on dispose de trois charges et de trois indenteurs dont la combinaison définit neuf essais dont le détail est donné dans le Tableau ci-dessous :

Indenteur	D=1,587			D=3,175			Cône 120°		
Charges (N)	588,4	980,7	1471	588,4	980,7	1471	588,4	980,7	1471
Type	F	B	G	H	E	K	A	D	C
K	130						100		

Tab.IV.2 : Charges, type d'indenteur et valeur de la constante K pour les essais de dureté Rockwell [17].

La dureté Rockwell est alors donnée par l'expression Fig. IV.1 avec la constante K prenant les valeurs indiquées dans le tableau AJ: $HR = K - h'/2$ (h' en μm) [17]



Fig. IV.2 : Duromètre utilisé pour mesurer la dureté Rockwell

IV.1.4 Etude métallographique

L'étude métallographique est un moyen de contrôler essentiellement la structure micrographique des matériaux métalliques. Toute étude de matériaux métalliques passe presque toujours par l'étude des constituants micrographiques. Ce sont eux qui donnent aux métaux leurs différentes caractéristiques mécaniques. Toutes les étapes de la vie d'un matériau sont concernées par leur mise au point, leur utilisation et leur détérioration par usure.

IV.2 Résultats des essais réalisés sur les boulets de broyage

IV.2.1 Analyse de la composition chimique

Le tableau regroupe les résultats des analyses chimiques effectuées sur des boulets de diamètre 60mm et 80mm

Désignation	Diamètre de boulets	Composition chimique								
		%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu
GX230CrNiMo 16	Ø80	2,20- 2,50	0,40- 0,80	0,40- 0,60	0,06 Max	0,05 Max	16-17	0,20- 0,60	0,20- 0,40	0,20- 0,60
GX260CrNiMo 12	Ø60	2,50- 2,80	0,50- 0,80	0,50- 0,70	0,06 Max	0,05 Max	12-13	0,20- 0,40	0,20 Max	0,20- 0,40

Tab.IV.3 : Composition chimique des alliages étudiés

Ces compositions ont obtenues au cours de fusions différentes et les valeurs représentées sur le tableau indiquent le minimum et le maximum du pourcentage des différents éléments.

Ces nuances se rapportent aux fontes au chrome – molybdène. La première nuance concernant les boulets de diamètre 60 contient entre 12% et 13% de chrome et jusqu'à 0.40% de molybdène. La deuxième concernant les boulets de diamètre 80 contient entre 16% et 17% de chrome et 0.60% de molybdène

IV.2.2 Résultats des essais de dureté

Pour les deux nuances représentées sur le tableau brutes de coulée et pour chaque traitement thermique, nous avons estimé les duretés en fonction de la distance de la surface extérieure pour les boulets de diamètres 60 et 80.

IV.2.2.1 A l'état brut de coulée

La figure représente l'évolution de la dureté HRC en fonction de la distance de la surface pour les boulets bruts de coulée de diamètres 60 et 80.

Cette figure illustre, d'une part, l'influence de l'épaisseur dans laquelle les boulets sont coulés et d'autre part, les répercussions de ce facteur sur la dureté de ces boulets.

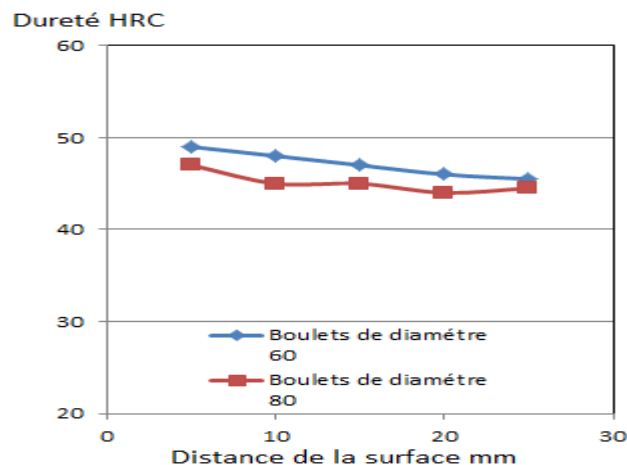


Fig. IV.3: graphe de profil de dureté en fonction de la distance de la surface (boulets à l'état brut de coulée)

IV.2.2.2 Après traitements thermiques

Les mesures des duretés effectuées à différentes températures, de trempe à l'air soufflé et à l'huile et à différentes températures de revenu avec un refroidissement au four sont données par les figures suivantes :

Les figures Fig.IV.4 et Fig.IV.5 permettent de donner une idée sur l'influence des traitements thermiques sur la dureté des boulets de diamètres 60 et 80. Ces mesures ont été réalisées sur des boulets bruts de coulée et traités (trempés et revenus). On remarque immédiatement qu'une application correcte des traitements thermiques permet d'améliorer nettement la dureté des boulets donc l'extension de leur utilisation dans des applications plus sévères et pour lesquelles les boulets bruts de coulée ne sont pas satisfaisants.

