



UNIVERSITÉ SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH - FÈS

FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du :

Diplôme d'Ingénieur d'Etat

Spécialité : **Conception Mécanique et Innovation**

Développement de deux nuances de la fonte à haute teneur en chrome

Effectué au sein les **Fonderies et Aciéries du Maroc (FAM)**

Service de fusion

Soutenu le 29 juin 2015

Par :

MR. EL BIED Noureddine

Membres de Jury :

encadré par :

Pr. M. EL MAJDOUBI (FSTF)

Pr. M. EL MAJDOUBI (FSTF)

Pr. A. ABOUTAJEDDINE (FSTF)

Dr. A. RADAoui (FAM)

Pr. A. EL BARKANY (FSTF)

Année Universitaire : 2014-2015

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail

*À mes parents, je vous remercie pour tout ce que vous avez
fait pour moi.*

À mes très chers frères et sœurs.

*À tous mes amis : abdelmajid, yazid, zakaria, soufiane,
mounir, radouine.*

À tous mes amis de classe.

REMERCIEMENT

J'aimerais avant tout remercier « ALLAH SWT »

Je tiens à remercier **Mr EL MAJDOUBI Mohammed**, professeur à la FST de FES, qui m'a encadrée tout au long de ce travail, et à qui je suis très reconnaissants pour ses précieux conseils, et pour le grand intérêt qu'il a porté à l'égard de mon projet, pour qu'il soit réalisé dans les meilleures conditions.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et reconnaissance à mon encadrant dans la société FAM, **Dr. H. RADAoui**, responsable l'unité de traitement thermique, pour sa disponibilité et ses conseils, et qui m'ont permis toujours d'avancer dans mon projet, et qui a suivi de près mon travail malgré son responsabilité multiples.

Je voudrais remercier **Pr. A. OUAKI**, professeur de ENIM, pour son aide concernant la caractérisation des échantillons par l'examen métallographique ainsi que l'essai de l'usure. Ma reconnaissance s'adresse également à **MR. A. FARIS**, le directeur technique de FAM, pour son aide, ses explications ainsi que ses conseils précieux.

Mes remerciements sincères vont à l'entreprise FAM, à tout les ingénieurs, les techniciens et les employés qui y travaillent, pour leurs soutient et pour la qualité d'accueil durant toute la période de mon stage.

Je tiens à exprimer mes remerciements à tous les professeurs de la Faculté des Sciences et Techniques de Fés, et plus particulièrement les professeurs du département génie mécanique pour la qualité de son enseignement ainsi que sa disponibilité tout au long de ces trois années de formation.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à **Mr. A. EL BARKANY** et **Mr. A. ABOUTAJEDDINE** de m'avoir honoré en tant que membre du jury du présent projet.

Enfin, je vous remercie toutes les personnes, qui ont contribué de loin ou de près à la concrétisation de ce travail.

RÉSUMÉ

Ce rapport présente le travail réalisé dans le cadre du projet de fin d'étude PFE que j'ai effectué au sein de la société Fonderie et Aciéries du Maroc (FAM). Le stage s'est déroulé au sein du service de la fusion, au niveau du laboratoire métallique de FAM.

L'objectif de ce projet est le développement de la fonte à haute teneur en chrome à 17% et 27% de chrome. Il se base sur la caractérisation métallographique et l'étude du comportement mécanique de la fonte au chrome suivi d'un cycle de traitement thermique. Ces fontes sont utilisées principalement pour la fabrication des pièces nécessaires à l'usure dans le domaine de minier, cimentier, sidérurgique... Leur propriété de travailler à l'usure est liée à la présence des carbures de chrome. Ils sont très durs et supportées par une matrice sur laquelle se trouve ces carbures.

Les points abordés sont :

- Procédé élaboration des pièces de la fonte au chrome dans la fonderie ;
- Caractérisation et les propriétés de la fonte à haute teneur en chrome;
- L'étude expérimentale où les analyses suivantes ont été pratiquées :
 - Analyse de la composition chimique
 - Procédés de traitement thermique
 - Examen métallographique
 - Essai de dureté
 - Essai de l'usure par abrasion

Les résultats obtenus ont montré l'effet de chrome sur la microstructure de la fonte ainsi que sur le comportement mécanique. L'augmentation de chrome entraîne l'apparition des carbures eutectiques et des matrices hors équilibre. Deux types de carbures de chrome ($(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$, $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$) et une matrice sur laquelle se trouve ces carbures. Cette matrice changée par le changement du type de traitement thermique. Les essais de l'usure ont montré que la meilleure résistance de l'usure a été obtenue par la fonte à 27% de Chrome.

ABSTRACT

This report presents the work done in the final project of study that we conducted in the company (Fonderie et Aciéries du Maroc) FAM. Our course took place at the service of the merger particularly at FAM metal laboratory.

The objective of this project is the development of a shade of cast high chromium content of 17% and 27% chromium. It is based on the metallographic characterization and mechanical behavior study of melting chromium followed by a heat treatment cycle. These fonts are used primarily for the manufacture of parts that wear working in the field of mining, cement, steel. Their property to work wear are linked to the presence of chromium carbides, they are very hard and supported by a matrix on which is these carbides.

The topics are:

- Process development of the Iron TM;
- Characterization and properties of cast high chromium content;
- The experimental study, we performed the following analyzes:
 - Analysis of the chemical composition
 - Thermal treatment processes
 - Metallographic examination
 - Hardness test
 - Impact test
 - Test of abrasive wear

The results showed the effect of chromium on the microstructure of the cast iron as well as on the mechanical behavior. Increasing chromium causes the appearance of eutectic carbides and dies off balance. Two types of chromium carbides ((Fe, Cr) 7C3, (Fe, Cr) 23C6) and a die on which these carbides is, this matrix changed by the heat treatment type change. Testing of wear have shown that the best resistance to wear was obtained by melting at 17% chromium, however the improved impact strength was obtained by melting at 27% chromium.

TABLE DES MATIÈRES

Dédicace.....	II
Remerciement.....	III
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
Introduction.....	XII
Chapitre 1.....	1
I. Présentation de l'organisme d'accueil.....	2
I.1 Présentation de l'entreprise.....	2
I.1.1 Histoire de l'entreprise.....	2
I.1.2 Fiche technique.....	3
I.1.3 Domaines d'activité de FAM.....	3
I.1.4 Moyens de production et ressources humaines.....	4
I.1.5 Organigramme de FAM.....	5
I.2 Présentation du projet.....	7
I.2.1 Mission.....	8
I.2.2 Planification du projet.....	8
I.3 Conclusion.....	9
Chapitre 2.....	10
II. Procédé d'élaboration de la fonte.....	11
II.1 Procédé de moulage.....	11
II.2 Domaine d'application.....	12
II.2.1 Les différentes étapes de la fabrication de pièces en fonte.....	13
II.2.2 Finition.....	19
II.2.3 Traitement thermique des fontes.....	20
II.2.4 Usinage.....	21
II.2.5 Contrôle de qualité.....	22
II.3 Vocabulaire technique utilisé dans l'atelier de fonderie.....	22
II.4 Conclusion.....	23
Chapitre 3.....	23
III. Les caractéristiques de la fonte à haute teneur au chrome.....	24
III.1 Introduction.....	24
III.2 Différents types de fontes.....	25
III.2.1 Fontes blanches.....	25
III.2.2 Fonte grise.....	27

III.3	Fontes à haute teneur au chrome.....	28
III.4	Fontes à forte teneur en chrome avec addition de molybdène	29
III.5	Les propriétés de la fonte à haute teneur au chrome.....	30
III.5.1	Propriétés physiques.....	30
III.5.2	Propriétés mécaniques.....	31
III.6	Diagramme de phase.....	31
III.6.1	Diagramme fer-carbone	31
III.6.2	Diagramme fer-chrome	32
III.6.3	Diagramme ternaire Fe-C-Cr	33
III.7	Description des différentes phases microstructurales des fontes.....	35
III.8	Facteurs influençant la constitution et la microstructure des fontes	38
III.9	Influence des éléments sur la structure des fontes :	39
III.10	Mode d'usure.....	41
III.10.1	Usure abrasive	41
III.11	Conclusion.....	43
	Chapitre 4.....	44
	IV. Techniques Expérimentales de caractérisation :.....	45
IV.1	Introduction.....	45
IV.2	Préparation des échantillons.....	45
IV.3	Analyse chimique	47
IV.3.1	Démarche d'analyse chimique	48
IV.4	Cycle de traitement thermique.....	49
IV.4.1	Normalisation	49
IV.4.2	Trempe.....	50
IV.4.3	Revenu.....	52
IV.5	Examen métallographique	53
IV.6	Les essais mécaniques	54
IV.6.1	Essai de dureté	54
IV.7	Usure par abrasion	57
	Chapitre 5.....	59
	V. Résultats et Discussions	60
V.1	Introduction.....	60
V.2	Analyse chimique	60
V.2.1	Composition chimique de la fonte de base à 17% de chrome	60
V.2.2	Composition chimique de la fonte de base à 27% de chrome	61

V.3	Formation des carbures dans les fontes au chrome	61
V.4	Examen Métallographie.....	62
V.4.1	Microstructure de la fonte à 17% Cr (F1)	63
V.5	Interprétation de l'examen métallographie de la fonte à 17% Cr (F1)	67
V.5.1	Microstructure de la fonte à 27% Cr (F2)	68
V.6	Interprétation de l'examen métallographie de la fonte à 27% Cr (F2)	70
V.7	Analyse mécanique	71
V.7.1	Dureté.....	71
V.7.2	Relation entre la dureté Rockwell C et la résistance à la traction.....	72
V.7.3	L'essai de l'usure.....	74
	Conclusion générale	76
	Référence bibliographique.....	77

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: les domaines d'activité de FAM.....	4
Figure I-2: types de moulage de FAM.....	5
Figure I-3: Organigramme de la société FAM.....	6
Figure I-4: disposition des différentes sections de l'entreprise.....	6
Figure I-5: les zones les plus sollicitées des pièces d'usage en broyeur et en concasseur.....	7
Figure I-6: diagramme GANTT du projet de fin d'étude.....	9
Figure II-1: les composants du moule.....	11
Figure II-2: schéma de principe de la fabrication de pièces de fonderie.....	11
Figure II-3: les pièces de fonte au chrome.....	12
Figure II-4: le processus de fabrication des pièces moulées.....	13
Figure II-5: le plan et le modèle en bois de la pièce.....	14
Figure II-6: schéma du châssis.....	14
Figure II-7: application et flambage de l'enduit sur l'empreinte.....	14
Figure II-9: schéma présentant le processus de fusion.....	15
Figure II-8: Four à l'induction.....	15
Figure II-10: Différents types d'énergie utilisée.....	16
Figure II-11: poche de manutention.....	17
Figure II-12: four à l'induction.....	18
Figure II-13: opération de préparation de la fusion.....	18
Figure II-14: la coulée du métal fondu.....	19
Figure II-15: opération de grenailage.....	20
Figure II-16: opération d'ébarbage.....	20
Figure II-17: traitement thermique des pièces de la fonte.....	21
Figure II-18: l'opération de l'usinage.....	22
Figure II-19: schéma explicatif du vocabulaire technique.....	22
Figure III-1: classification des fontes à l'échelle industrielle.....	25
Figure III-2: la microstructure de la fonte blanche.....	26
Figure III-3: la microstructure de la fonte malléable ferritique.....	26
Figure III-4: la microstructure de la fonte graphite lamellaire.....	27
Figure III-5: la microstructure de la fonte graphite sphéroïdal.....	28
Figure III-6: les propriétés mécaniques de la fonte GV.....	28
Figure III-7: diagramme de phase fer-carbone.....	32
Figure III-8: diagramme d'équilibre des alliages binaires fer-chrome d'après Bain et Aborn.....	33
Figure III-9 : diagramme ternaire Fe-C-Cr à 1300°C.....	34
Figure III-10: diagramme d'équilibre Fe-C-Cr à 880°C.....	34
Figure III-11: Micrographie de l'austénite.....	35
Figure III-13: Micrographie de perlite.....	36
Figure III-12: caractéristiques mécaniques principales de la perlite.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure III-14: structure de la cémentite.....	36
Figure III-15: Micrographie de ferrite aciculaire et granulaire.....	37
Figure III-16: schéma illustré l'usure par abrasion.....	42
Figure III-17: l'abrasion relative en fonction de la dureté de Brinell, test sur les matériaux ferreux.....	43
Figure IV-1: les éprouvettes.....	46
Figure IV-2: éprouvettes de la fonte au chrome à 17% (F1).....	46
Figure IV-3: éprouvettes de la fonte au chrome à 27% Cr (F2).....	47

Figure IV-4: spectromètre à émission optique	48
Figure IV-5: pastille de l'analyse chimique.....	49
Figure IV-6: Cycle du traitement thermique de la normalisation de la fonte à 17% de chrome	50
Figure IV-7: Cycle du traitement thermique de la normalisation de la fonte à 27% de chrome	50
Figure IV-8: Cycle du traitement thermique de la trempe de la fonte à 17% de chrome	51
Figure IV-9 : Cycle du traitement thermique de la trempe de la fonte à 27% de chrome	51
Figure IV-10: Cycle traitement thermique de revenu de la fonte 17% Cr.....	52
Figure IV-11: Cycle traitement thermique de revenu de la fonte 27% Cr.....	52
Figure IV-12: le microscope de l'étude métallographique	53
Figure IV-13: Amélioration de l'état de surface dans le plan d'observation	54
Figure IV-14: principe de l'essai de dureté HRC.....	55
Figure IV-15: Duromètre Equotipe	55
Figure IV-16 : schéma de l'installation de l'usure par abrasion	57
Figure IV-17: dispositif utilisé pour l'essai de l'usure par abrasion	58
Figure V-1: répartition le pourcentage des carbures	62
Figure V-2: microstructure de la fonte 1 à l'état brut de la coulée. Gr: 6×20	63
Figure V-3: microstructure de la fonte à l'état brut de la coulée. Gr: 12×20	63
Figure V-4: microstructure de la fonte 1 après la normalisation. Gr : 6×10	64
Figure V-5: microstructure de la fonte 1 après la normalisation. Gr : 12×20	64
Figure V-6: microstructure de la fonte 1 après normalisation + trempe. Gr : 10×6.....	65
Figure V-7: microstructure de la fonte 1 après normalisation + trempe. Gr : 10×6.....	65
Figure V-8: microstructure de la fonte 1 après normalisation + trempe. Gr : 10×6.....	66
Figure V-9: microstructure de la fonte 1 après normalisation + trempe. Gr : 10×6.....	66
Figure V-10: microstructure de la fonte 2 à l'état brut. Gr : 100	68
Figure V-11: microstructure de la fonte 2 après la normalisation. Gr : 200	68
Figure V-12: microstructure de la fonte 2 après la normalisation. Gr : 400	69
Figure V-13: microstructure de la fonte 2 normalisée + trempée. Gr : 200.....	69
Figure V-14: microstructure de la fonte 2 normalisée + trempée. Gr : 400.....	69
Figure V-15: microstructure de la fonte 2 après normalisation + trempe + revenu. Gr :100.....	70
Figure V-16: microstructure de la fonte 2 après normalisation + trempe + revenu. Gr :200.....	70
Figure V-17: résultats de la dureté HRC des échantillons étudiés.....	72
Figure V-18: résultats de la résistance mécanique R_m des échantillons étudiés	73
Figure V-19: résultats de la perte de masse des échantillons étudiés.....	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: fiche technique de FAM.....	3
Tableau III-1: coefficient de dilatation thermique de la fonte au chrome.....	30
Tableau III-2: conduction thermique de la fonte au chrome	30
Tableau III-3: la densité de la fonte au chrome	30
Tableau III-4: les propriétés mécaniques de la fonte au chrome.....	31
Tableau IV-1: échantillons de l'analyse.....	45
Tableau V-1: la composition chimique de la fonte à 17% de Cr.....	60
Tableau V-2: la composition chimique de la fonte à 27% Cr	61
Tableau V-3: Mesure de dureté de la fonte à 17% Cr (F1).....	71
Tableau V-4: Mesure de dureté de la fonte à 27% Cr (F2).....	71
Tableau V-5: les valeurs de la résistance à la traction.....	73
Tableau V-6: Les valeurs de la résistance à la traction de la fonte 2	73
Tableau V-7: variation de la perte de masse après l'usure par abrasion de la fonte 1	74
Tableau V-8: variation de la perte de masse après l'usure par abrasion de la fonte 2.....	74

ÉQUATIONS

Équation IV-1: perte de masse	57
Équation V-1: Ajuste le pourcentage de carbure eutectique dans les fontes au chrome	61
Équation V-2: relation entre la dureté de Rockwell C et la résistance à l'attraction.....	72

TABLE DES ABRÉVIATIONS

HRC	Dureté Rockwell cône
HV	Dureté Vickers
α	Ferrite
γ	Austénite
$\acute{\alpha}$	Martensite
E	Module de rigidité
Rm	Résistance à la traction
TTH	Traitement thermique
Gr	Grossissement
C	Carbone
Cr	Chrome
Mn	Manganèse
p	Phosphore
Fe	Fer
Mo	Molybdène
Ni	Nickel
Mg	Magnésium

INTRODUCTION

L'industrie de la métallurgie au MAROC constitue une activité économique importante amenée à se développer d'une manière croissante au cours des prochaines années. Le marché

marocain, ainsi que les opportunités d'export, offrent en effet des perspectives de développements prometteuses.

La stratégie de FAM vise à combler le besoin actuel et prochain du marché par la mise en place des moyens technologiques et techniques susceptibles de satisfaire et répondre aux besoins de ses clients en garantissant la qualité du produit.

L'industrie de cimenterie nécessite des équipements et des pièces à haute performance qui doivent avoir une meilleure résistance lors de fonctionnement les broyeurs et les concasseurs. Pour assurer une longue durée de vie ces équipements ils doivent avoir les bonnes caractéristiques mécaniques et métallographiques.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude qui a pour l'objectif de développer deux nuances de la fonte à haute teneur en chrome : caractérisation métallurgie et l'étude du comportement mécanique de la fonte au chrome suivi d'un cycle de traitement thermique.

La fonte est l'une des alliages destinés à la fonderie. Les fontes se distinguent des autres alliages par leurs excellentes propriétés mécaniques. Avec l'industrialisation, la fonte est devenue un matériau très important et ceci a permis à ces dernières années d'accéder à de nouveaux domaines d'application pour les produits de la vie quotidienne. Parmi les fontes, qu'on retrouve dans l'industrie, c'est les fontes à haute teneur en chrome qui se caractérisent par une excellente résistance à l'usure et corrosion.

Divers études ont été effectuées pour améliorer le comportement des fontes actuellement utilisées. Elles sont, dans la plus part du temps, conduit par des laboratoires industrielles de la fonderie, dont l'objectif essentiel d'examiner la possibilité de développer une nuance de la fonte au chrome et améliorer les propriétés de résistance à l'usure par l'abrasion de ces fontes.

L'addition du chrome est très largement employée en métallurgie des fontes pour la stabilité et la dureté de ses carbures et pour l'amélioration notamment de sa résistance à l'usure par abrasion. Le pourcentage du chrome se trouve généralement soit associée ou non à d'autres éléments d'alliage, varie entre 0 et 32%.

Les fontes à forte teneur en chrome sont produites dans la fonderie par le bain des fours à induction, elles sont destinées pour produire des pièces qui peuvent résister à l'usure.

L'augmentation de la dureté est observable et remarquable lorsque la teneur en chrome augmente par ce qu'elle entraîne disparition de graphite et l'apparition de carbures libre dans la matrice.

Le plan de travail comporte les parties suivant :

Le premier chapitre consiste à donner une idée générale sur l'organisme d'accueil ainsi que le cadre général du projet.

Le deuxième chapitre est consacré à la procédure d'élaboration des pièces de la fonte à haute teneur en chrome.

Le troisième chapitre est réservé au cadre théorique et aspects généraux qui revêtent les caractéristiques et les propriétés de la fonte à haute teneur en chrome destinée à l'usure.

Le quatrième chapitre traite les différentes techniques expérimentales utilisées dans ce travail. Il s'agit de l'analyse de la composition chimique de la fonte de base, l'examen métallographique, les essais mécaniques (dureté, usure) ainsi que le cycle de traitement thermique.

Le dernier chapitre présente les résultats trouvés et les interprétations.

Une conclusion générale.