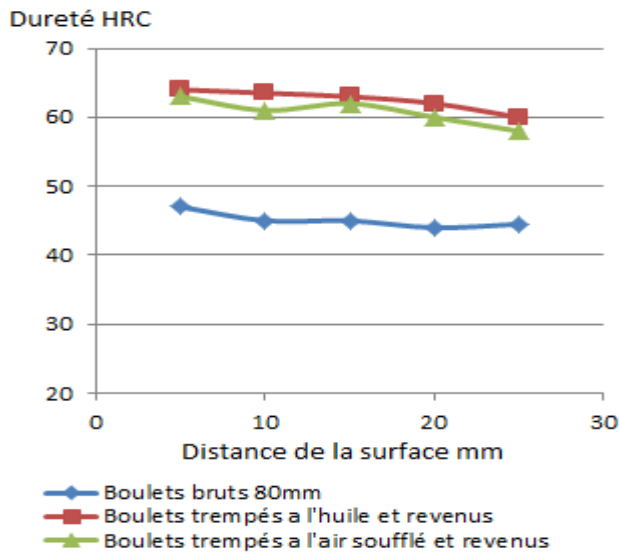


Fig.IV.4 : L'influence de traitements thermiques pour les boulets de diamètre 80

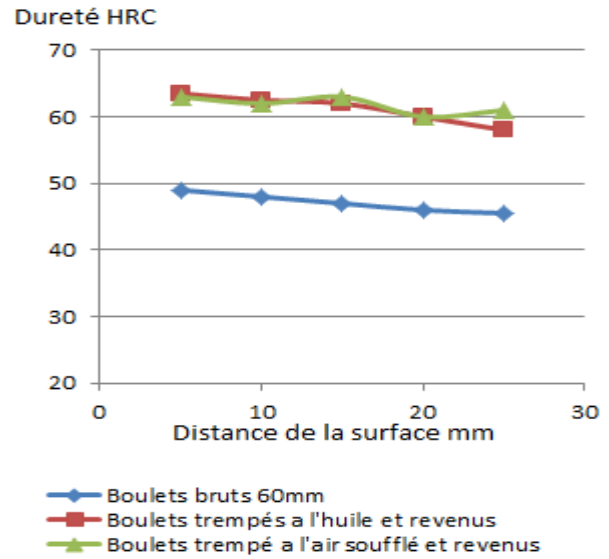


Fig.IV.5 : L'influence de traitements thermiques pour les boulets de diamètre 60

IV.2.2.3 Influence de la température de trempé sur la dureté

Les figures Fig.IV.6 et Fig.IV.7 mettent en évidence l'influence de la température de trempé sur la dureté des boulets de diamètre 60 refroidis à l'air soufflé et l'huile.

Les figures Fig.IV.8 et Fig.IV.9 concernent les boulets de diamètre 80 trempés à l'air soufflé et à l'huile.

Les boulets chauffés à 850C° et 950C° puis refroidis à l'air soufflé ou à l'huile donnent des duretés nettement supérieures à celles des boulets chauffés à 1050C° qui voient leur dureté chuter brusquement.

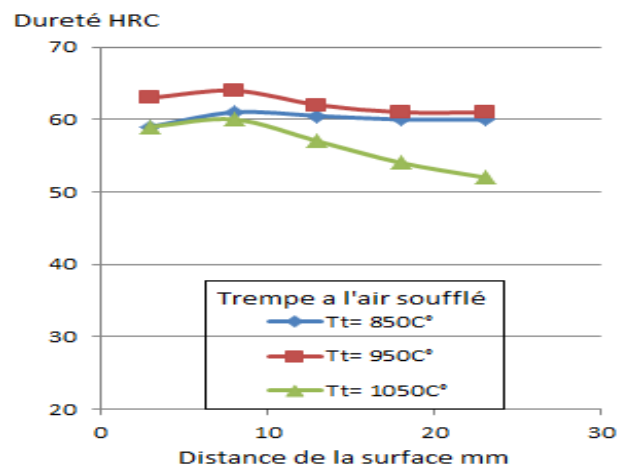
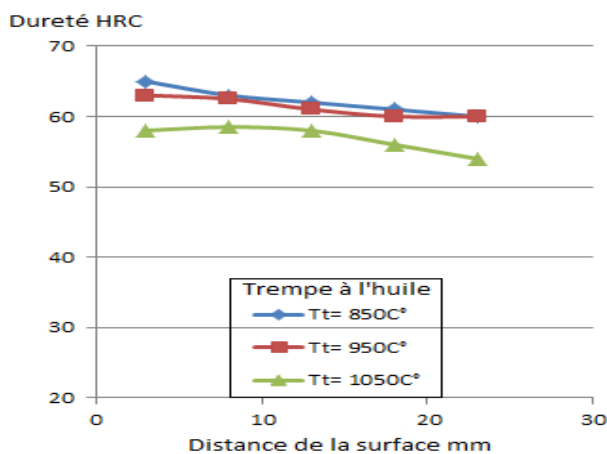