CHAPITRE 1

PRÉSENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

Vous trouverez dans le premier chapitre :

- ✕ Présentation de l'organisme d'accueil
- ✕ L'objectif entendu du projet ainsi la planification du projet

I. Présentation de l'organisme d'accueil

I.1 Présentation de l'entreprise

I.1.1 Histoire de l'entreprise

Société créée par les industriels français, au début de la 2^{ème} guerre mondiale, pour apporter un soutien aux unités industrielles basées au Maroc, en pièces de rechange. La société fonderie était la première dans le domaine de la fonderie.

L'usine a été construite dans la nouvelle zone industrielle à Ain Sebâa, en association avec les Aciéries pour apporter la technologie de l'acier d'où la création de la société Fonderies et Aciéries du Maroc (FAM).

FAM s'est tracée une politique d'investissement en matériels lui assurant une grande souplesse afin de répondre aux demandes diversifiées de ses clients, et avec des délais courts tout en garantissant une qualité répondant aux normes internationales.

Fonderies et Aciéries du Maroc dont l'origine remonte à 1940, est implantée à Casablanca, le centre industriel du pays. Pour répondre aux besoins les plus exigeants de ses clients, FAM poursuit sa politique d'investissement dans du matériel moderne et performant.

FAM est certifiée ISO 9001/2008 et TUV, elle fabrique et commercialise des pièces coulées en fonte, fontes alliées, fontes spéciales et les aciers, elle s'est spécialisée et réussi entre à la fabrication des pièces résistantes à l'usure et à l'abrasion avec des alliages des hautes performances. Riche de ses 70 ans d'expérience, de ses équipements modernes et performants et de ses hommes qualifiés, FAM est un leader à l'échelle nationale et un opère à l'échelle internationale.

Environ de 60% de sa production est destinée à l'export, 51% pour l'Europe et 9% pour l'Afrique.

FAM assure une formation permanente de son personnel, elle met à la disposition de sa clientèle :

- Un département d'étude.
- Un département de produit et d'équipement.
- Un laboratoire de contrôle.

La devise de la Société FAM est :

- La qualité
- L'innovation
- Le service

I.1.2 Fiche technique

Raison sociale	Fonderies et Aciéries du Maroc (FAM)
Domaine d'activité	Fabrication et commercialisation des pièces coulées en fonte et en acier
Forme juridique	Société Anonyme
Année de création	1949
Capital	9 100 000.00 DHS
Site et adresse	Le site de la FAM concerné par la certification.
Superficie	17000m ² dont 1500m ² sont couverts
Adresse	19, chemin des pivoines Ain Sebâa, BP : 13654
Tél/Fax	0522.35.58.88/0522.35.39.63
Email	fam@wanadoo.net.ma

Tableau I-1: fiche technique de FAM

I.1.3 Domaines d'activité de FAM

D'une manière générale, le domaine de la fonderie comprend trois segments de marché :

- L'automobile (attractif en volume et technicité mais plus difficilement à pénétrer).
- Les produits industriels vendus par affaires (auprès des cimenteries, travaux publics, les mines) qui est une activité de maintenance industrielle.
- Les produits industriels vendus en grandes séries (raccords, robinetterie) qui exige que l'entreprise dépasse un seuil critique nécessitant de lourds investissements.

La fonderie au Maroc travaille presque exclusivement pour le deuxième segment.

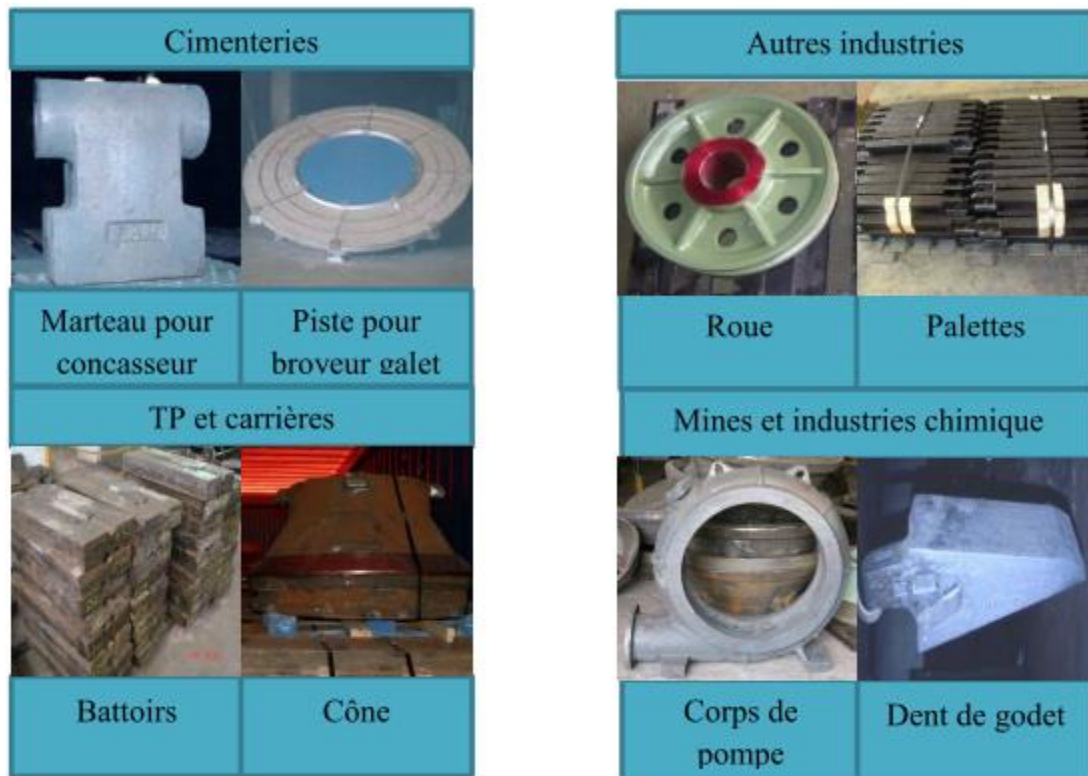


Figure I-1: les domaines d'activité de FAM

I.1.4 Moyens de production et ressources humaines

La direction de FAM identifie et fournit les moyens nécessaires pour assurer la qualité des produits et services offerts à ses clients. Ces moyens incluent entre autres :

❖ Principaux moyens de fabrication et de contrôle

• Fusion

- 2 Fours à induction 2 x 4 000kg
- 2 Fours à induction 2 x 500kg
- 1 Four à induction 1x1 000kg

• Laboratoire

- 2 Spectromètres à émission
- 1 Appareil de contrôle non destructif à ultrasons
- 1 Microscope
- 1 Appareil de contrôle de l'austénite résiduelle ressuage
- Équipement complet pour le contrôle de sable

• Moulage

Atelier entièrement équipé pour la réalisation et la remise en état des outillages de fonderie en bois et en résine



Figure I-2: types de moulage de FAM

- **Moulage**

- 1 Chantier carrousel pour le moulage des pièces, moyenne séries inférieures à 200kg
- 1 Chantier fast loop semi-automatique de moulage chimique pour les pièces allant jusqu'à 4 000kg
- 1 Chantier moulage main, de sable durci à froid pour les pièces allant jusqu'à 7000kg
- 1 Installation de régénération mécanique et thermique de sable

- **Traitement thermique**

- 2 Fours de traitement automatiques capacité 5000kg chacun, munis de manipulateurs et gérés par automates programmables pour :
 - Normalisation
 - Trempe eau
 - Trempe air
 - Revenu

- **parachèvement**

Divers équipements de moulage et de finition.

Grenailleuse de capacité 3000kg.

Machine à meuler pour le surfacage des pièces.

Presse 400T pour le redressage.

- **Usinage**

Atelier équipé pour l'usinage des pièces allant jusqu'à 2500mm de diamètre

Différentes sections de production

I.1.5 Organigramme de FAM

L'organigramme de la société FAM est une représentation schématique des liens fonctionnels, organisationnels et hiérarchiques (Figure 3). Il indique la répartition des responsabilités des tâches entre les postes, et les relations de commandement qui existent entre eux. Il est de type hiérarchique ou matriciel.

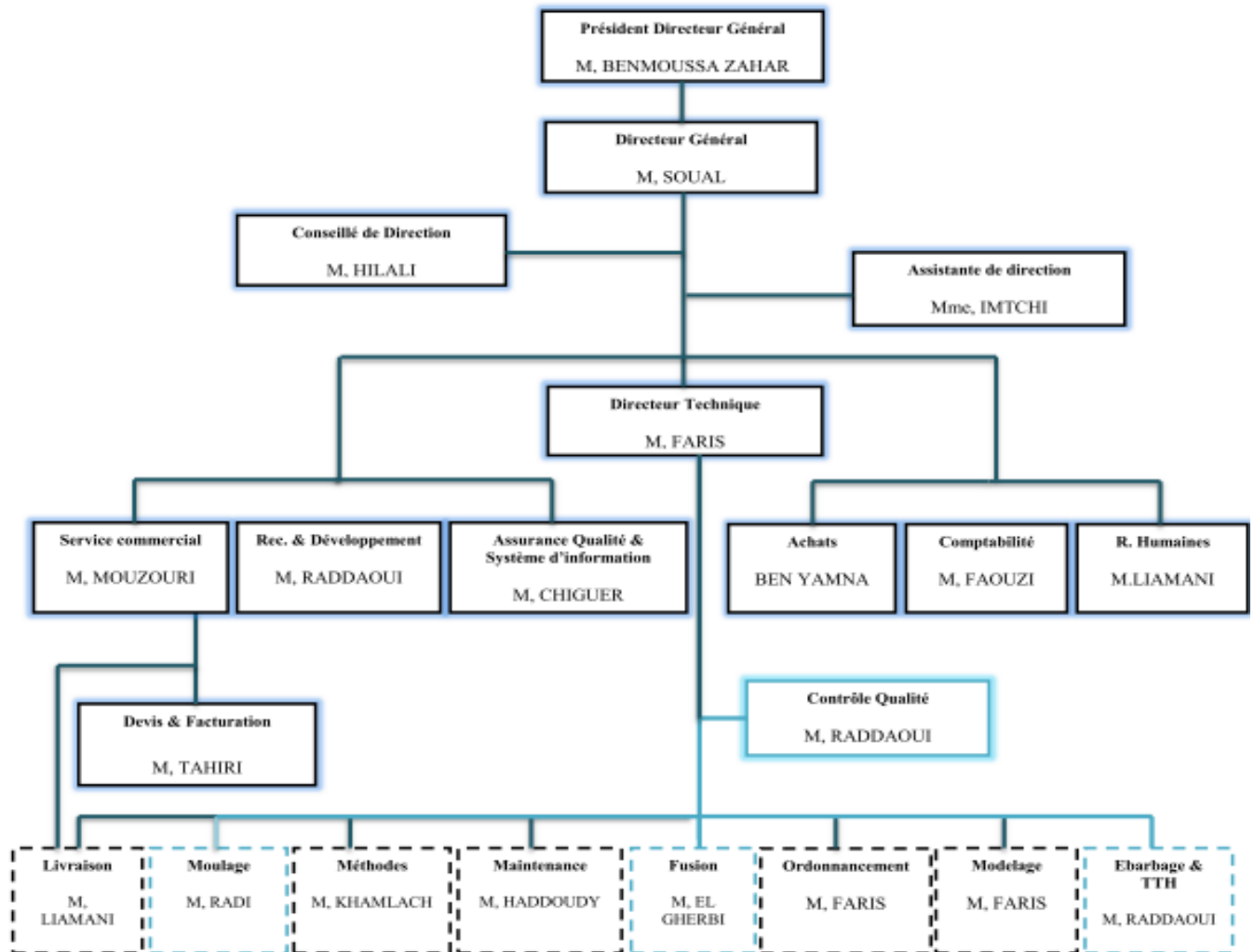


Figure I-3: Organigramme de la société FAM

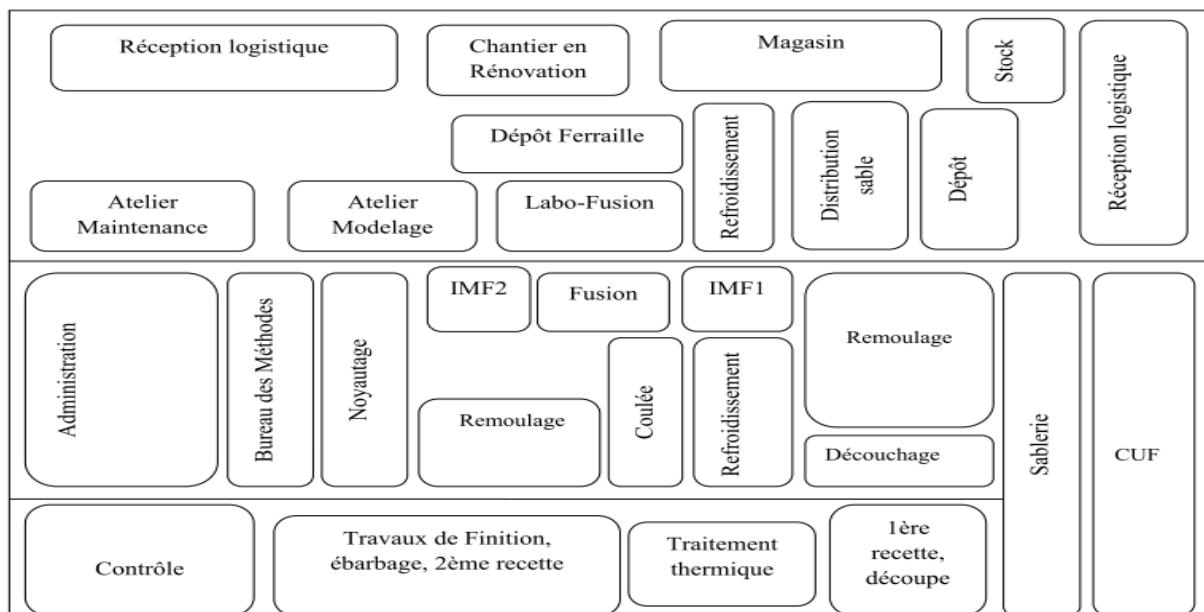


Figure I-4: disposition des différentes sections de l'entreprise

I.2 Présentation du projet

Les mâchoires, les pièces pour broyeur à bille, battoires et barreaux de concasseurs sont des pièces moulées de grande masse et de grandes dimensions en fonte à haute teneur en chrome de différentes nuances.

Ce sont parmi les pièces les plus sollicitées lors du fonctionnement des appareils de fragmentation, donc elles ont un impact direct sur le facteur de la production tels que la qualité, les coûts, la capacité...

La figure au-dessous montre le fonctionnement des pièces d'usage en broyeur et en concasseur. Pour assurer une longue durée de vie, ces pièces doivent avoir les bonnes caractéristiques mécaniques et métallographiques pour résister en cours de service.

L'usure par abrasion est parmi la plus importante forme de défaillances des pièces, subie par une action mécanique.

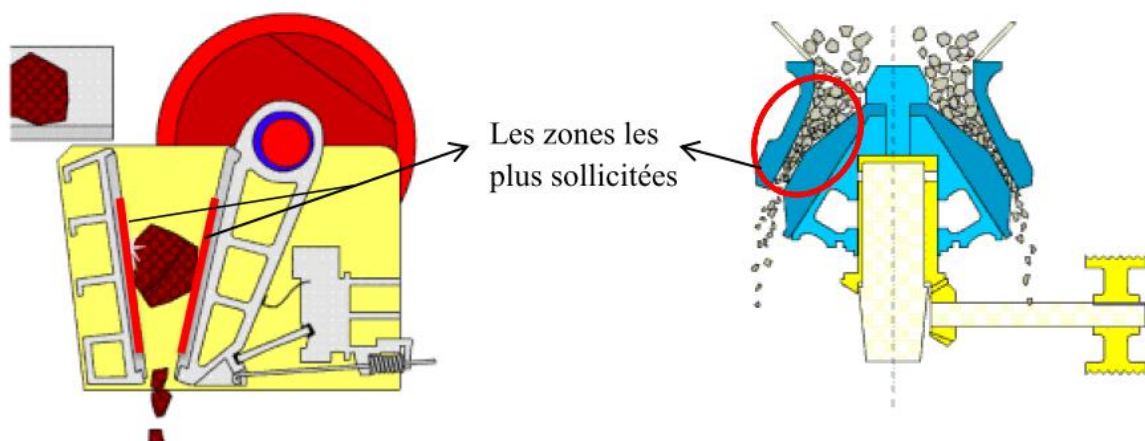


Figure I-5: les zones les plus sollicitées des pièces d'usage en broyeur et en concasseur

Devant cette situation, nous avons besoin d'un matériau qui doit comporter les propriétés mécaniques, chimique et métallographique pour résister à l'usure. La dureté est le premier facteur qu'elle doit vérifier pour assurer une meilleure résistance à l'usure par abrasion.

Les fontes à haute teneur en chrome offrent des propriétés uniques dans les applications sujettes à l'usure par abrasion. Malgré une bonne résistance à l'usure, ces fontes peuvent présenter des défaillances en cours de fonctionnement.

Pour remédier ce problème, FAM a proposé de travailler sur les fontes à haute teneur en chrome dont le but d'examiner la possibilité d'améliorer une nuance de la fonte à haute teneur

en chrome, ayant une bonne résistance à l'abrasion ainsi qu'elle doit présenter les meilleures propriétés mécaniques. Dans ce cadre s'inscrit ce travail afin d'effectuer une caractérisation métallographique et l'étude du comportement mécanique de la fonte au chrome suivi d'un cycle de traitement thermique.

I.2.1 Mission

- Elaboration de la fonte et coulée des échantillons ;
- Etude théorique consiste à déterminer les caractéristiques principales de la fonte à haute teneur au chrome ;
- Etude expérimental :
 - Traitement thermique des échantillons coulés ;
 - Analyse chimique ;
 - Etude métallographique ;
 - Essai de la dureté ;
 - Essai de l'usure ;

I.2.2 Planification du projet

Le sujet a été étudié en plusieurs étapes, une partie du travail a été consacré à la recherche de la documentation, une autre partie du projet a été réservé à l'examen et l'étude expérimentale.

Ensuite attaquer le cœur du projet pour bien étudier les propriétés d'une part et l'élaboration d'autre part. Ci-dessous le diagramme de GANTT représentant la planification initiale de déroulement du projet.

PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

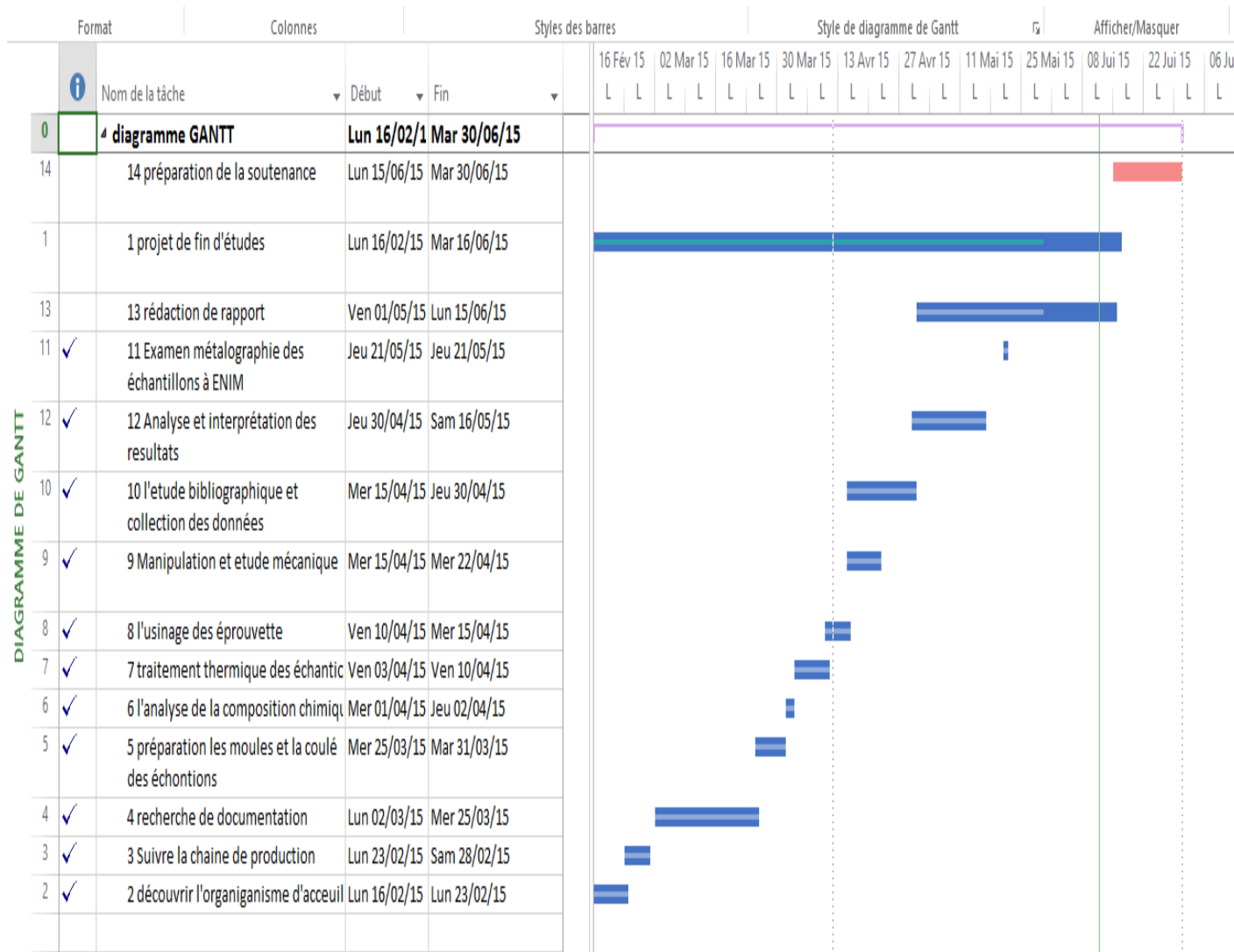


Figure I-6: diagramme GANTT du projet de fin d'étude

I.3 Conclusion

Après avoir présenté l'organisme d'accueil, les domaines d'activités, les moyens de production et les ressources humaines ainsi que le cadre général du projet de fin d'étude. On va décrire dans le chapitre suivant, la procédure d'élaboration de la fonte au chrome.