Fig.IV.6;7 : Influence de la température de trempé sur la dureté des boulets de diamètre 60

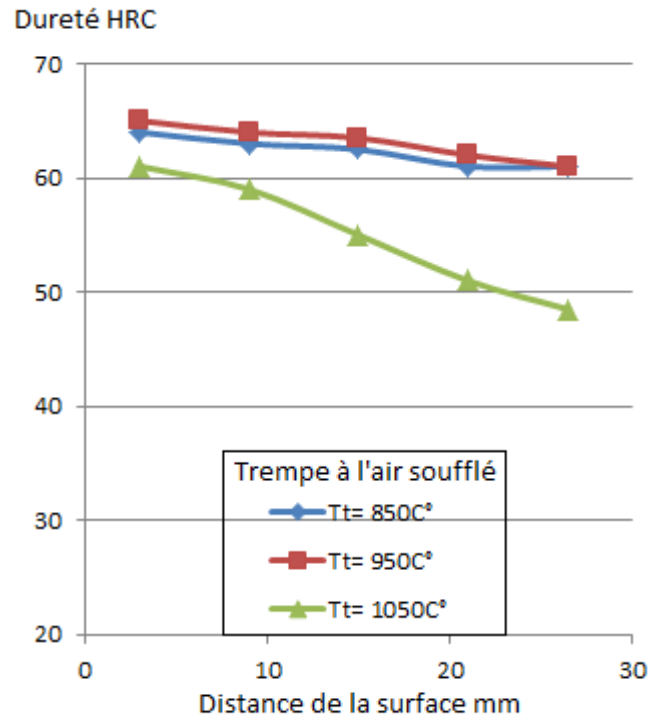
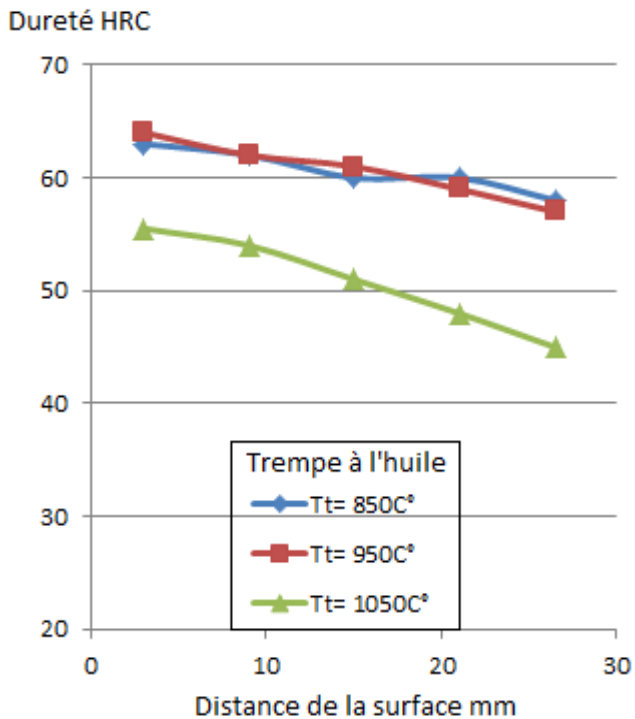


Fig.IV.8;9 : Influence de la température de trempe sur la dureté des boulets de diamètre 80

IV.2.2.4 L'influence de la vitesse de refroidissement sur la dureté

L'évolution de la dureté avec la distance de la surface est portée sur les figures IV.10, IV.11, IV.12 pour les boulets de diamètre 60 trempés à l'air soufflé et l'huile. Les résultats relatifs aux boulets de diamètre 80 font l'objet des figures IV.13, IV.14, IV.15