CHAPITRE 2

PROCÉDÉS D'ÉLABORATION DES PIÈCES EN FONTE AU CHROME DANS LA FONDERIE

Vous trouverez dans ce chapitre :

- ✕ Moulage en sable
- ✕ Les différents étapes d'élaboration les pièces en fonte

II. Procédé d'élaboration de la fonte

II.1 Procédé de moulage

La fonderie est l'un des procédés de formage des métaux qui consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée en limitant autant que possible les travaux ultérieurs de finition

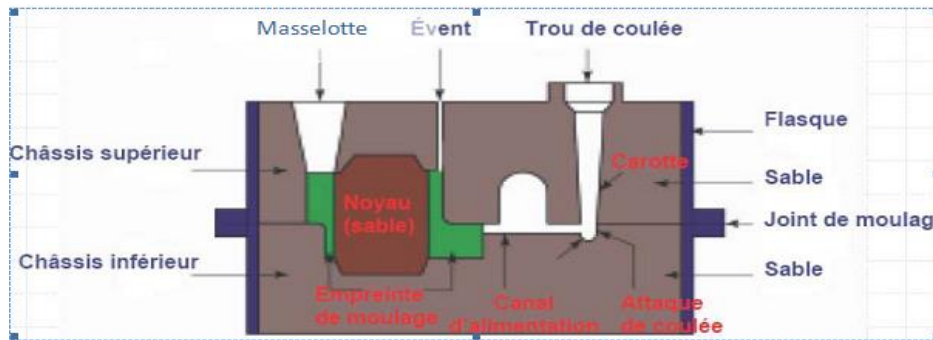


Figure II-1: les composants du moule

Le moulage est un ensemble des procédés qui consiste à réaliser des pièces brutes en coulant du métal fondu dans un moule en sable ou en métal représentant l'empreinte de la pièce à obtenir. Après la solidification du métal, il reproduit les contours et les dimensions de l'empreinte du moule. La réalisation d'une pièce en fonderie nécessite plusieurs opérations successives.

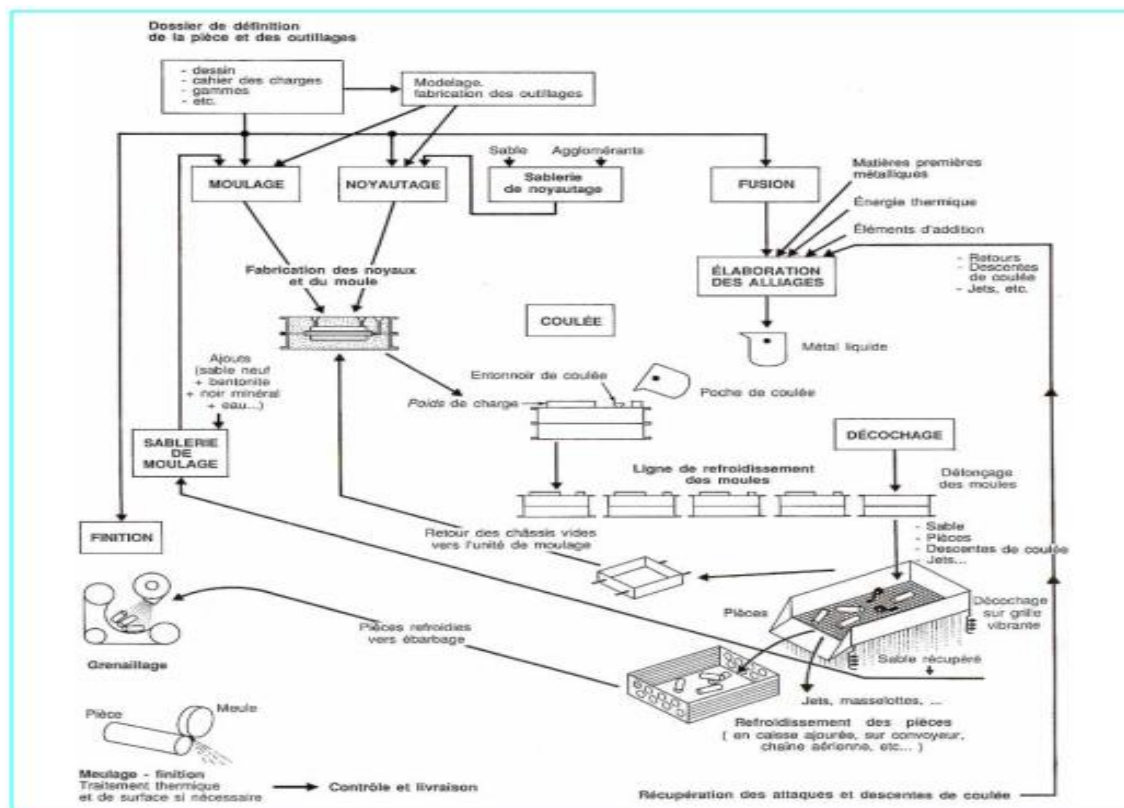


Figure II-2: schéma de principe de la fabrication de pièces de fonderie

II.2 Domaine d'application

Les fontes blanches à haute teneur en chrome présentent une grande variété de structures et de propriétés physiques, mécaniques, et surtout chimiques. La principale propriété de ces fontes est leur excellente résistance à l'usure. Ce qui leur donne une durée de vie importante dans la très grande majorité des milieux.

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

- Industrie lourde : fabriquer des tubes de récupérateurs, des barreaux de concasseurs et des plateaux pour fours de frittage, galets d'écrasement, plaques de blindage.
- Eléments de machines-outils, boulets de broyage, les marteaux, battoires.
- Industrie chimique et pétrolière : pièces de pompes pour matériaux abrasifs, piste pour broyeur à billes, pièces mécaniques devant résister à l'abrasion et les plaques des pompes centrifuge.



Figure II-3: les pièces de fonte au chrome

II.2.1 Les différentes étapes de la fabrication de pièces en fonte

À toutes les phases de la fabrication, s'insèrent de nombreuses opérations de mesure et de contrôle (analyse chimique du métal, analyse des sables de moulage, mesures de températures, contrôle tridimensionnel, métallographie...). La gestion de la qualité est l'une des clés de la réussite industrielle, particulièrement dans les industries de la fonderie, où il faut maîtriser un nombre élevé de paramètres au cours du processus de production.

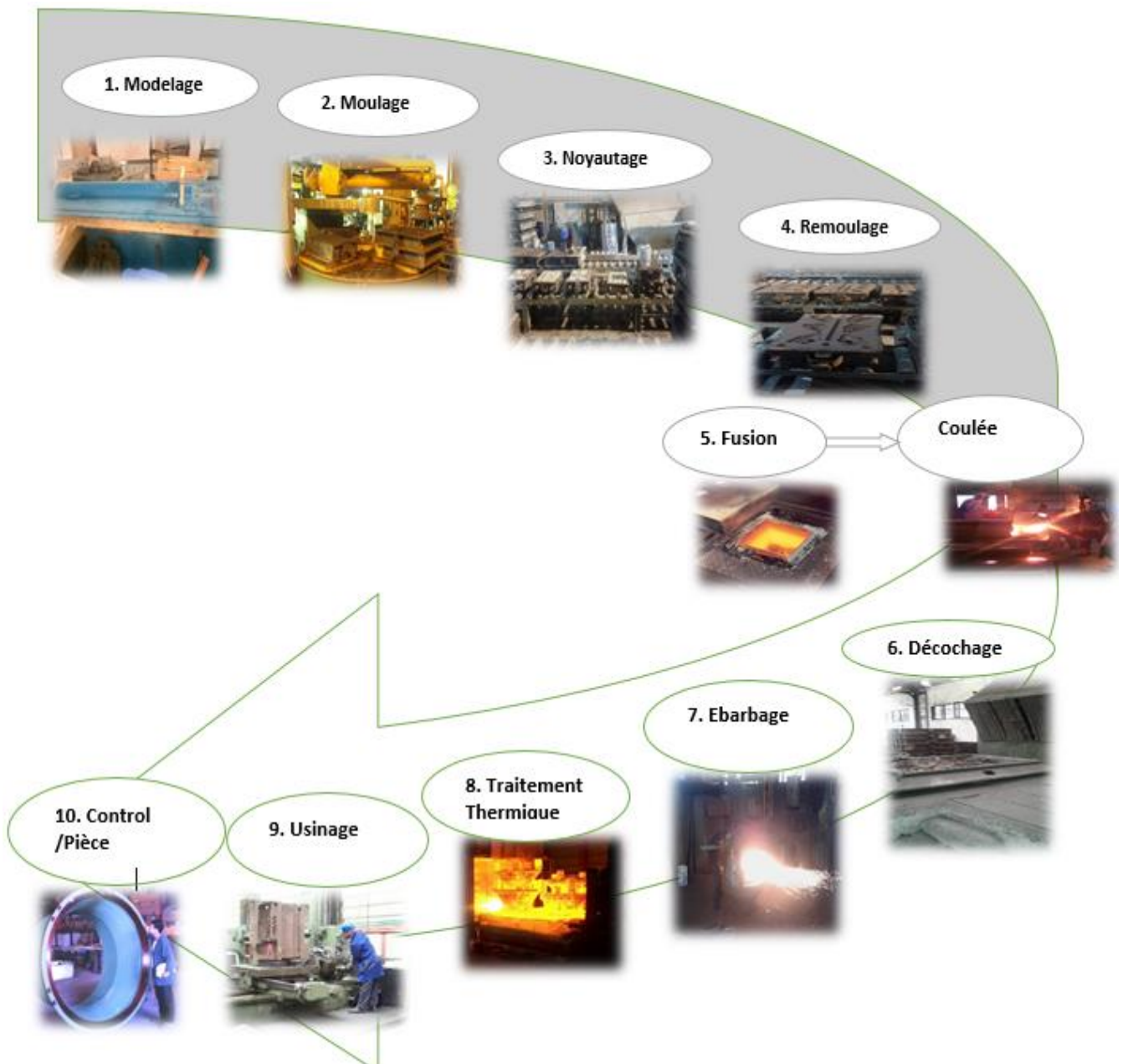


Figure II-4: le processus de fabrication des pièces moulées

❖ Modelage

C'est la fabrication des modèles, généralement en bois ou en plastique, utilisés dans les fonderies pour fabriquer les moules qui recevront le métal en fusion. Pour tenir compte du retrait du métal lors de la solidification et de la dilatation thermique des métaux, le modelleur doit fabriquer un modèle plus grand que la pièce froide dont il a le plan coté. Au lieu de recalculer les côtes du modèle, il utilise les cotes de la pièce moulée, mais il utilise des instruments de mesure qui sont gradués en fonction du retrait.

Les modèles peuvent être monoblocs, en deux parties ou en plusieurs parties, dans ce cas chaque partie doit être pourvue d'une cheville et d'un trou, qui se correspondent pour assurer un alignement précis lors de l'assemblage.

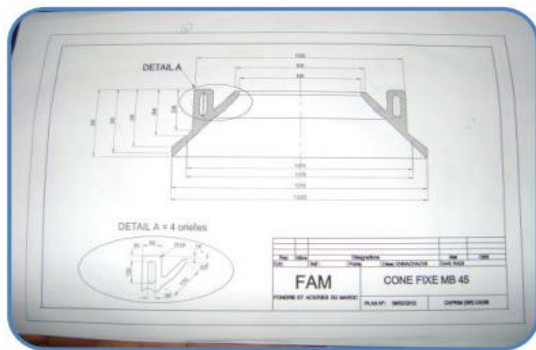


Figure II-5: le plan et le modèle en bois de la pièce

❖ Moulage

Réalisation du moule

Généralement le moule est constitué de deux parties, la partie supérieure ou châssis de dessus, et la partie inférieure ou châssis de dessous.

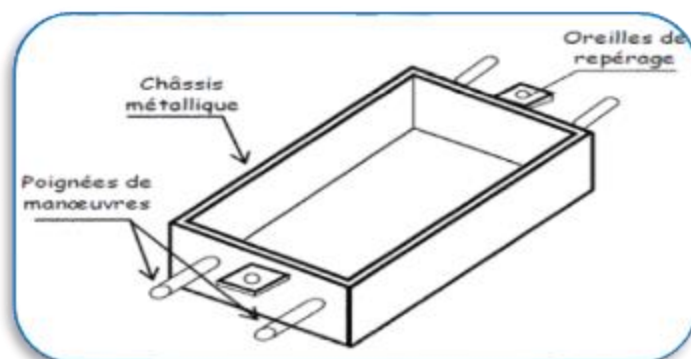


Figure II-6: schéma du châssis

Les châssis sont des cadres rigides destinés à contenir et à soutenir le sable constituant le moule. Ils sont fabriqués en fonte ou en acier moulé, profilé ou soudé. Les châssis portent des oreilles percées permettant un repérage précis à l'aide des broches.

La plaque modèle est fixée sur la table machine à l'aide des gougeons de centrage, puis un produit de démoulage est appliqué sur la plaque modèle pour faciliter ultérieurement cette opération, ensuite le châssis est mis sur la plaque modèle et centré par rapport au même châssis gougeons.

On fait marcher le malaxeur avec le programme correspondant au sable désiré selon la feuille de fabrication, le choix du programme de sable se fait en appuyant sur un des boutons numérotés sur le pupitre : 1-Chromite, 2-Neuf, 3-Régénéré.

Plusieurs types de résines les plus utilisées sont celles polyuréthannes combinées à un isocyanate et catalysées par une amine. L'humidité risque d'inhiber la réaction, d'où la nécessité de sécher le sable (humidité < 0.1% en masse d'eau).

Le surplus du sable est gratté au-dessus du châssis pour assurer la planéité. Après durcissement du sable en procède au démoulage du modèle, qui sera suivi par l'application des enduits sur l'empreinte en utilisant le pinceau ou le pistolet afin de limiter la réaction moule-alliage et avoir un bel aspect de surface.

Les enduits appliqués sont utilisés en fonction de la nuance du métal à couler, ils peuvent être à la base du carbure ou de zircon. Le séchage s'effectue par flambage, étuvage ou simplement à l'air.



Figure II-7: application et flambage de l'enduit sur l'empreinte

Ce qui concerne les noyaux, ils sont réalisés en moulant le sable dans une boîte noyaux, à la main ou sur une machine à souffler les noyaux. Ces machines projettent dans la boîte du sable

auquel on a incorporé des liants, puis soufflent dans ce sable le gaz qui va permettre le durcissement (CO₂ par exemple. Le gaz utilisé dépend du procédé et aussi de la nature du liant.

❖ Remoulage

Il s'agit de l'assemblage des deux parties du moulage déjà exécutées en vue de la coulée du métal. D'abord, il faut s'assurer que les noyaux sont bien fixés dans le moule par leurs portées, car sinon ils seront soulevés par la pression métallo-statique du métal liquide lors de la coulée.

Ensuite on met le châssis de dessus sur le châssis de dessous en vérifiant leur position relative et leur contact. Le moule est posé sur lit de sable.

En fin, un Godet de coulée est posé sur le châssis supérieur au niveau de la partie qui coïncide avec la descente de la coulée.

❖ Fusion

La fusion est une étape très importante dans le procédé de fonderie, elle consiste à élaborer un métal liquide qui répond aux exigences des clients et qui ensuite coulé dans les moules.

La température de la fonte à haute teneur en chrome est entre 1400°C et 1600°C.

Au sein FAM, on peut schématiser le processus de fusion comme suit :

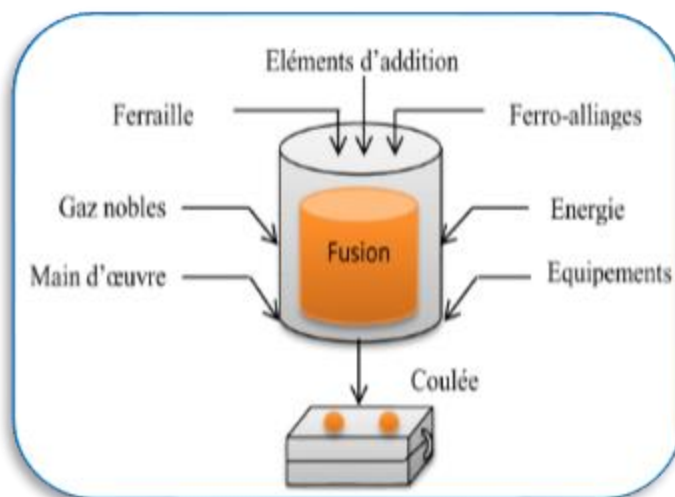


Figure II-9: schéma présentant le processus de fusion

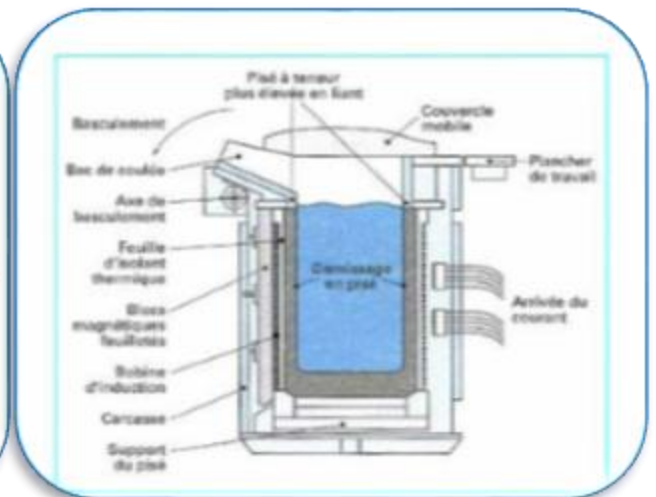


Figure II-8: Four à l'induction

a. Ferraille

Pour élaborer un métal liquide, il est nécessaire de se baser sur la matière première. Le service fusion utilise des ferrailles de nuances différentes achetés et classés dans le parc des matières premières. Il s'agit de : ferraille fonte spéciale, fonte ordinaire, acier au carbone acier mécanique...

Pour une nuance donnée, le calcul de la charge du four s'effectue à l'aide du logiciel qui se base sur la méthode simplex. Le calcul détermine la masse et la nuance de la matière première tout en optimisant les coûts.

b. Ferro-alliages

Les ferro-alliages sont élaborés à l'aide de la métallurgie extractive. Les différents types des ferro-alliages sont : ferro chrome carburé, ferro chrome affiné et ferro manganèse carburé.

c. Gaz nobles

Les gaz nobles utilisés sont deux types : le propane et l'oxygène.

- Le propane est utilisé pour le préchauffage des proches de coulée.
- L'oxygène est utilisé pour le découpage.

d. Energie

Le service fusion consomme presque d'énergie totale de l'usine. La plupart de cette énergie est consommée par les fours à induction. Cette énergie se devise en trois catégories :

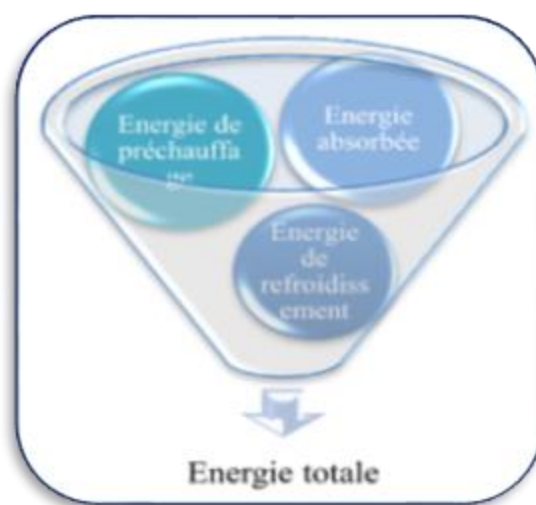


Figure II-10: Différents types d'énergie utilisée

- **Energie absorbée**

C'est une énergie fournie par le four lors de la fusion. Elle dépend de la nature de la nuance et la masse qu'on veut fondre.

- **Energie de préchauffage**

C'est une énergie qui permet le chauffage du four avant le démarrage de la fusion.

- **Energie du système de refroidissement**

C'est une énergie qui caractérise l'équilibrage thermique des fours à l'induction pendant et après la fusion. Elle est estimée à 252 KWH.

e. Main d'œuvre

La main d'œuvre doit être qualifiée et performante et pour atteindre le niveau souhaité, des formations continues ont été programmées.

f. Equipements

- **Poche**

La poche est un récipient métallique protégé par un béton réfractaire sur laquelle on transporte le métal liquide pour couler dans le moule.



Figure II-11: poche de manutention

- **Four**

La fusion s'effectue dans des fours à induction qui est assurée par la circulation de courant électrique induit qui parcourt les ferrailles constituant la charge. Le creuset est entouré par une bobine parcourue par un courant alternatif de haute fréquence qui crée un flux magnétique alternatif. Les variations de flux magnétique à travers la charge créent des courants électriques induits qui génèrent la fusion sous l'effet de peau.



Figure II-12: four à induction

❖ Schéma des opérations de préparation de la fusion

Afin de bien comprendre la fabrication, il est indispensable de présenter le schéma des opérations tel qu'il peut se présenter pour l'élaboration des fontes.

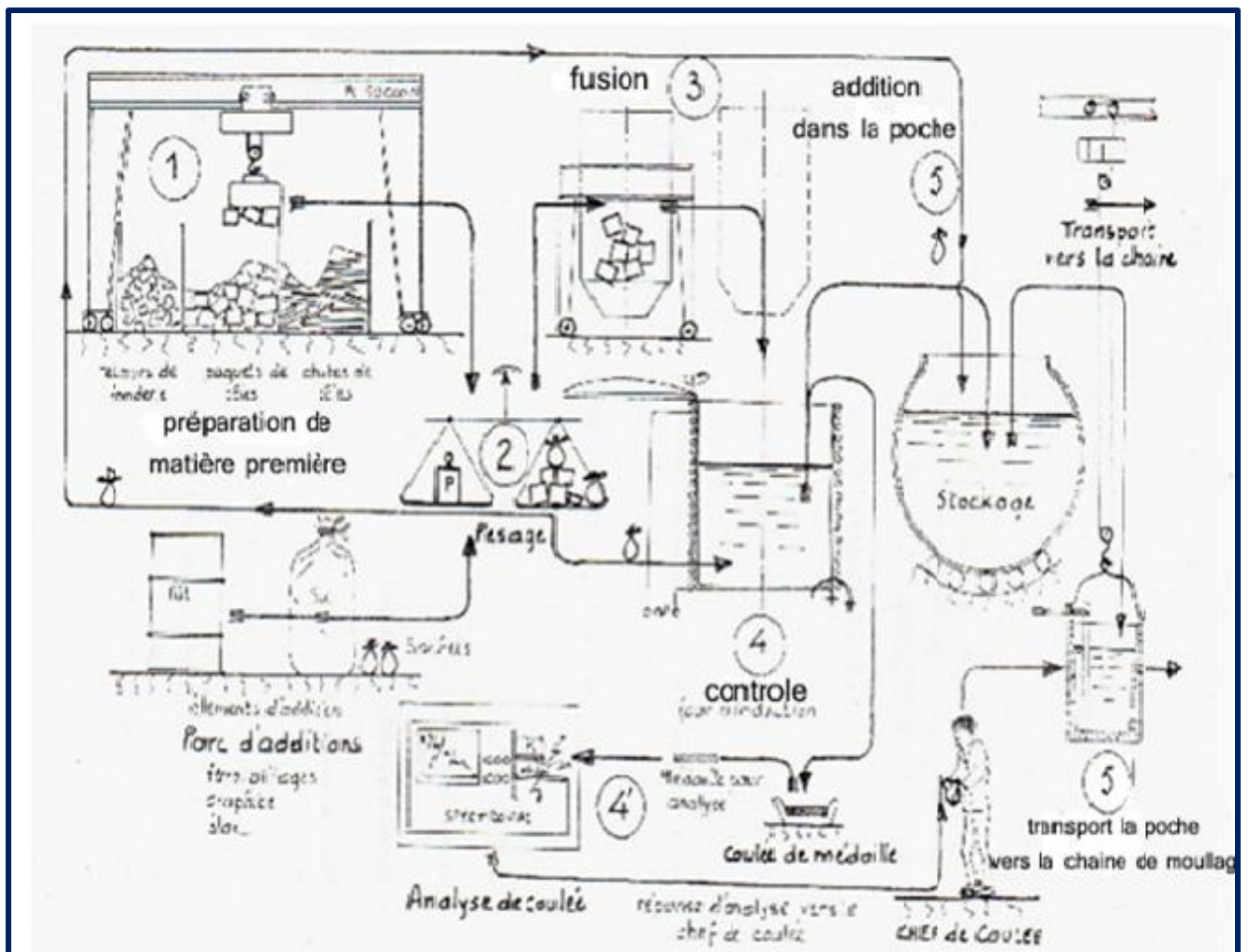


Figure II-13: opération de préparation de la fusion

On distingue les étapes suivantes :

1. Préparation des matières premières (ferrailles+ additions).
2. Pesage précis.
3. fusion.
4. Contrôle l'analyse chimique de la fusion.
5. Remplir la poche de coulée par l'alliage métallique et transport vers la chaîne de moulage.

❖ **Coulée**

Avant la coulée il faut déterminer la température de métal liquide et vérifier si les moyens matériels sont disponible pour couler le métal sans avoir une chute de température, il faut aussi s'assurer que les moules sont bien préparés (les godets et le chargement de grands moules).



Figure II-14: la coulée du métal fondu

II.2.2 Finition

❖ **Découchage**

Le découchage consiste à casser le moule pour libérer la pièce moulée. Cette opération est réalisée par le choc de vibrations produites au moyen d'une grille vibrante.

Le sable du moule est récupéré pour subir une régénération afin d'être réutilisé

❖ **Grenaillage**

L'opération de grenaillage par des billes d'acier projetées au moyen d'un jet d'air comprimé. Cette opération sert à enlever une couche superficielle fragile. Elle facilite ainsi le contrôle de la pièce en révélant certains défauts éventuels de la surface qui, après grenaillage, deviennent facilement détectables.



Figure II-15: opération de grenaillage

❖ Ebarbage

L'ébarbage Est une opération de la finition qui consiste à séparer la pièce des différents éléments résultants de la coulée, ainsi qu'à supprimer les traces et les bavures éventuelles qui peuvent survenir, notamment au niveau du plan de joint ou la liaison entre le moule et le noyau.



Figure II-16: opération d'ébarbage

II.2.3 Traitement thermique des fontes

Malgré le nombre important de paramètres qui interviennent au cours d'un traitement thermique (vitesse de chauffage, température et temps de maintien, vitesse de refroidissement, atmosphère du four), on distingue deux grandes catégories principales, rattachées au caractère structural du matériau traité et à son état d'équilibre :

- Les traitements thermiques de base nécessaires pour améliorer l'homogénéisation de la structure et pour rechercher l'état d'équilibre (normalisation). Il s'agit de traitements effectué sur les pièces à l'état brut de coulée. On cherche alors à favoriser la diffusion des éléments d'alliage pour obtenir une structure homogène.

- Les traitements thermiques orientés vers les applications pour créer des structures le plus souvent hors équilibre (trempe, revenu, durcissement structural) et qui permettent d'améliorer la résistance à l'usure, au choc et à l'abrasion.

Après traitement thermique de normalisation effectué pour homogénéiser la structure, on peut appliquer les traitements de durcissement par trempe, d'adoucissement et d'amélioration de la tenue aux chocs.

❖ **Durcissement par trempe**

Pour les nuances contenant de 12 à 26% de chrome, on obtient une structure à prédominance martensitique suivi d'un refroidissement rapide, le plus souvent utilisé par ventilateur.

❖ **Amélioration de la tenue aux chocs**

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



Figure II-17: traitement thermique des pièces de la fonte

II.2.4 Usinage

L'usinage est une technique de la mise en forme par enlèvement de matière par un outil coupant. Elle met en forme la pièce à usiner par des opérations successives ce qui permet d'aboutir aux dimensions et l'état de surface selon l'intervalle de tolérance exigé dans le cahier de charge.

Le procédé d'usinage s'insère dans le processus global de fabrication lorsqu'il y a des exigences concernant des cotes fonctionnelles. Il s'effectue après le traitement thermique.



Figure II-18: l'opération de l'usinage

II.2.5 Contrôle de qualité

Le contrôle est une opération destinée à déterminer, avec des moyens appropriés, si le produit contrôlé est conforme ou non à ses spécifications ou exigences préétablies (et incluant une décision d'acceptation, de rejet ou de retouche).

II.3 Vocabulaire technique utilisé dans l'atelier de fonderie

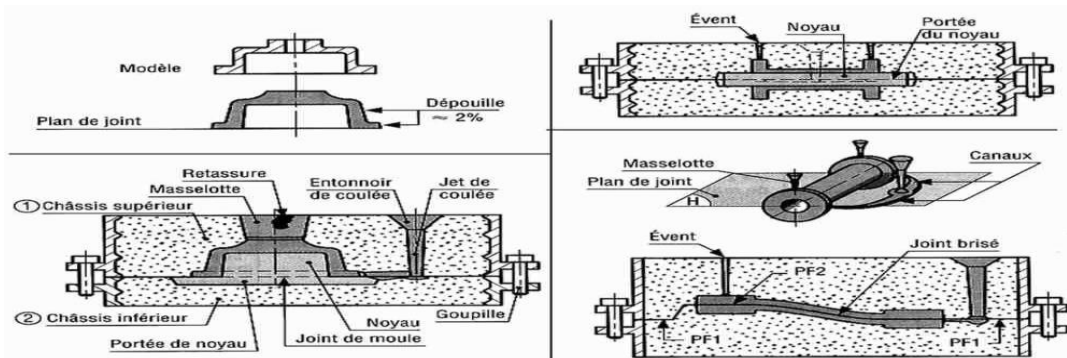


Figure II-19: schéma explicatif du vocabulaire technique

Modèle : Objet destiné à être reproduit. Il est l'œuvre du modelleur.

Moule : Corps suffisamment solide et façonné pour recevoir un métal ou un alliage en fusion (Fonderie en moule permanent).

Châssis : Cadre en métal destiné à maintenir le sable comprimé autour du modèle (fonderie en moule non permanent).

Dépouille : Elle est prévue sur le modèle afin de l'extraire sans provoquer l'effritement du sable lors de sa sortie.

Masselotte : Excédent de matière qui permet de déplacer la retassure hors de la pièce.

Retassure : Principal défaut de fonderie dont la cause est due à la contraction de l'alliage lors de sa solidification.

Joint de moule (plan de joint) : Séparation entre les châssis. Une pièce peut être réalisée avec plusieurs châssis donc plusieurs plans de joint.

Noyau : Réalisé en sable, il permet d'obtenir les formes intérieures. Il est réalisé dans une boîte à noyau (fonderie en moule non permanent).

Event : Canal destiné à faciliter l'échappement des gaz formés au moment où le métal chaud entre en contact avec la surface de l'empreinte (en incluant l'air présent dans le moule).

Décochage : Opération qui consiste à libérer la pièce du moule lorsque le métal est solidifié.

Ebarbage : Opération qui permet d'enlever les différentes parties superflues (canaux d'alimentation, masselottes, évents ...) pour obtenir la pièce brute.

Chape : Tout châssis intermédiaire entre le châssis supérieur et le châssis inférieur.

II.4 Conclusion

Après la présentation des procédés d'élaboration de la fonte à haute teneur en chrome et les différentes étapes de production. On va entamer dans le chapitre suivant les caractéristiques et les propriétés de la fonte à haute teneur en chrome.

CHAPITRE 3

LES CARACTÉRISTIQUES DE LA FONTE À HAUTE TENEUR EN CHROME

Vous trouverez dans le deuxième chapitre :

- ✕ Les différents types de fontes
- ✕ Les propriétés physiques et mécaniques de la fonte au chrome
- ✕ Les diagrammes de phase.
- ✕ Différent phase de microstructure
- ✕ Influence des éléments d'addition sur la microstructure
- ✕ L'usure par abrasion

III. Les caractéristiques de la fonte à haute teneur au chrome

III.1 Introduction

La fonte est un alliage métallique dont l'élément essentiel est le fer, et dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Il est à noter que la présence de fortes teneurs en éléments carburigènes peut modifier cette limite de la teneur en carbone. Dans la pratique les pourcentages de carbone se situent le plus souvent entre 2.5 et 4.3% pour rester dans l'intervalle de fonte hypoeutectique. Les fontes sont constituées par une matrice dans laquelle se trouvent toujours des particules de graphite ou de carbure, la matrice, qui peut être ferritique, perlitique, austénitique, martensitique, bainitique, etc., est modifiable par traitement thermique, 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.

En raison de ses propriétés mécaniques, la fonte est utilisée pour des nombreuses applications dans l'industrie. En plus, certaines fontes spécifiques et grâce à l'addition d'éléments d'alliages et du traitement thermique, les propriétés de celles-ci peuvent être adaptées à certaines applications.

Dans la classification des matériaux, la fonte est classée parmi les alliages métalliques ferreux, on distingue les différentes fontes par leur pourcentage de carbone :

- ✚ Fonte hypoeutectique : de 2.11 à 4.3% de carbone ;
- ✚ Fonte eutectique : de 4.3% de carbone
- ✚ Fonte hypereutectique : de 4.3 à 6.67% de carbone ;

III.2 Différents types de fontes

Les fontes sont classées à l'échelle industrielle en différents types. La figure au-dessous présente les principaux types des fontes.

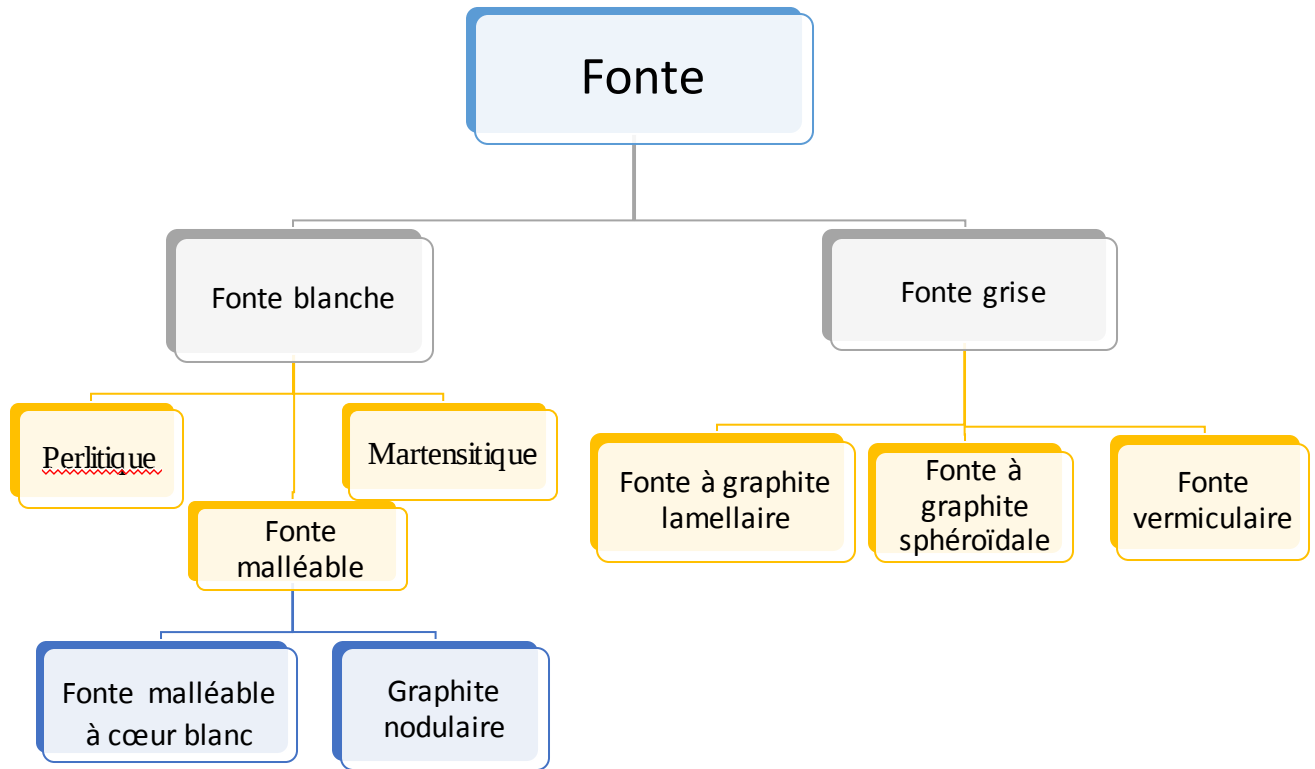


Figure III-1: classification des fontes à l'échelle industrielle

III.2.1 Fontes blanches

Si la composition de la fonte s'y prête ou si la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide au cours de la solidification, le métal se solidifie avec la totalité du carbone avec le fer en formant le carbure de fer. Ce composé, appelé également cémentite, dur et fragile, est le constituant de la microstructure des fontes blanches.

En conséquence, celles-ci elles-mêmes dures et fragiles et elles présentent une cassure cristalline blanche.

Les fontes blanches ne se moulent pas facilement que les autres fontes, à cause de leur température de solidification est généralement plus élevée et qu'elles solidifient avec la totalité du carbone présent sous la forme combinée de carbure de fer. La figure montre la microstructure de la fonte blanche perlitique.

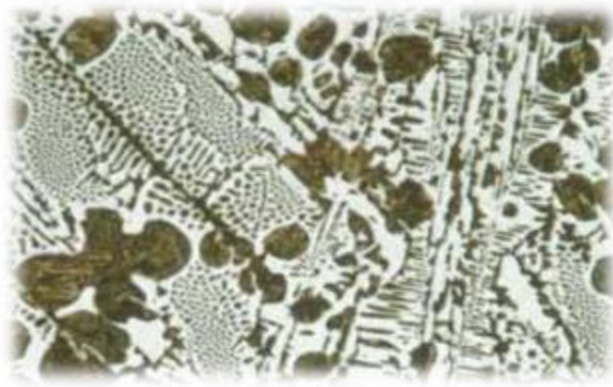


Figure III-2: la microstructure de la fonte blanche

III.2.1.1 Fonte malléables

Les fontes malléables présentent une ductilité et une résistance mécanique élevées. Les fontes malléables sont généralement classées en deux familles distinctes :

❖ Fonte malléables à graphite nodulaire

Ces fontes se caractérisent par le fait que la majeure partie du carbone qu'elles contiennent se présente, dans la microstructure, sous l'aspect de nodules de graphite de forme irrégulière. Cette forme de graphite est appelée carbone de recuit, du fait qu'elle apparaît dans la fonte à l'état solide, au cours d'un traitement thermique.

❖ Fonte malléables à cœur blanc

Les fontes malléables à cœur blanc sont presque totalement décarburrées au cours d'un recuit à très haute température (950 à 1050 °C), dans une atmosphère oxydante qui élimine presque tout le carbone. Cette décarburation, qui doit conduire à une matrice ferritique, ne peut s'obtenir que pour des pièces de faible épaisseur.