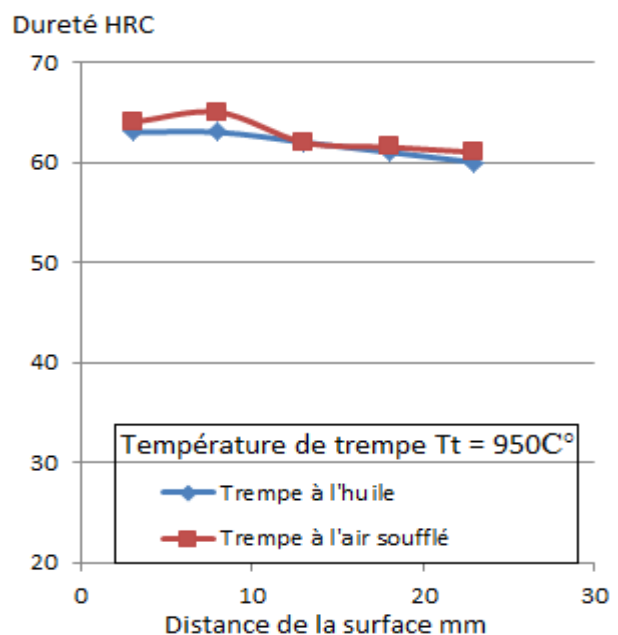
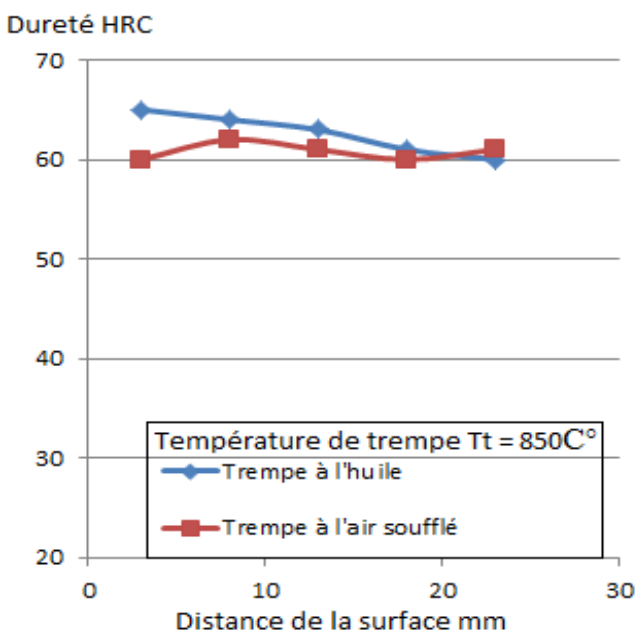


Fig.IV.10;11 : Mise en évidence de la sévérité du milieu de trempe pour les boulets de diamètre 60

Chapitre IV: ETUDE EXPERIMENTALE ET RESULTATS

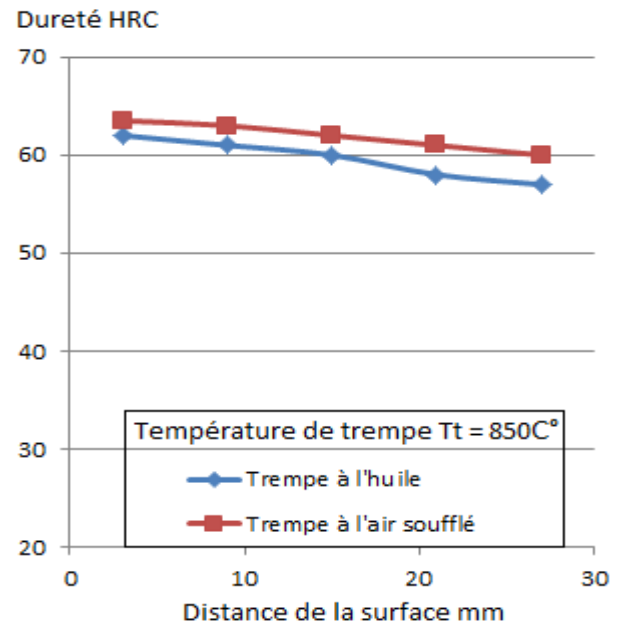
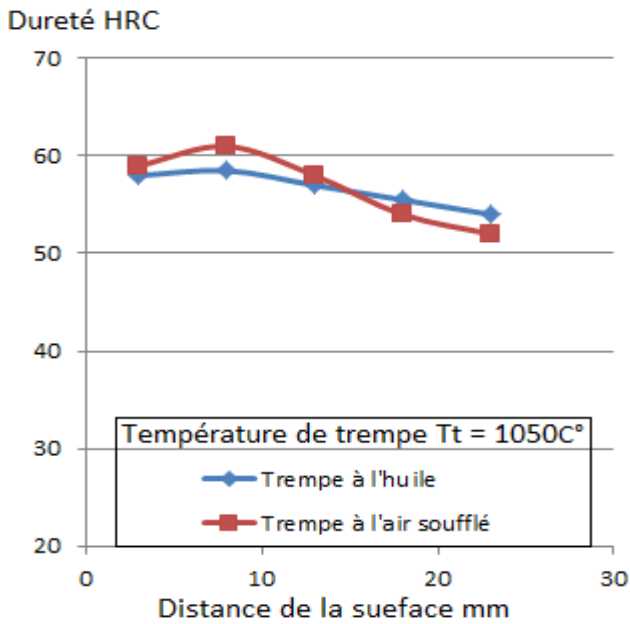


Fig.IV.12 : les boulets de diamètre 60 Fig.IV.13 : les boulets de diamètre 80

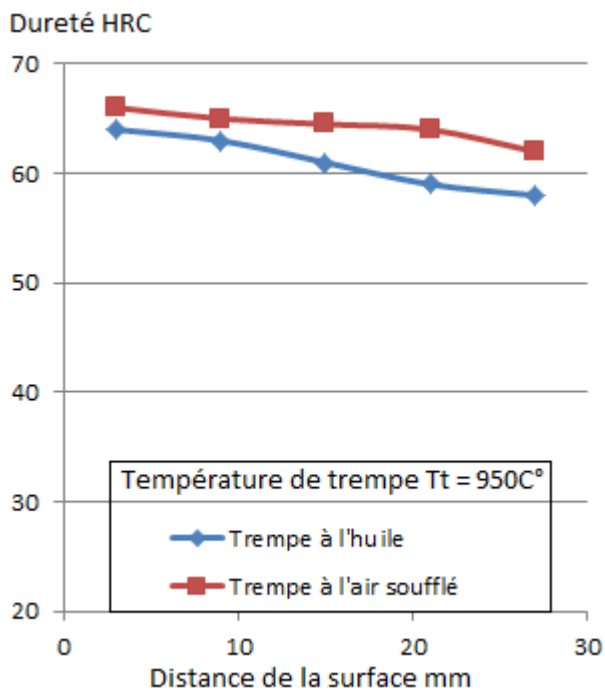


Fig.IV.14 : les boulets de diamètre 80

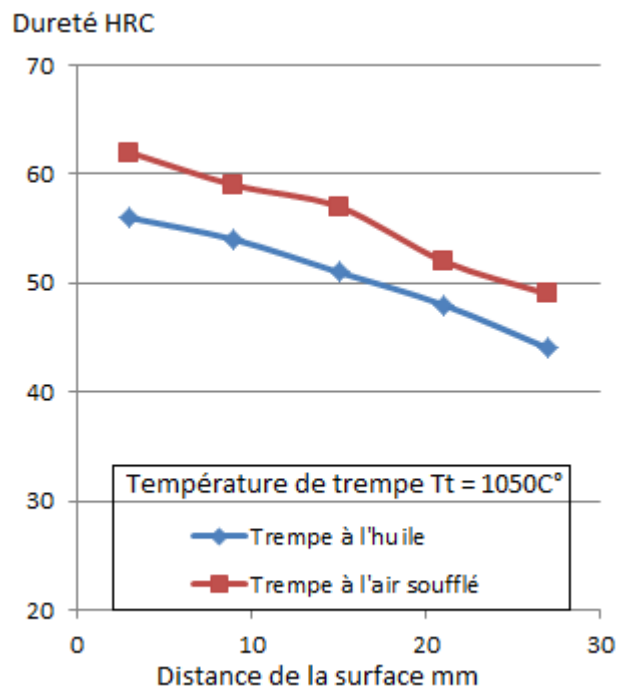


Fig.IV.15 : les boulets de diamètre 80

On remarque que les trempes à l'air soufflé et à l'huile des boulets de diamètre 60 chauffés à $950C^\circ$ et à $1050C^\circ$ n'apportent pas de modifications importantes dans les duretés. Par contre, les boulets chauffés à $850C^\circ$ et trempés à l'huile ont des duretés plus élevées que celles des boulets trempés à l'air soufflé.

Les duretés des boulets de diamètre 80 trempés à l'air soufflé sont nettement supérieures à celles des boulets trempés à l'huile pour différentes températures de trempe.