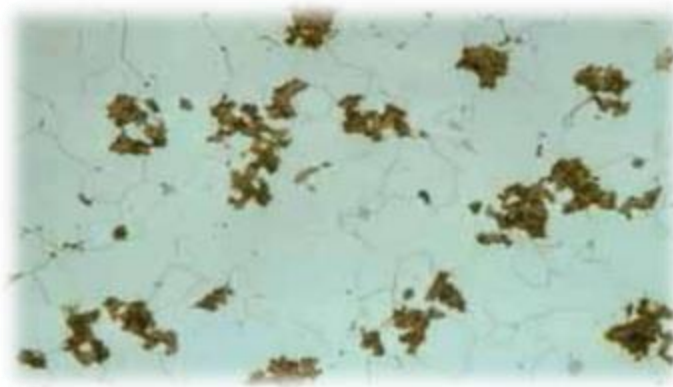


Figure III-3: la microstructure de la fonte malléable ferritique

III.2.2 Fonte grise

Cette famille de fonte est caractérisée par son carbone sous forme de graphite. La structure graphitique du carbone est obtenue par un refroidissement très lent de la fonte, d'autres éléments d'addition permettent la mise en forme structurale du graphite (magnésium pour précipiter sous forme de nodules par exemple)

❖ Fonte à graphite lamellaire

Lorsque la composition de la fonte liquide et sa vitesse de refroidissement sont appropriées, le carbone précipite au cours de la solidification sous la forme de lamelles de graphite séparées. Les feuillets de graphite croissent par leur tranche au sein du liquide et donnent ainsi naissance à la forme en lamelles caractéristique de ces fontes.

Les caractéristiques de ces fontes dépendent de la dimension moyenne, du nombre et de la répartition des lamelles de graphite, ainsi que de la dureté relative du métal de la matrice. Ces facteurs sont commandés principalement par les teneurs en carbone et en silicium du métal et par la vitesse de refroidissement de la pièce moulée.



Figure III-4: la microstructure de la fonte graphite lamellaire

❖ Fonte à graphite sphéroïdal

Les fontes à graphite sphéroïdal sont, après les fontes grises, celles qui sont le plus souvent demandées. Ces fontes, dites aussi ductiles, ont été désigné parfois sous le nom de fontes nodulaire ou de fonte GS, les fontes à graphite sphéroïdale présentent un rare ensemble de caractéristique, du fait que le graphite est présent sous formes de sphéroïdes ou sphérules. Cette forme sphéroïdale est obtenue par addition d'une quantité très faible, mais bien définie, de magnésium à une fonte liquide. Comme les fontes malléables, les fontes à graphite

sphéroïdal présentent une relation contrainte-déformation linéaire, d'une limite d'élasticité étendue et une bonne capacité de déformation. La figure montre une structure de fonte GS.

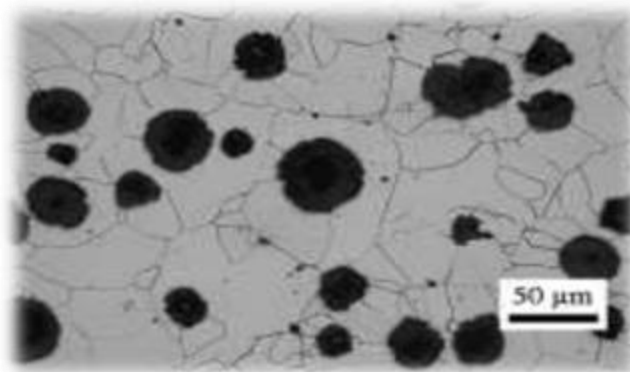


Figure III-5: la microstructure de la fonte graphite sphéroïdal

❖ Fonte GV (Graphite Vermiculaire) ou fonte GC (graphite compact)

La fonte à graphite vermiculaire désigne en réalité la forme du graphite. Dans le cas présent on se situe entre la forme lamellaire et la fonte sphéroïdale au niveau de microstructure mais aussi en termes de caractéristiques mécaniques

Propriétés mécaniques	Fonte à graphite vermiculaire
Résistance Mécanique (Rm en MPa)	450
Module d'Elasticité (E en GPa)	145
Elongation (%)	1,5
Conductivité Thermique (W/mK)	37
Dureté (BHN 10/3000)	217-241

Figure III-6: les propriétés mécaniques de la fonte GV

III.3 Fontes à haute teneur au chrome

Ces fontes peuvent recevoir une addition de 12 à 39% de chrome qui permet de résister à l'usure et l'oxydation à des températures allant jusqu'à 1040°C. Les fontes à forte teneur en chrome sont souvent utilisées pour fabriquer des pièces complexes destinées aux applications à l'usure.

Parmi les effets du chrome, c'est qu'il empêche la graphitisation et il est particulièrement efficace pour retarder le gonflement ainsi que l'oxydation aux températures élevées. Lorsque

la teneur en carbone est inférieure à 1.5%, la plus part des fontes à haute teneur en chrome peuvent être usinées. Par contre lorsque la teneur en carbone est plus élevée, elles cessent d'être usinables et leur emploi se trouve limité aux pièces qui peuvent être utilisées sans usinage ou qui peuvent être usinées par rectification. Ces fontes présentent, par rapport aux aciers inox, une ductilité et une ténacité faibles.

Les fontes blanches à forte teneur en chrome sont réparties en trois groupes selon leurs microstructures :

- Fontes perlitiques et martensitiques qui contiennent 12 à 28% de chrome ;
- Fontes ferritiques, qui contiennent de 30 à 34% de chrome ;
- Fontes austénitiques qui, en plus d'une teneur en chrome qui varie entre 15 et 30%, contiennent de 10 à 15% de nickel pour stabiliser la phase austénitique jusqu'à des températures inférieures à la température ambiante ;

De ce fait, le choix de fonte blanche à forte teneur en chrome dépend du niveau de température de l'application considérée, de l'importance des contraintes auxquelles la pièce doit résister en cours de service, de la durée de vie exigée et du prix de revient.

Pour résumer, les principales qualités des fontes au chrome sont :

- Une excellente résistance à l'usure et l'abrasion ;
- Un bel aspect ;
- Une excellente coulabilité ;

Les principaux défauts sont :

- Difficilement usinable ;
- Basse ténacité ;

III.4 Fontes à forte teneur en chrome avec addition de molybdène

L'addition du Chrome à des teneurs variant entre 12 et 28% avec du Ni et du Mo permet la production d'une gamme d'alliage qui combine résistance à l'abrasion et ténacité.

La présence du molybdène avec le chrome est efficace pour empêcher la transformation de la matrice austénitique en perlite lors du refroidissement à l'intérieur du moule ou en cours du traitement thermique. En général, la microstructure de la matrice des fontes blanches à forte teneur en chrome alliées au molybdène est constituée d'austénite. La ténacité ainsi que la

résistance à l'abrasion des fontes au chrome-molybdène sont améliorées par le traitement thermique. Dans ce cas, une température élevée est nécessaire pour permettre la déstabilisation de l'austénite sursaturée. Ceci permet la précipitation de carbures M_7C_3 et $M_{23}C_6$ dans la matrice. Un refroidissement rapide est exigé pour garantir une résistance à l'abrasion maximale. Un traitement de revenu est recommandé pour améliorer la ténacité des pièces produites.

III.5 Les propriétés de la fonte à haute teneur au chrome

III.5.1 Propriétés physiques

Ces fontes possèdent :

- Coefficient moyen de dilatation thermique $10^{-6} / (^\circ\text{C})$ 20(°C) et

Température (°C)	Valeur
100	11-15

Tableau III-1: coefficient de dilatation thermique de la fonte au chrome

- Conductivité thermique w/m °C

Température (°C)	Valeur
100	12.6-15

Tableau III-2: conduction thermique de la fonte au chrome

- Densité ρ (Kg/dm³)

Température (°C)	Valeur
20	7.7

Tableau III-3: la densité de la fonte au chrome

III.5.2 Propriétés mécaniques

Les fontes au chrome présentent les propriétés mécaniques suivantes :

	les propriétés	valeurs
les propriétés mécaniques de la fonte au chrome	dureté Vickers (HV)	600
	résistance à la traction R_m (Mpa)	400-1000
	module de d'élasticité (Gpa)	196

Tableau III-4: les propriétés mécaniques de la fonte au chrome

III.6 Diagramme de phase

Les prévisions ou comparaisons relatifs aux traitements thermiques des alliages de fonte au chrome, les métallurgistes utilisent généralement une série de diagrammes.

Les fontes sont composées de plusieurs éléments, et chaque élément à une influence sur leurs propriétés et leurs structures. Il y a un nombre important d'éléments chimique qui interviennent dans la composition des fontes à étudier alors, il est impossible d'établir des diagrammes des phases. En revanche, il possible d'employer les diagrammes de phases binaires et ternaire entre le fer et les autres éléments.

III.6.1 Diagramme fer-carbone

Le diagramme fer-carbone est très utile pour comprendre les traitements thermiques des fontes et les aciers. Il est limité à droite par la cémentite Fe_3C (6.67%) est fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : les aciers (entre 0.008% et 2%C) et les fontes (de 2%C à 6.67%C).

Le diagramme de phase Fe-C présente deux variantes, la version stable dont se trouve le carbone sous forme de graphite. La version métastable avec la formation de cémentite (Fe_3C).

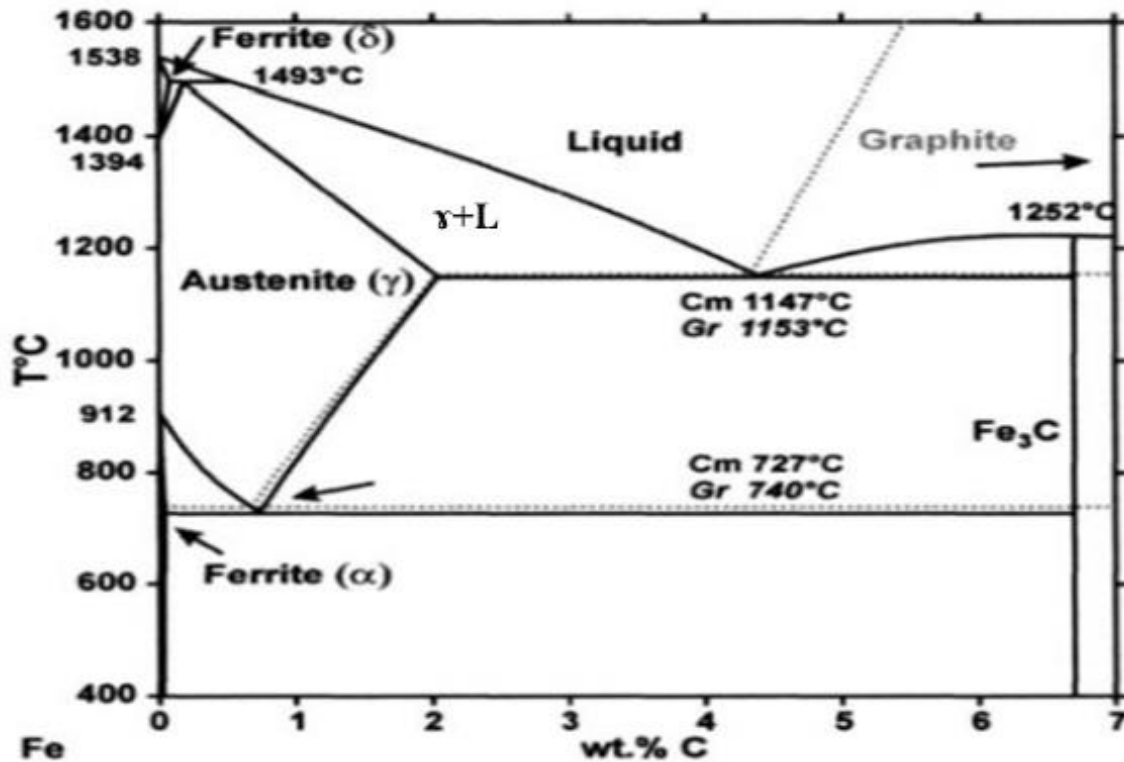


Figure III-7: diagramme de phase fer-carbone

Ce diagramme est limité à droite par la cémentite (6.67% C, matériau fragile, cassant, très dur) et fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : les fontes et les aciers.

III.6.2 Diagramme fer-chrome

Certains éléments d'alliages, et leurs proportions, peuvent modifier le diagramme d'équilibre fer-carbone. Les éléments comme le chrome favorisent la formation et cristallisation en phase α (élément alphagène). Le diagramme fer-chrome (Figure 33), montre que le domaine α , est très étendu. En revanche on trouve le domaine γ est réduit.

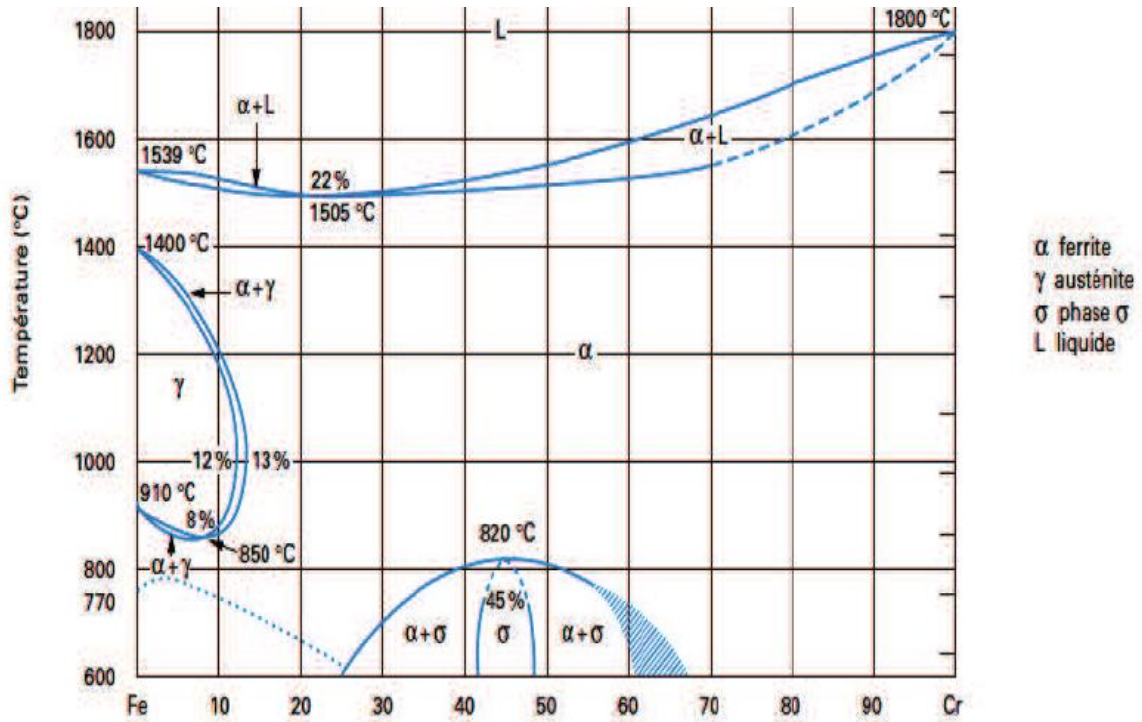


Figure III-8: diagramme d'équilibre des alliages binaires fer-chrome d'après Bain et Aborn

D'après le diagramme fer-chrome on peut définir deux régions :

- Chrome < 13% : ces alliages sont austénites et peuvent subir la transformation de l'austénite γ vers ferrite α par refroidissement lent ou rapide.
- Chrome > 13% : ces alliages sont toujours ferritiques.

Pour les températures en dessous 820°C et pour des teneurs déterminés en chrome, il y a possibilité d'apparition d'une phase intermédiaire dite phase σ fragilisante.

III.6.3 Diagramme ternaire Fe-C-Cr

Les fontes au chrome se solidifient selon le diagramme Fer-C-Cr (fig 34), il permet de savoir les différentes phases microstructurales qui se forment lors de la solidification.

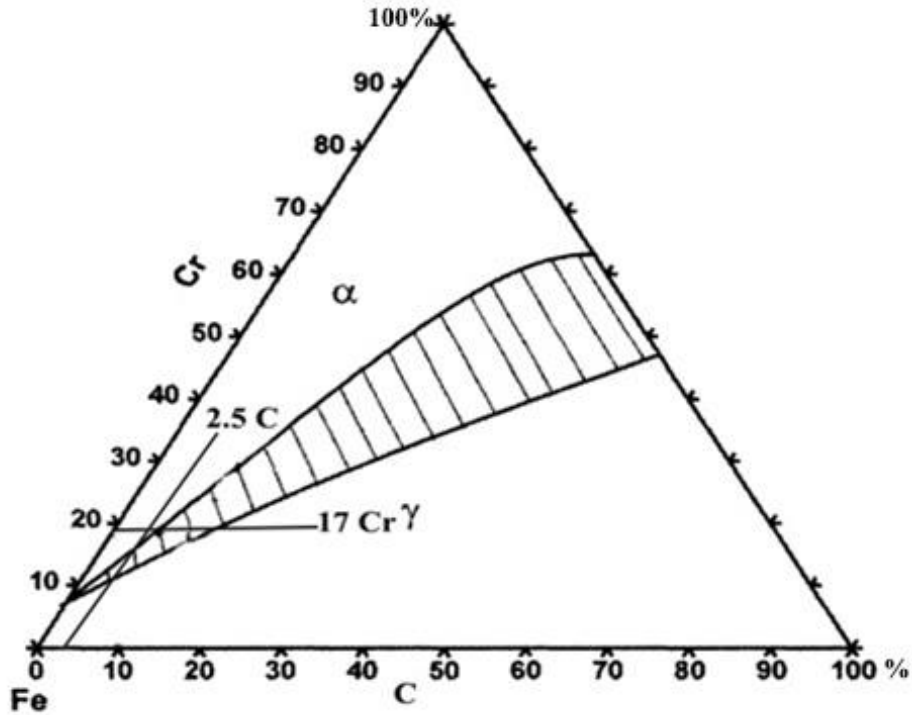


Figure III-9 : diagramme ternaire Fe-C-Cr à 1300°C

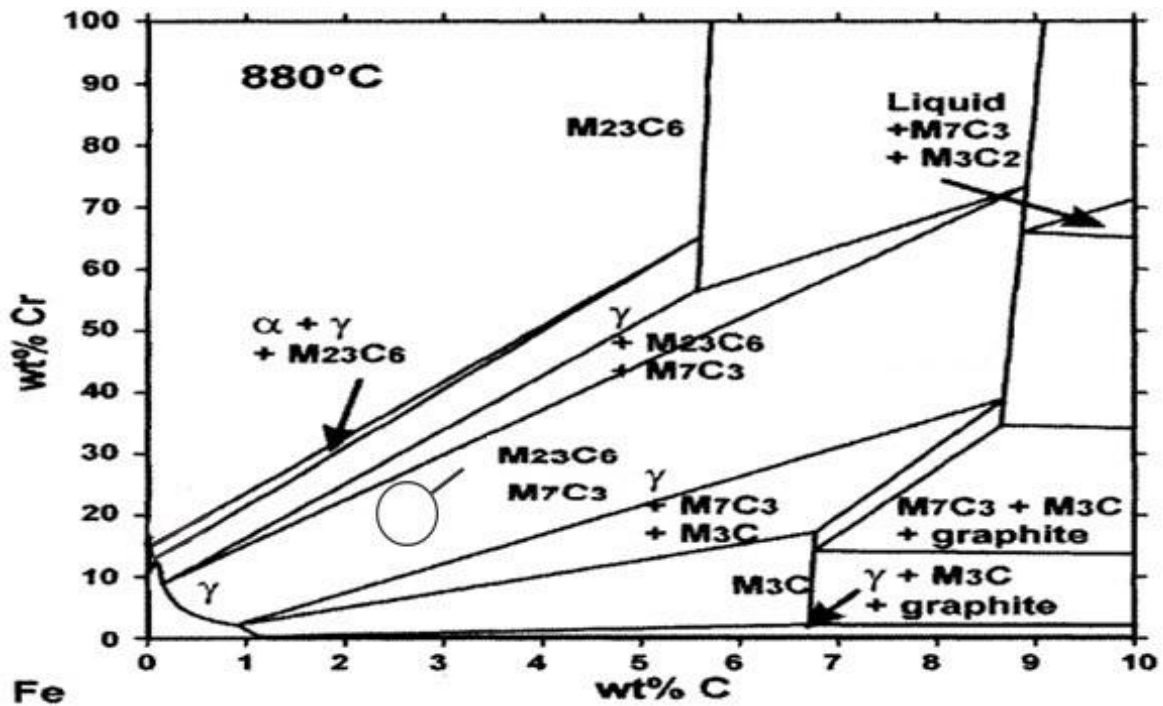


Figure III-10: diagramme d'équilibre Fe-C-Cr à 880°C

La solidification des fontes à haute teneur en chrome de composition hypoeutectique débute par la formation d'austénite primaire. La proportion d'austénite primaire évolue en fonction de diminution de la température. L'augmentation de la teneur en chrome permet un

accroissement de la température de transformation eutectique, une diminution de la teneur en carbone eutectique et aussi de l'aire de la boucle gamma.