Chapitre IV: ETUDE EXPERIMENTALE ET RESULTATS

IV.2.2.5 L'influence de la température de revenu sur la dureté

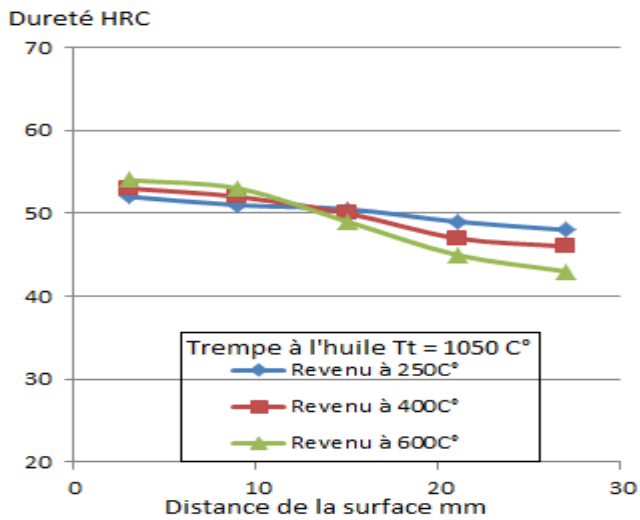


Fig.IV.16 : Boulets de diamètre 80

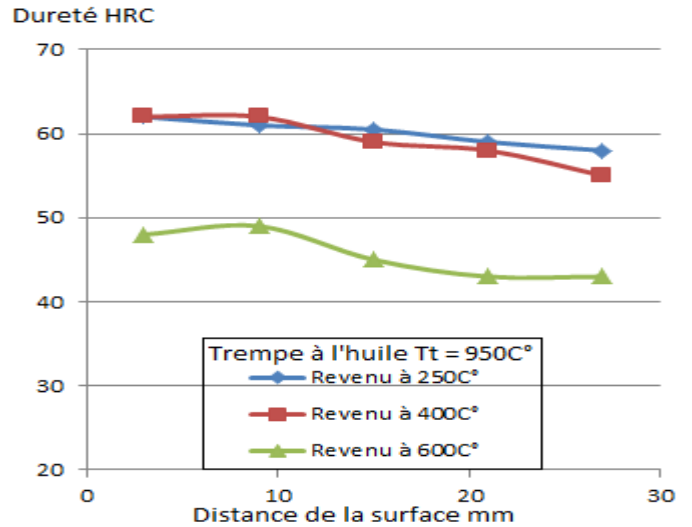


Fig.IV.17 : Boulets de diamètre 80

Les boulets de diamètres 60 et 80 chauffés à 850C° et 950C° et trempés à l'air soufflé et à l'huile voient leurs duretés s'effondrer après un revenu à 600C° .

Ces duretés sont plus élevées après un revenu à 250C° qu'après un revenu à 400C° mais elles restent nettement supérieures à celles relevées après un revenu à 600C° .

Les boulets de diamètre 80 traités à 1050C° trempés à l'air soufflé et à l'huile varient légèrement après un revenu à 250C° , à 400C° et à 600C° .