III.7 Description des différentes phases microstructurales des fontes

D'une manière générale, la composition microstructurale des fontes dépend de la composition chimique, la forme ainsi que la répartition de ces phases dans la microstructure ainsi que la teneur en carbone, les éléments d'alliages et du type de traitement thermique adopté.

❖ L'austénite

L'austénite, fer γ , de structure cubique à faces centrées (cfc), est la phase stable du fer pur entre 910 et 1450 °C, dans lesquels le carbone est en solution solide sur un intervalle de température dont l'étendue dépend des teneurs en éléments d'addition. Les éléments gammagènes (Ni, Mn) élargissent le domaine de stabilité de l'austénite tandis que d'autres éléments (Cr, Si, Mo) dits alphagènes. La microstructure de l'austénite est composée de grains polyédriques.

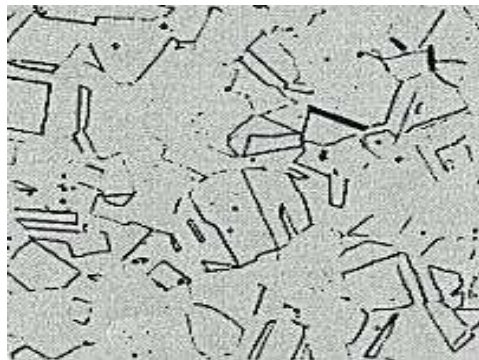


Figure III-11: Micrographie de l'austénite

❖ Perlite

La perlite présente sous forme des agrégats, c'est un eutectoïde dont la température de transformation est de 727 °C. La perlite est généralement rencontrée dans les moulages à l'état brut de coulée. C'est un mélange homogène de ferrite et de cémentite qui peut avoir des aspects lamellaire ou globulaire. Cette dernière est issue d'un recuit d'adoucissement. La perlite est caractérisée par une dureté qui avoisine 200 HB, elle est tenace ($R_m = 850 \text{ N/mm}^2$), assez ductile ($A\% = 10$) et facile à usiner. La germination se fait aux joints de grain de la phase mère austénitique. La croissance des lamelles (ferrite, cémentite) est parallèle.

Suivant la vitesse de refroidissement, on parle de perlite fine (vitesse élevée) ou de perlite grossière (vitesse lente). La figure montre la micrographie sous forme lamellaire.

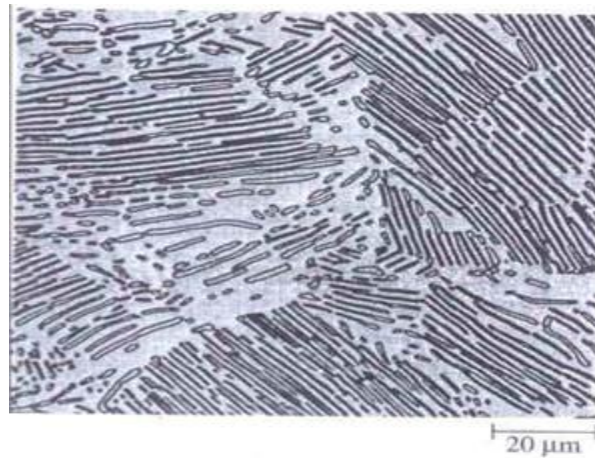


Figure III-12: Micrographie de perlite

❖ Cémentite

La cémentite est un carbure de fer de formule chimique Fe_3C , fusion à 1230°C . à l'état pur, ce composé fait partie de la famille des céramiques. C'est une phase qui se forme dans les aciers et les fontes, et a une part importante dans les propriétés physiques de ces alliages. Leurs principaux propriétés est la dureté et la fragilité.

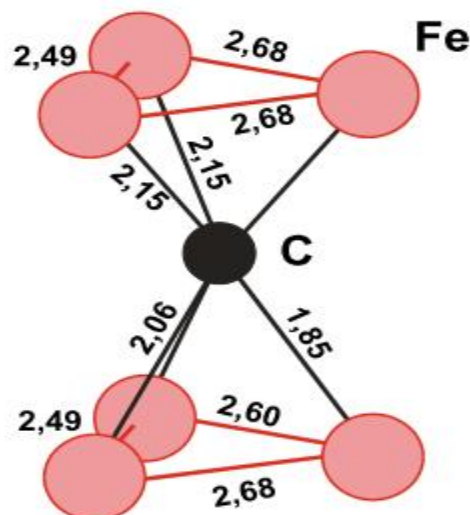


Figure III-13: structure de la cémentite

❖ Martensite

La martensite est une solution solide de carbone dans le fer. Son réseau est quadratique centré, voisin de celui du fer Alpha. Selon la vitesse de refroidissement, la température de trempe, la composition chimique. L'austénite peut se transformer en martensite. Lors d'une transformation martensitique, la vitesse de refroidissement est tellement élevée que la diffusion

❖ Ferrite

La ferrite est une solution solide de carbone dans le fer_α, de structure cubique centrée, contenant environ 0.005 % de carbone à température ambiante et environ 0.03 % à 720 °C. La ferrite peut contenir en solution des éléments variés tels que le Cr, Ni, Si, P...etc. Elle est ductile et malléable. Ses caractéristiques sont :

- HB : 80 à 100
- Rm = 300N/mm²
- A = 35% (allongement)

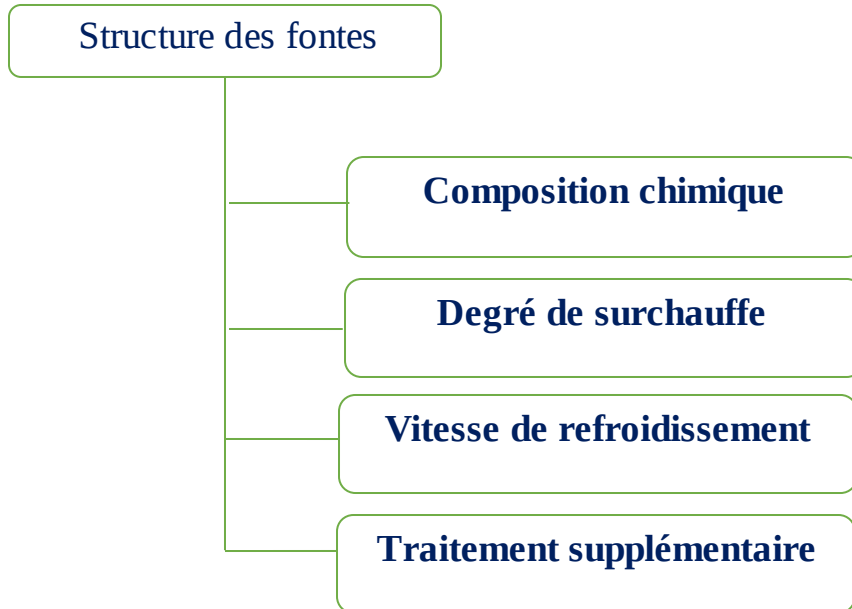
On rencontre deux types de ferrite : ferrite aciculaire et granulaire.



Figure III-14: Micrographie de ferrite aciculaire et granulaire

III.8 Facteurs influençant la constitution et la microstructure des fontes

Ces différents facteurs peuvent être schématisés par la figure suivante :



❖ Composition chimique

La composition chimique initiale influe sensiblement sur la formation de la structure des fontes d'où l'ajustement de la composition chimique est nécessaire par un traitement à l'état liquide qui consiste à ajouter au métal, des quantités optimales d'un ou plusieurs éléments d'alliage. La présence de ces éléments donne à la fonte une nouvelle structure et des propriétés mécaniques différentes. On peut diviser ces éléments en deux types selon leurs effets sur la structure.

Dans les fontes comme dans les aciers, les éléments alphagènes sont ceux qui dans un domaine de concentration donnée, étendent l'intervalle de stabilité de la phase alpha de l'alliage de base auquel ils sont ajoutés en pratique. Ce sont ceux qui élèvent les températures de transformation gamma en alpha ou qui éventuellement, suppriment tout domaine d'existence de la phase gamma.

Au contraire, les éléments gammagènes étendent le domaine de stabilité de la phase austénite et même l'obtention d'une fonte complètement austénitique.

❖ Degré de surchauffe

La température à laquelle est porté le métal au-dessus du liquidus caractérise la surchauffe. L'augmentation du degré de surchauffe accroît le phénomène de surfusion.

❖ Vitesse de refroidissement

L'effet de l'épaisseur sur les propriétés mécaniques est le résultat de modifications de la structure microscopique, puisque cette dernière est influencée par la vitesse de refroidissement.

Ces effets se résument comme suit :

- Des taux de refroidissement très élevés ne permettent pas à tout le carbone présent de précipiter sous forme de graphite, il se forme alors de la cémentite, Fe_3C , qui est dure et fragile.
- Un refroidissement très lent donne du graphite très gros.

❖ Traitement supplémentaire

En plus des traitements qui permettent d'ajuster au plus précis la composition de l'alliage liquide en cours d'élaboration, il existe une gamme d'actions juste avant la phase de coulée ou pendant celle-ci qui a pour but de mieux gérer le processus de solidification.

III.9 Influence des éléments sur la structure des fontes :

L'addition des éléments d'alliages engendre une large variété de microstructures et de propriétés mécaniques, l'interaction de ces éléments doit être prise en considération. Selon leur effet sur la matrice, les éléments d'alliages peuvent être répartis en deux catégories :

- Eléments élargissant le domaine gamma et favorisant la formation d'austénite, comme le Ni, le Co, le Mn, le Cu, le C.
- Eléments rétrécissant le domaine gamma et favorisant la formation de ferrite, tels que Si, Cr, W, Mo, P, Al, Sn, Sb, As, Zr, Nb, B, S et Ce.

Ces éléments peuvent aussi être répartis en deux catégories :

- Eléments carburigène tels que : Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Ti et Zr.
- Eléments non carburigènes (graphitisants), tels que le Ni, Co, Cu, Si, P et Al.

❖ Carbone

Le carbone est caractérisé par un point de fusion égale à 3540 °C. C'est un élément de base pour les fontes et les aciers suite à sa grande influence sur leurs propriétés. Les propriétés des alliages ferreux dépendent fondamentalement de la teneur en carbone. Le carbone réagit avec les éléments carburigènes pour former des carbures. C'est un élément essentiel pour le durcissement. Le carbone augmente la dureté des fontes. L'étendu normal en teneur en carbone pour les fontes à haute teneur en chrome entre 1.8 et 2.8 %C.

❖ Chrome

Le chrome est caractérisé par un point de fusion égale à 1920°C. le chrome a été choisi un élément de base pour les fontes et aciers, et destiné relativement pour améliorer la dureté, la résistance à la corrosion, la résistance à haute température et la résistance à l'usure par abrasion. Le chrome en solution tend à retarder la transformation de l'austénite, ce qui produit de la trempe à l'air.

Le chrome distribué dans la matrice améliore la trempabilité de la fonte en retardant les transformations de perlite et de bainite. Par conséquent, le chrome a été choisi en tant qu'un des éléments d'alliage de base des fontes blanches à plusieurs éléments. Cependant, sa teneur doit être limitée afin d'accorder la priorité à la précipitation d'autres types de carbures avec une dureté beaucoup plus élevée. Le chrome est un élément carburigène moyen, il forme des carbures intermédiaires de type M_7C_3 et $M_{23}C_6$.

Le chrome a trois fonctions majeures dans les fontes :

- Favorise la formation des carbures;
- Assure une résistance à la corrosion et à l'impact;
- Stabilise la structure pour les applications à hautes températures.

❖ Molybdène

Le molybdène est caractérisé par un point de fusion égale à 2622°C. Il est le plus souvent allié avec d'autres éléments. Sa présence dans les alliages ferreux favorise la formation des carbures.

Il génère un durcissement secondaire suite à la précipitation de carbures lors de la trempe. Le molybdène réduit, dans de larges proportions, la fragilité au revenu. Il accroît la limite d'élasticité et la résistance. Le molybdène dans les fontes blanches trempées se trouve réparti entre les carbures eutectiques et la matrice.

❖ **Vanadium**

Vanadium permet généré des carbures de très haute dureté (3000 HV). De petites additions (0.2% en masse) sont très efficaces pour éviter le grossissement du grain lors de traitement thermique. La teneur en vanadium est étroitement alliée à la teneur en carbone.

III.10 Mode d'usure

L'usure est l'une des formes de détérioration des matériaux dans l'industrie et représente un cout très important qui doit être optimisé. Inclue la perte de matériaux à partir d'une surface et transfert de ce matériau d'une surface vers une autre surface. L'usure est aussi un endommagement d'une surface, qui généralement induit une perte de matière progressive suite aux sollicitations relative entre cette surface et une substance. L'étude du phénomène d'usure a été étudiée en prenant en considération les différents types de contacts qui peuvent avoir lieu entre les matières.

Dans un contexte globale (large) de l'usure, les propriétés intrinsèques de la surface du matériau telles que la dureté, résistance, ductilité,...etc, sont des facteurs importants de la résistance à l'usure mais d'autres facteurs tel que la finition de la surface, la lubrification, la charge, la vitesse de corrosion, la température et les propriétés de la surface opposée sont également importants à prendre en considération.

L'usure a été classée en quatre grandes catégories qui se distinguent par les mécanismes mettant en œuvre l'abrasion, frottement, l'adhésion et l'usure corrosive. Dans tous les cas, les modes de dégradation conduisent à une perte de matière.

III.10.1 Usure abrasive

Le mécanisme de l'usure abrasive est principalement le même que celui rencontré lors de l'usinage, broyage et polissage. C'est l'arrachement des matériaux qu'est causé par l'action mécanique des particules discrètes en contact avec la surface détérioré. L'usure abrasive, à deux corps, a lieu lorsqu'une surface (généralement plus dure que la seconde) enlève du matériau à partir du second, quoique ce mécanisme change souvent en une usure à trois corps lorsque les débris générés jouent le rôle d'abrasifs entre les deux surfaces. En cours de broyage, ces matières abrasives produisent une série d'indentations. Pour lutter contre l'usure abrasive, on cherche à durcir les matériaux.

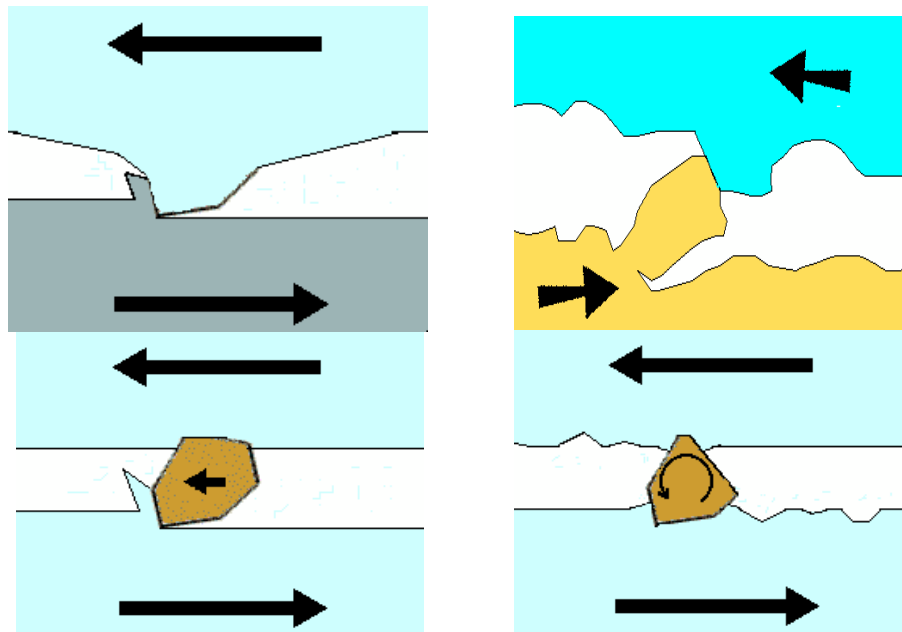


Figure III-15: schéma illustré l'usure par abrasion

❖ L'effet de l'abrasif sur l'abrasion

- Si l'abrasif est beaucoup moins dur que les matériaux usés, il y a peu ou pas d'abrasion ;
- Si l'abrasif et le matériau usé ont une dureté semblable, l'abrasion est à peu près proportionnelle à la différence de dureté entre les deux matériaux ;
- Il est important de remarquer que la dureté de l'abrasif a un effet sur la performance relative des matériaux ;

Pour les matériaux, tels les aciers et les fontes, une corrélation entre dureté et la résistance à l'abrasion, la figure 42 illustre l'effet de la dureté sur la résistance à l'usure par abrasion.

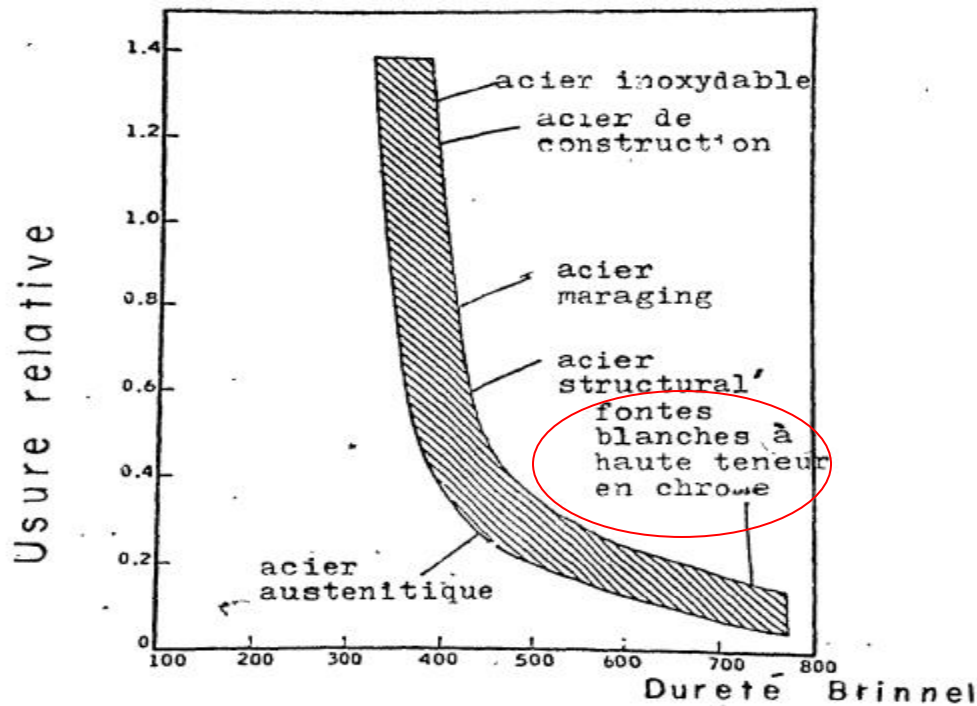


Figure III-16: l'abrasion relative en fonction de la dureté de Brinell, test sur les matériaux ferreux

Pour les matériaux, tels les fontes et les aciers, une corrélation entre la dureté de Brinell et la résistance à l'abrasion.

III.11 Conclusion

Cette partie a fait le point sur la notion des fontes en générale et sur les fontes à haute teneur en chrome en particulier. Dans cette étude théorique, nous avons dans un premier temps présente la notion des fontes en générale et particulièrement sur la fonte à haute teneur en chrome, leur propriété physique et mécanique, nous avons ensuite présenté les différents diagrammes de phase ainsi que l'influence des éléments d'addition sur la structure des fontes en fin le mécanisme de détérioration des pièces par abrasion.

Sur la base de l'étude théorique nous relevons les conclusions suivantes :

- a. Les propriétés mécaniques de la fonte au chrome sont déterminées par sa structure.
- b. L'addition des éléments d'alliages dans la fonte permet d'agir sur la structure et améliorer leur caractéristique mécanique, chimique et leur capacité à adapter aux traitements thermiques.
- c. Fonte au chrome procède un bon aspect de la résistance à l'usure par abrasion.

CHAPITRE 4

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Vous trouverez dans ce chapitre les techniques de :

- ✕ Préparation des échantillons
- ✕ L'analyse chimique
- ✕ Cycle de traitement thermique
- ✕ Examen métallographique
- ✕ Essai dureté
- ✕ Essai de l'usure

IV. Techniques Expérimentales de caractérisation :

IV.1 Introduction

Après la présentation des caractéristiques de la fonte au chrome, nous abordons dans ce chapitre les différentes techniques expérimentales ainsi que les paramètres de fonctionnement de chaque appareil pour bien mener les essais envisagés.

Nous disposons de 8 échantillons prélevés dans des éprouvettes de composition de 17% et 27% en chrome avec des traitements thermiques différents.

	Fonte 1 à 17% en Cr	Fonte 2 à 27% en Cr
Etat brut	Echantillon n° 1	Echantillon n° 5
Etat normalisé	Echantillon n° 2	Echantillon n° 6
Etat normalisé + trempe	Echantillon n° 3	Echantillon n° 7
Etat normalisé + trempe + revenu	Echantillon n° 4	Echantillon n° 8

Tableau IV-1: échantillons de l'analyse

IV.2 Préparation des échantillons

La préparation des échantillons est une étape primordiale dans le processus de la caractérisation. Les différents types d'échantillons utilisés dans ce travail nécessitent une adaptation importante, en particulier dans le cas d'un alliage de la fonte au chrome.

Pour la préparation des échantillons destinés à la métallographie, la dureté, la résilience et l'essai de traction, nous avons procédé comme suit :

- La préparation des moules en sable sous forme de barreaux cylindriques de diamètre 30 mm et de longueur 220 mm.
- La fusion de la fonte dans un four et l'addition des ferroalliages.
- Le découpage et l'usinage des échantillons pour les essais envisagés.

La figure ci-dessous illustre le protocole utilisé pour l'obtention des échantillons destinés aux essais envisagés.

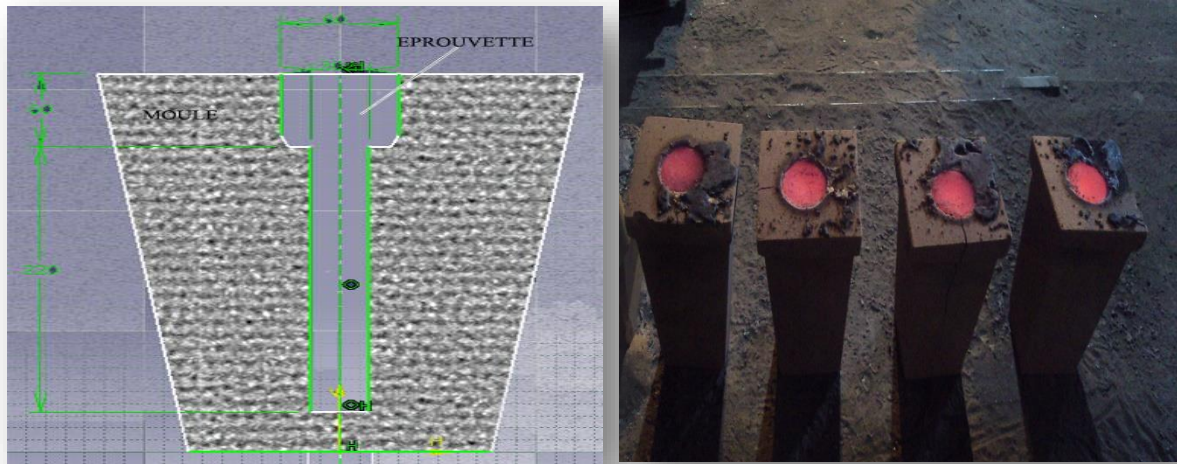


Figure IV-1: les épreuves

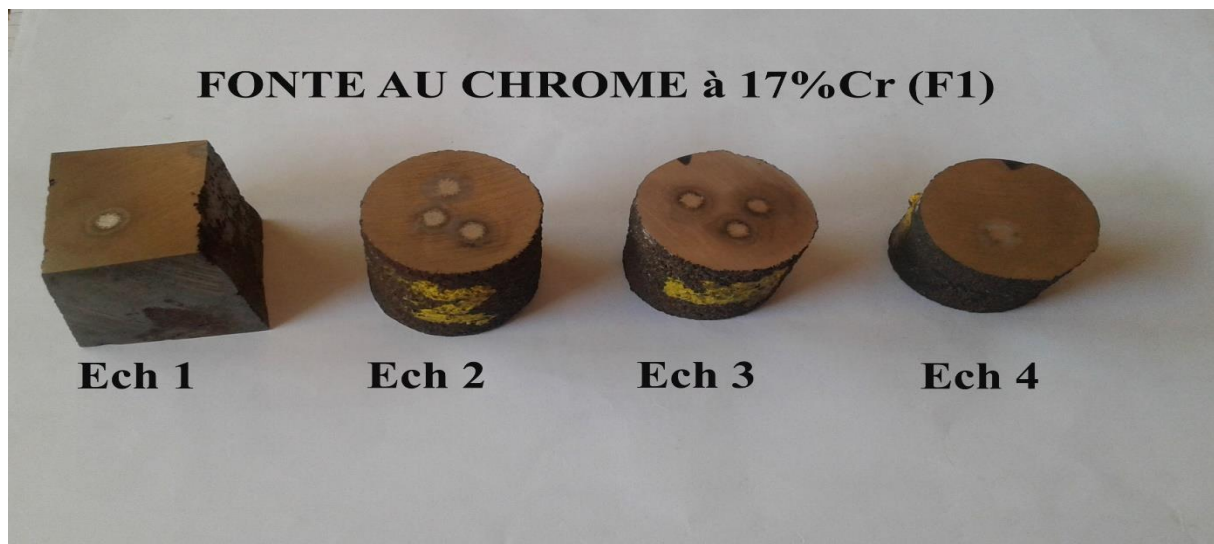


Figure IV-2: épreuves de la fonte au chrome à 17% (F1)



Figure IV-3: *échantillons de la fonte au chrome à 27% Cr (F2)*

Nous avons pratiqué les analyses suivantes :

1. Elaboration de la fonte et coulée des échantillons ;
2. Analyse chimique ;
3. Traitement thermique des échantillons coulés ;
4. Etude métallographique ;
5. Essai de la dureté ;
6. Essai de l'usure ;

IV.3 Analyse chimique

❖ But

La détermination de la composition chimique de l'alliage a une importance majeure, elle détermine l'ensemble de ses propriétés physiques et a un effet sur les structures en équilibre ou hors équilibre, ainsi que la cinétique des transformations des phases et les propriétés mécaniques. C'est une étape primordiale dans le processus de fabrication des pièces moulées.

Elle constitue la première étape de vérification dans le processus de la réalisation des pièces en fonderie, elle permet de déterminer la teneur de chaque élément constituant l'alliage.

❖ Appareil

L'analyse chimique des éprouvettes a été effectuée par spectromètre à émission optique.



Figure IV-4: spectromètre à émission optique

IV.3.1 Démarche d'analyse chimique

Pour réaliser l'analyse chimique, nous avons besoin d'une éprouvette en fonte au chrome sous forme d'une pastille, il est indispensable de préparer les échantillons en opérant comme suit :

- Prélever une quantité de matière fondue lors de la fusion par l'intermédiaire d'une louche. Cette coulée se solidifie dans un bain d'eau sous forme d'une pastille ayant la forme d'une médaille mesurant 40mm et 5mm suivant le diamètre et l'épaisseur respectivement ;
- Rectifier la surface à analyser ;
- Centrer le polychromateur ;
- Calibrer le programme choisi et identifier les étalons de calibrage ;
- Vérifier l'appareil après chaque calibrage ;
- Commencer l'analyse après avoir posé l'échantillon dans la machine ;

Une fois l'analyse commencée, un ordinateur connecté au spectromètre donne la composition chimique de la pastille ;



Figure IV-5: pastille de l'analyse chimique

IV.4 Cycle de traitement thermique

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage suivis de refroidissement qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus appropriées pour son emploi ou sa mise en forme. Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les caractéristiques de la fonte de composition déterminée. Trois types de traitement thermique sont examinés. Il s'agit d'une normalisation, trempe et revenu. On s'est limité aux traitements thermiques entrepris au niveau de l'industrie de la fonderie. Ils consistent à jouer sur trois paramètres : le temps, la température et le milieu de séjour durant les trois phases différentes : la montée en température, le maintien à température et le refroidissement.

IV.4.1 Normalisation

Ce traitement est appliqué aux fontes et aciers pour obtenir une dureté et une résistance mécanique supérieures à celles obtenues à l'état brut de la coulée ou par recuit.

Ce traitement consiste à chauffer la pièce à une température supérieure à l'intervalle de transformation et, après l'homogénéisation de la température, à la refroidir à l'air, de sorte que la matrice constituée soit perlitique : Ce traitement contribue à la perlitisation du métal.

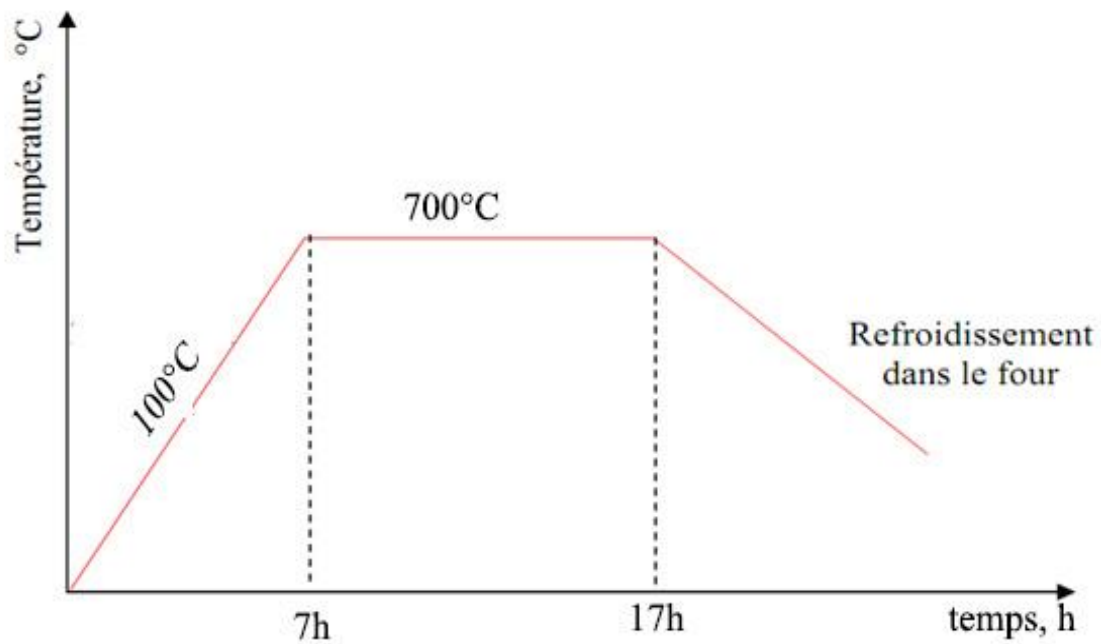


Figure IV-6: Cycle du traitement thermique de la normalisation de la fonte à 17% de chrome

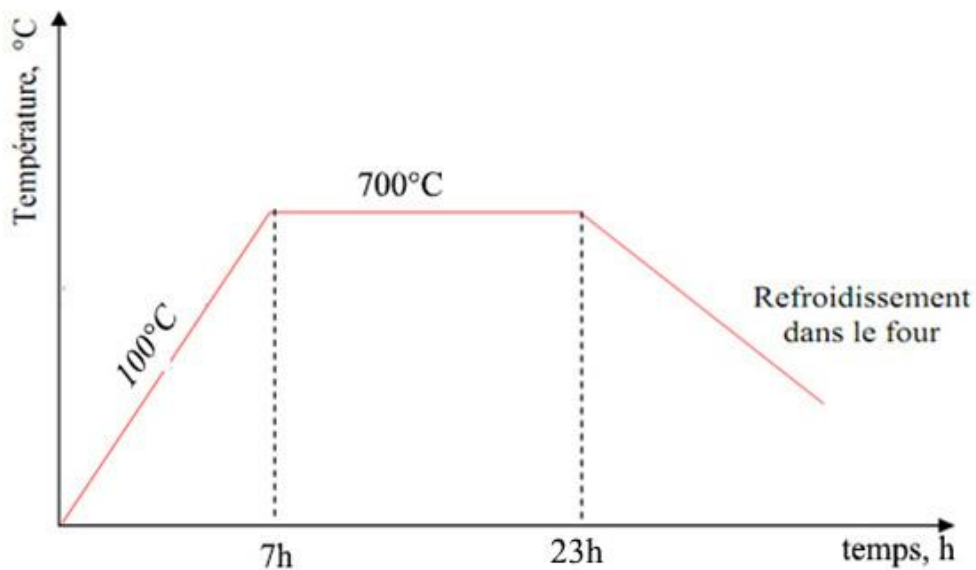


Figure IV-7: Cycle du traitement thermique de la normalisation de la fonte à 27% de chrome

IV.4.2 Trempe

La trempe est un procédé de durcissement qui consiste en une austénitisation de la fonte, au-dessus de la température de transformation, puis un refroidissement rapide à l'air comprimé. L'austénitisation consiste à chauffer la fonte dans le domaine austénitique à 950°C afin d'obtenir une matrice totalement austénitique avec une teneur en carbone assez homogène et définie.

Une fois l'échantillon est installé dans le four, on doit maintenir la température suffisamment longtemps pour permettre à la chaleur de se propager à travers toute la pièce. Donc, le temps de chauffage varie en fonction des dimensions de l'échantillon à tremper.

La trempe de la fonte permet d'augmenter sa dureté et sa résistance, on l'utilise pour les pièces mécaniques requérant une dureté importante pour résister à l'usure lors de leur fonctionnement mécanique.

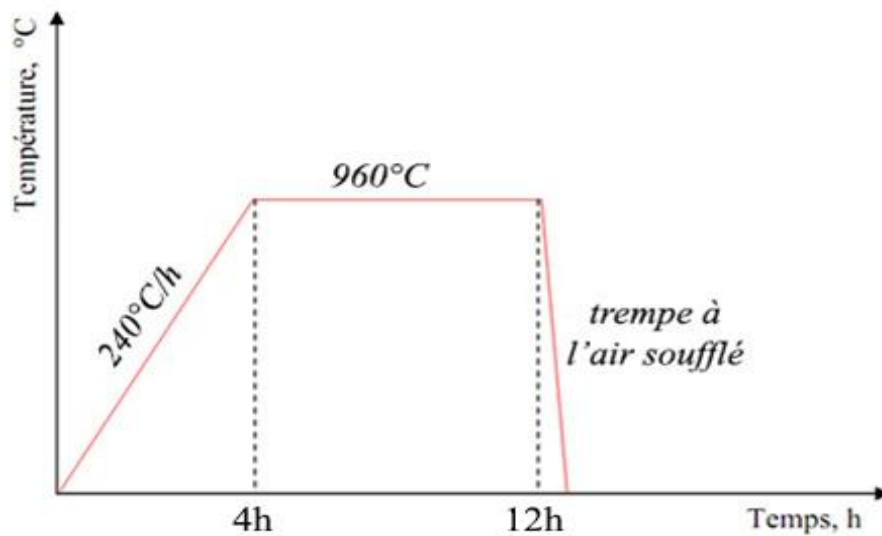


Figure IV-8: Cycle du traitement thermique de la trempe de la fonte à 17% de chrome

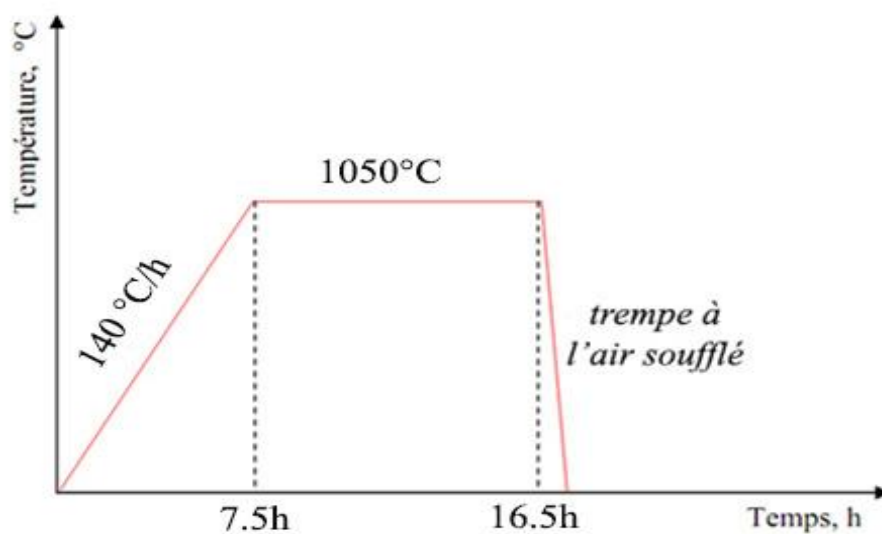


Figure IV-9 : Cycle du traitement thermique de la trempe de la fonte à 27% de chrome

IV.4.3 Revenu

Le traitement thermique du revenu consiste à diminuer la dureté des fontes ou de faciliter l'usinage. Ce traitement se fait dans un domaine de température inférieur à l'intervalle de transformation, comme montré dans la figure la vitesse d'augmentation peut atteindre jusqu'à 69°C/h , après maintenir pendant 8h à une température de 275°C puis à refroidir dans le four. Le revenu a lieu immédiatement après la trempe, afin de réduire les contraintes résiduelles, les risques de criquage et la quantité d'austénite résiduelle. C'est un essai qui est basé sur un mécanisme de diffusion faisant intervenir le temps et la température. Les figures suivantes représentent le cycle de traitement thermique de revenu employé pour les échantillons de la fonte au chrome.

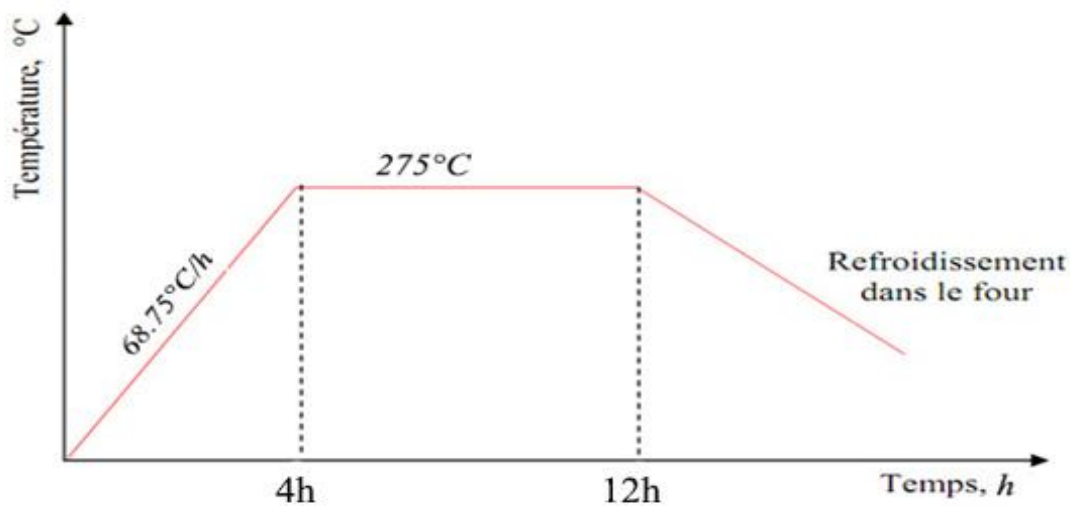


Figure IV-10: Cycle traitement thermique de revenu de la fonte 17% Cr

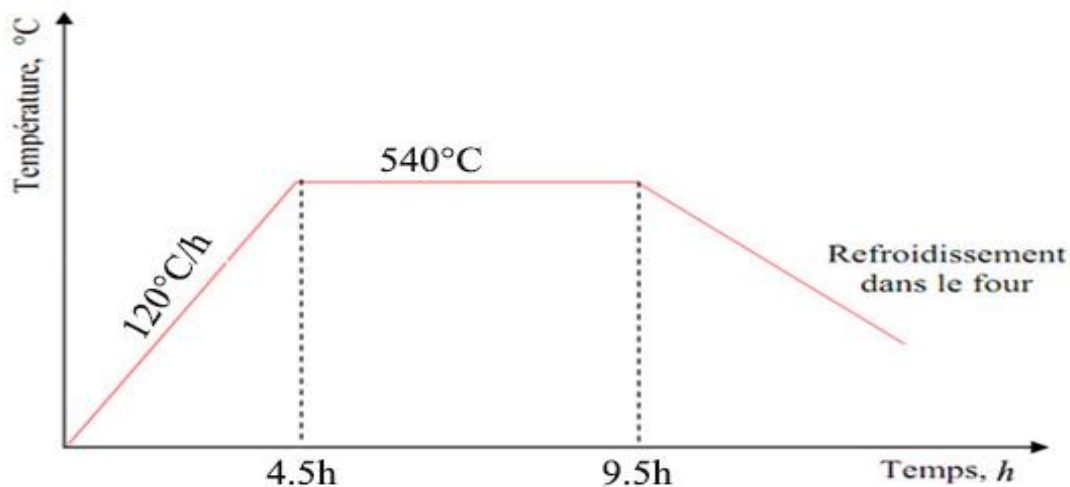


Figure IV-11: Cycle traitement thermique de revenu de la fonte 27% Cr

Les traitements de trempe et revenu n'ont pas seulement pour objectif l'augmentation de la dureté mais visent aussi à établir un bon compromis entre l'usinabilité et la résistance à l'usure.