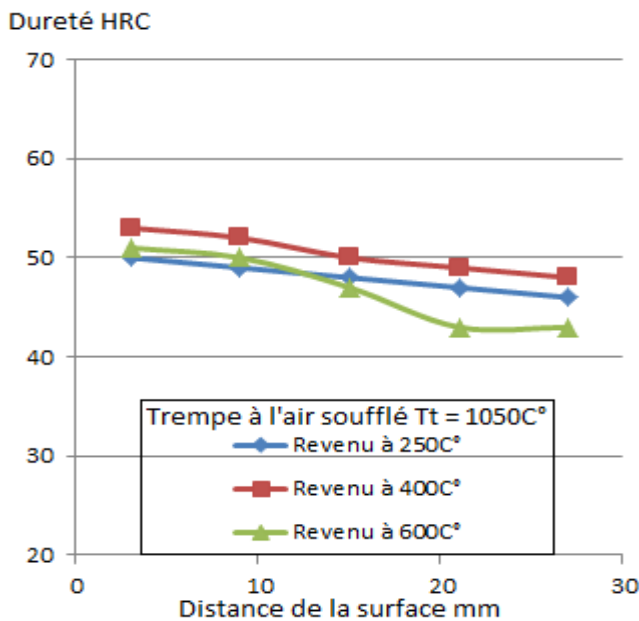


Fig.IV.18 : Boulets de diamètre 60

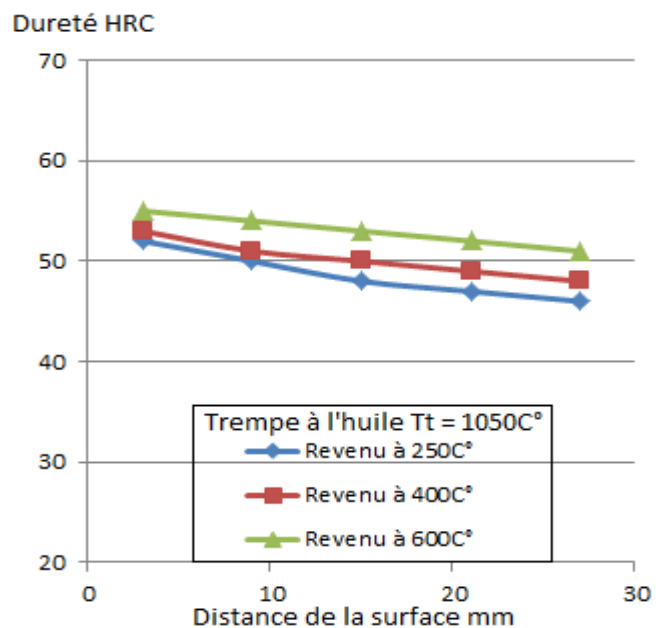


Fig.IV.19 : Boulets de diamètre 60

Chapitre IV: ETUDE EXPERIMENTALE ET RESULTATS

Les boulets de diamètre 60 traités à 1050C° trempés à l'air soufflé et revenus à 400C° ont des duretés légèrement supérieures à celles des boulets revenus à 250C° et 600C°. Contrairement aux boulets trempés à l'huile qui ont de fortes duretés après un revenu à 600C°.

D'une manière générale, les trempes, à l'air soufflé et à l'huile pratiquées à 850C° et 950C° suivies d'un revenu à 250C°, 400C°, des boulets de diamètres 60 et 80 donnent de meilleures duretés que celles des boulets trempés à 1050C° et revenus à 250C°, 400C° et 600C°.

CONCLUSION

l'amélioration des propriétés mécaniques des boulets de broyage est principalement basée sur la variation des températures d'austénitisation, les temps de maintien et les milieux de refroidissement en vue d'obtenir des gammes donnant un produit dur résistant à l'usure par abrasion et peut fragile.

Notre travail a pour objectif de mettre en évidence l'influence des températures d'austénitisation, la température de revenu, et la vitesse de refroidissement sur la dureté d'une fonte fortement allié au chrome utilisé dans la fabrication des boulets de broyage. Dans le but de parvenir à une amélioration des propriétés des boulets de broyage nous avons essayé de définir une température d'austénitisation convenable pour le traitement thermique de trempe.

Selon les traitements thermiques effectués et la caractérisation structurale, microstructurale, nous avons obtenu les résultats suivant :

- La présence des carbures de type M_7C_3 pour tous les traitements thermiques réalisés. le traitement d'austénitisation aux températures de 950°C et 1050°C offrent des duretés élevées.
- L'augmentation ou la diminution des duretés dépend du taux de martensite, plus le taux de la martensite augmente plus la dureté augmente et plus le taux de martensite diminue plus la dureté diminue ce qui augmente le taux de l'austénite résiduelle.

Enfin notre travail a donné le choix d'une température d'austénitisation et un temps de maintien et une vitesse de refroidissement convenables pour améliorer les caractéristiques structurales et microstructurales

Référence Bibliographique :

[1] : P.BROQUET, fontes spéciales alliés, techniques de l'ingénieur, traité de métallurgie M401-1 ; M401-7, 10-1984.

[2] : Michel DUPEUX, Aide-mémoire science des matériaux, Edition Dunod

[3] : Amari Idriss,/ MÉMOIRE DE MAGISTER/Effet des traitements thermiques sur la microstructure d'une fonte fortement allié au chrome utilisé pour la fabrication des boulets de broyage

[4] : Pierre-Jean Cunat / « Aciers inoxydables, critères de choix et structures » / traité « Matériaux métalliques » / Techniques de l'ingénieur, mars 2000 / M4540.

[5] : technique de l'ingénieur : matériaux

[6] : Lamine HATTALI, IUT Cachan – 1ère année Sciences des Matériaux, Université paris sud

[7] : Technique d'ingénieur, M1126, 2011

[8] : M.T. Leger, P. Detrez. Les aspects métallurgiques du traitement thermique des aciers. Notice CTIF (1976), P 31, 38, 42, 43, 56 , 76.

[9] : Guy Murry, 2004, Aide Mémoire Métallurgie, Dunod, Paris

[10] : Alain CORNET, François HLAWKA, Métallurgie mécanique.

[11] : M.DUPEUX, Science des métaux, Edition. Paris 2004.

[12] : SAD-EDDINE Abdelhamid, Optimisation structurale, microstructurale et mécanique d'une fonte allié au chrome utilisé dans la fabrication des boulets de broyage. Thèse doctorat, université A.Mira-Béjaia (2012).

[13] : A.ROOS, B.MILET, Précis de métallurgie appliqué, technique et documentation LAVOISIER, 1992

[14] : Fabrication et dimensionnement en cimenterie, Tome II, 1992

[15] : HENRI DE LEIRIS, métaux et alliages aciers et fontes.

[16] : Documentation technique de l'entreprise Nationale de fonderie de TIARET, Appareil pour essais de perméabilité, 1976

[17] : REZAKHAMX)UR , L'essai de dureté : un essai mécanique a part entière, Février 1993

Liste des figures

	Page
Fig. I.1 : Transformation allotropique du Fer	3
Fig. I.2 : Illustration schématique des principaux constituants des systèmes Fe ₃ -C	4
Fig. I.3 : Diagrammes Fe ₃ -C pour les aciers et les fontes. En pointillés: diagramme stable Fe ₃ -C. En traits pleins : diagramme métastable Fe-Fe ₃ C	5
Fig. I.4 : Diagramme métastable Fe ₃ -C	6
Fig. I.5 : Eléments α -gènes et γ -gènes	8
Fig. I.6 : Acier hypœutectoïde à 0.4%C	9
Fig. I.7 : Acier hypereutectoïde à 1.2%C	9
Fig. I.8 : Acier eutectoïde à 0.77%C	10
Fig. I.9 : Fonte hypoeutectique à 3%C	11
Fig. I.10 : Fonte hypereutectique à 5%C	12
Fig. II.1 : traitement thermique	13
Fig. II.2 : Diagramme de transformation isotherme d'un acier 35CrMo4	15
Fig. II.3 : Évolutions, en fonction du temps, de la température, de la dilatation en peau et à cœur	17
Fig. II.4 : les distorsions subies par un cylindre arbre au cours d'un maintien à haute température, à l'état austénitique	18
Fig. II.5 : Exemple de diagramme TRC (fonte 36NiCrMo16, d'après les travaux de L'IRSID)	21
Fig. II.6 : Exemple de diagramme TTT pour un acier C55 : A = austénite, F = ferrite, C = cémentite, M = martensite [10]	22
Fig. III.1 : Schéma descriptive d'un broyeur à ciment a deux compartiments	37
Fig. III.2 : Schéma descriptif d'un four à induction à creuset	38
Fig. III.3 : Poche avec système de basculement	40
Fig. III.4 : les machines de serrage (1) et de montage (2)	42
Fig. III.5 : Organigramme des traitements thermiques réalisés	45
Fig. III.6 : Cycle thermique des trempes et revenus réalisés	46
Fig. IV.1 : Déroulement d'un essai de dureté Rockwell	49
Fig. IV.2 : Duromètre utilisé pour mesurer la dureté Rockwell	50
Fig. IV.3 : Graphe de profil de dureté en fonction de la distance de la surface (boulets à l'état brut de coulé)	51
Fig. IV.4 : L'influence de traitements thermiques pour les boulets de diamètre 80	52
Fig. IV.5 : L'influence de traitements thermiques pour les boulets de diamètre 60	52
Fig. IV.6;7 : Influence de la température de trempe sur la dureté des boulets de diamètre 60	52
Fig. IV.8;9 : Influence de la température de trempe sur la dureté des boulets de diamètre 80	53
Fig. IV.10;11 : Mise en évidence de la sévérité du milieu de trempe pour les boulets de diamètre 60 (température de trempe 850C° et 950C°)	53
Fig. IV.12 : Mise en évidence de la sévérité du milieu de trempe pour les boulets de diamètre 60 (température de trempe 1050C°)	54
Fig. IV.13;14;15 : Mise en évidence de la sévérité du milieu de trempe pour les boulets de diamètre 80 (température de trempe 850C° 950C° 1050C°)	54
Fig. IV.16 : Evolution de la dureté avec la température de revenu des boulets de diamètre 80 trempé à l'huile 1050C°	55

Fig.IV.17 : Evolution de la dureté avec la température de revenu des boulets de diamètre 80 trempé à l'huile 950C°	55
Fig.IV.18 : Evolution de la dureté avec la température de revenu des boulets de diamètre 60 trempé à l'air soufflé 1050C°	55
Fig.IV.19 : Evolution de la dureté avec la température de revenu des boulets de diamètre 60 trempé à l'huile 1050C°	55

Liste des tableaux

Tab.III.1 : Nuances des fontes blanches au chrome – molybdène	36
Tab.III.2 : Compositions chimiques des fontes blanches au chrome-molybdène	37
Tab.IV.1 : Caractéristiques des boulets fabriqués par l'E.N.F de TIARET	48
Tab.IV.2 : Charges, type d'indenteur et valeur de la constante K pour les essais de dureté Rockwell	49
Tab.IV.3 : Composition chimique des alliages étudiés	50