IV.5 Examen métallographique

❖ Objectif

L'étude métallographique est un moyen de contrôler essentiellement la structure micrographique des matériaux métalliques. Elle consiste à définir leurs structures avec précision, à déterminer qualitativement leurs natures et formes et la répartition des leurs constituants. Elle nous permet aussi de mesurer les dimensions et de comprendre l'agencement des particules, grains ou inclusions qui constituent ces matériaux.

❖ Dispositif expérimental

Pour mettre en évidence la microstructure de nos échantillons, nous avons effectué une analyse métallographique des surfaces moyennant un microscope optique équipé d'une caméra vidéo. Il est possible de visualiser tout type de substrat avec un grossissement pouvant aller jusqu'à 240 fois.



Figure IV-12: le microscope de l'étude métallographique

❖ Préparation des échantillons

L'observation de la microstructure de la fonte au chrome nécessite une préparation préalable des échantillons. Pour ce faire, les substrats destinés à l'étude microstructurale doivent subir les opérations suivantes :

1. Le surfaçage pour obtenir une surface plane d'observation.
2. Le polissage mécanique via le papier abrasif constitué du carbure de silicium SiC. Il s'agit de commencer par les papiers les plus abrasifs puis passer successivement aux plus fins.
3. L'attaque chimique par la solution du nital (acide nitrique + éthanol) qui permet de révéler les rayures et rendre plus visible le substrat.



Figure IV-13: Amélioration de l'état de surface dans le plan d'observation

IV.6 Les essais mécaniques

Les propriétés d'un matériau sont mesurées en soumettant les pièces à des sollicitations similaires à celles qu'il pourrait subir lors de son utilisation.

IV.6.1 Essai de dureté

Les essais de dureté superficielle ont été effectués à température ambiante. La dureté est la caractéristique la plus fréquemment mesurée vu qu'elle est effectuée au moyen d'un essai simple à manipuler et que la plupart de propriétés intéressantes de la fonte sont en relation directe avec sa dureté. Pour une composition chimique précise de la fonte au chrome, la dureté constitue un bon indicateur sur des propriétés telles que la résistance à l'usure, la résistance aux chocs et la ténacité de la fonte, la résistance à la traction R_m et la limite élasticité R_e .

La dureté d'un matériau est représentée par sa résistance à la pénétration d'un pénétrateur dont la forme dépend de l'essai de dureté choisi. Durant l'essai de dureté, une empreinte entourée d'une zone déformée plastiquement se forme. Elle peut être évaluée via de divers essais dont la principale différence réside dans la forme de la pointe de la pénétration. Elle est

mesurée en tenant compte de la profondeur à laquelle une pointe pénètre dans le métal lorsqu'on applique une charge donnée.

Dans ce travail, nous avons pénétré plusieurs fois dans le substrat du matériau étudié à l'aide duromètre pour mesurer la dureté Rockwell cône HRC.

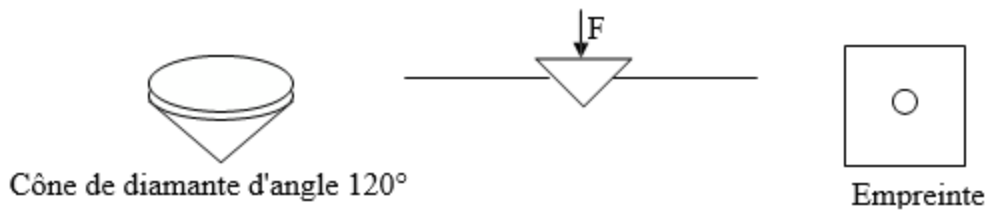


Figure IV-14: principe de l'essai de dureté HRC

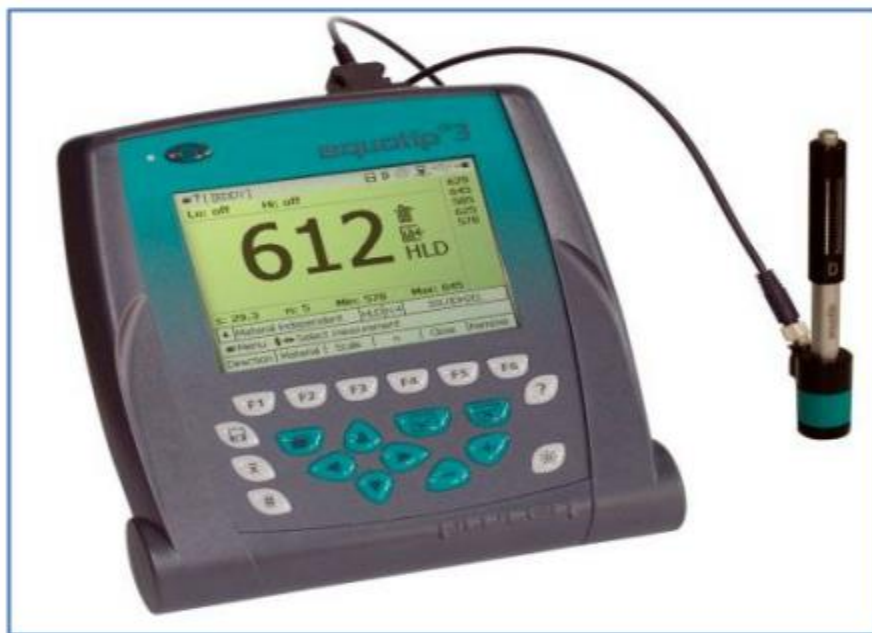


Figure IV-15: Duromètre Equotipe

IV.6.1.1 Le mode opératoire :

Le duromètre Equotipe pour métaux facilite la mesure statique de la dureté de surfaces métalliques. Un pénétrateur diamant entre dans la pièce et en ressort sans la détruire, par un procédé de chargement-déclenchement, dans toutes les directions. Il n'y a pas de vibration même sur des pièces de taille réduite. Le duromètre pour métal possède des charges faibles pour les surfaces sensibles, et admet tous les poids d'échantillon. Le duromètre Equotipe peut s'associer à un duromètre à unité électronique séparée pour mesure dynamique afin de combiner le principe de mesure Rockwell à celui par rebond Leeb et se relie directement à un ordinateur.

Ainsi, pour mesurer la dureté des fontes étudiée par le biais du duromètre Equotipe, il s'avère indispensable de suivre la procédure suivante :

1. Mettre le duromètre sur la surface à contrôler perpendiculairement à l'échantillon.



2. Pousser le tube d'actionnement vers la pièce après l'emplacement du duromètre et son maintien.



3. Effectuer une nouvelle poussée du tube d'actionnement.



4. Visionner le résultat immédiatement de la mesure dans l'échelle de dureté sélectionnée.

IV.7 Usure par abrasion

L'essai consiste à mesurer la quantité de matière perdue après le passage de 50 minutes de l'échantillon sur un papier abrasif de granulométrie 600mm avec une vitesse de rotation de 60 tr/min.

❖ Dispositif expérimental et les conditions d'essai

Le dispositif utilisé est une polisseuse de vitesse variable, les échantillons sont fixés sur le dispositif. Les paramètres pris en considération sont le poids appliqué à l'échantillon de forme cylindrique. La perte de masse absolue est déterminée selon la relation suivante :

$$\Delta P = P_o - P_i$$

Équation IV-1: perte de masse

- P_o : le poids initial mesuré avant de l'usure.
- P_i : le poids mesuré après de l'usure.

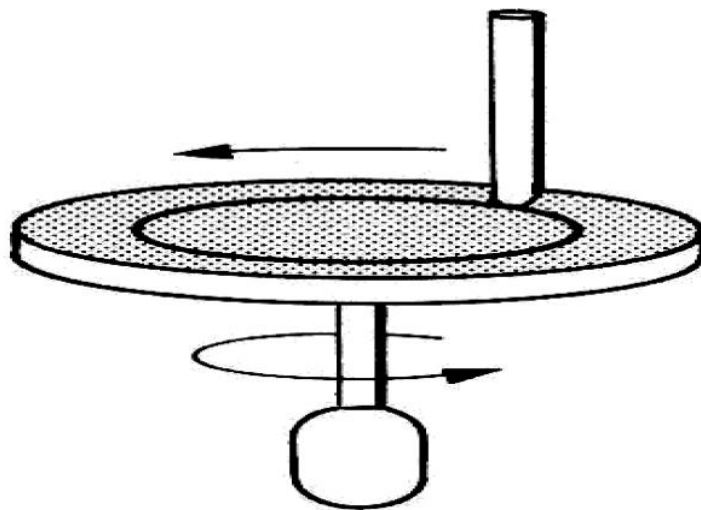


Figure IV-16 : schéma de l'installation de l'usure par abrasion



Figure IV-17: dispositif utilisé pour l'essai de l'usure par abrasion

CHAPITRE 5

L'ANALYSE DES RÉSULTATS

Vous trouverez dans le dernier chapitre les résultats de l'essai :

- ✕ Analyse chimique
- ✕ Métallographie
- ✕ Dureté
- ✕ Usure

V. Résultats et Discussions

V.1 Introduction

Nous avons explicité dans le chapitre précédent les différentes techniques expérimentales pour les essais projetés.

V.2 Analyse chimique

Les propriétés mécaniques sont directement liées à la composition chimique. L'analyse de la composition chimique de la fonte de base révèle qu'il s'agit d'une fonte hypoeutectique. Le chrome et le carbone sont les principaux éléments d'alliage de la fonte à haute teneur en chrome, ils assurent la formation de la phase martensitique. L'addition du molybdène de teneur assez faible entraîne la disparition du graphite et l'apparition des carbures spéciaux en revanche.

V.2.1 Composition chimique de la fonte de base à 17% de chrome

		%C	%Mg	%Si	%P	%S	%Cr	%Mn	%Fe	%Ni	%Cu	%Mo
Fonte F1	Ech 1	2.56	0.0104	0.795	0.0273	0.0329	17.73	0.568	76.5	0.142	0.504	0.850
	Ech 2	2.61	0.0107	0.779	0.0261	0.0325	18.33	0.566	76	0.143	0.458	0.803
	Ech 3	2.52	0.0105	0.779	0.0313	0.0340	17.73	0.565	76.5	0.144	0.511	0.858
	Ech 4	2.42	0.0105	0.813	0.0259	0.0359	17.44	0.572	76.9	0.143	0.522	0.817

Tableau V-1: la composition chimique de la fonte à 17% de Cr

❖ Remarque

L'analyse de la composition chimique montre que les teneurs des éléments principaux tels que le fer et le carbone et le chrome, ne varient après les traitements thermiques entrepris. Généralement, un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique, mais apporte des modifications sur la microstructure et les propriétés mécaniques.

V.2.2 Composition chimique de la fonte de base à 27% de chrome

		%C	%Mg	%Si	%P	%S	%Cr	%Mn	%Fe	%Ni	%Cu	%Mo
Fonte F2	Ech 5	3.5	0.016	0.4	0.028	0.046	27.5	0.6	67.5	0.445	0.3	1.68
	Ech 6	4,527	0,017	0,371	0,028	0,043	34,87	0,591	57,117	0,448	0,216	1,765
	Ech 7	3,414	0,016	0,336	0,034	0,036	24,641	0,777	68,551	0,523	0,255	1,418
	Ech 8	4,22	0,017	0,365	0,029	0,024	31,945	0,604	60,293	0,485	0,221	1,797

Tableau V-2: la composition chimique de la fonte à 27% Cr

❖ Remarque

Les teneurs en carbone, chrome, manganèse et molybdène sont différents pour l'échantillon 7 de la fonte 2. Donc, nous pouvons supposer deux hypothèses : Soit les protocoles des traitements thermiques n'ont pas été respectés, sinon il y a ségrégation au niveau des échantillons après les traitements.

V.3 Formation des carbures dans les fontes au chrome

Il est primordial d'ajuster la teneur en chrome en fonction de celle du carbone afin d'éviter la formation de carbures hypereutectiques de ténacité relativement basse.

Pour les nuances à base de 17% et 27% en chrome, le carbone doit être compromis entre 2.11 et 4.5% pour rester dans le domaine de la fonte hypoeutectique.

La relation suivante permet déterminer la quantité des carbures eutectiques:

$$\% \text{ Carbure} = 11.8 (\% \text{C}) + 0.5 (\% \text{Cr}) - 13.4$$

Équation V-1: Ajuste le pourcentage de carbure eutectique dans les fontes au chrome

		C %	Cr%	carbure %
Fonte F1	Ech 1	2,56	17,73	25,673
	Ech 2	2,61	18,33	26,563
	Ech 3	2,52	17,73	25,201
	Ech 4	2,42	17,44	23,876
Fonte F2	Ech 5	3,5	27,5	41,4
	Ech 6	4,527	34,87	57,4536
	Ech 7	3,414	24,641	39,2057
	Ech 8	4,22	31,945	52,3685

Figure V-1: répartition le pourcentage des carbures eutectiques

V.4 Examen Métallographie

Nous avons effectué une analyse micrographique illustrant les microstructures des fontes à 17% et 27% en chrome faisant le sujet de notre étude suivant de divers cas de figures en fonction de l'état du traitement thermique : à l'état brut de la coulée, après le traitement thermique de la normalisation, après le traitement thermique de la trempe et après le traitement thermique du revenu.

V.4.1 Microstructure de la fonte à 17% Cr (F1)

❖ Echantillon 1

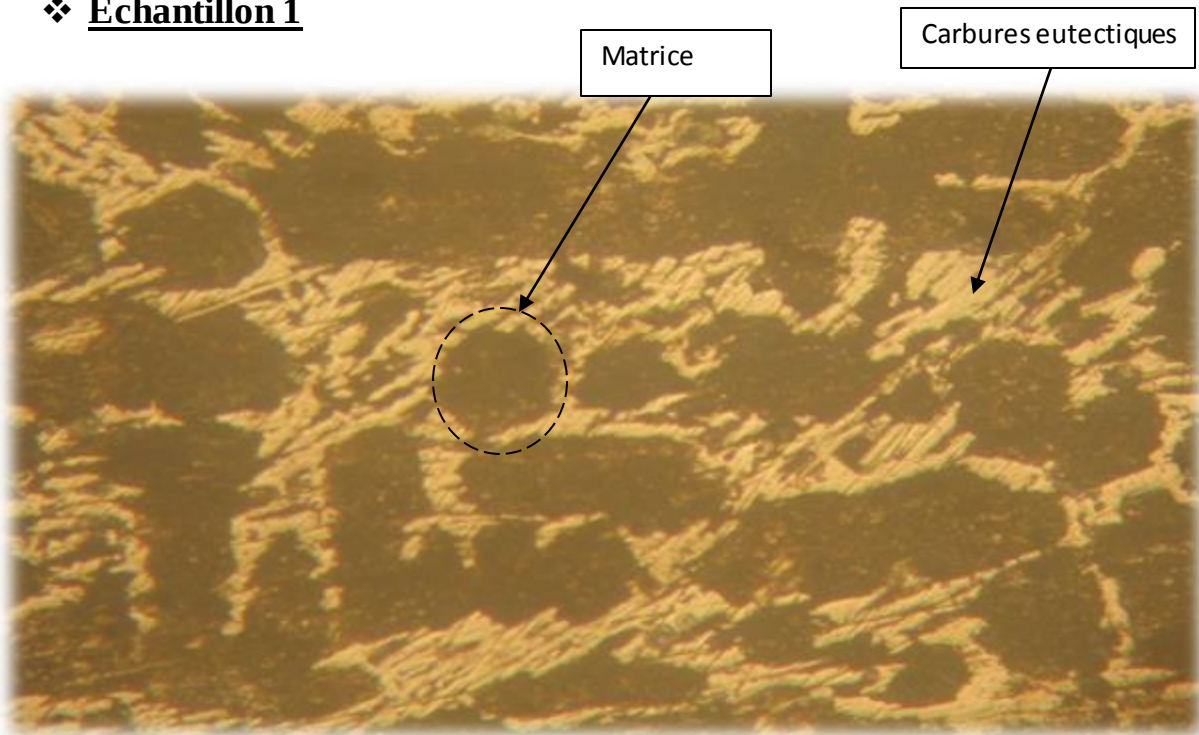


Figure V-2: microstructure de la fonte1 à l'état brut de la coulée. Gr: 6×20

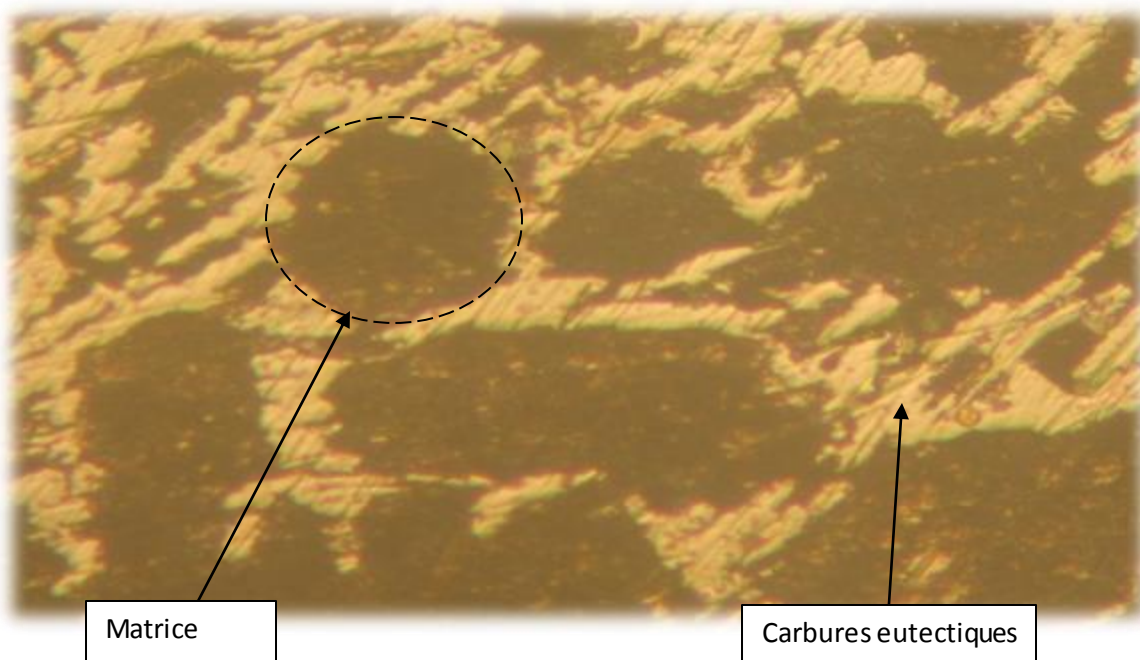


Figure V-3: microstructure de la fonte à l'état brut de la coulée. Gr: 12×20

❖ Echantillon 2

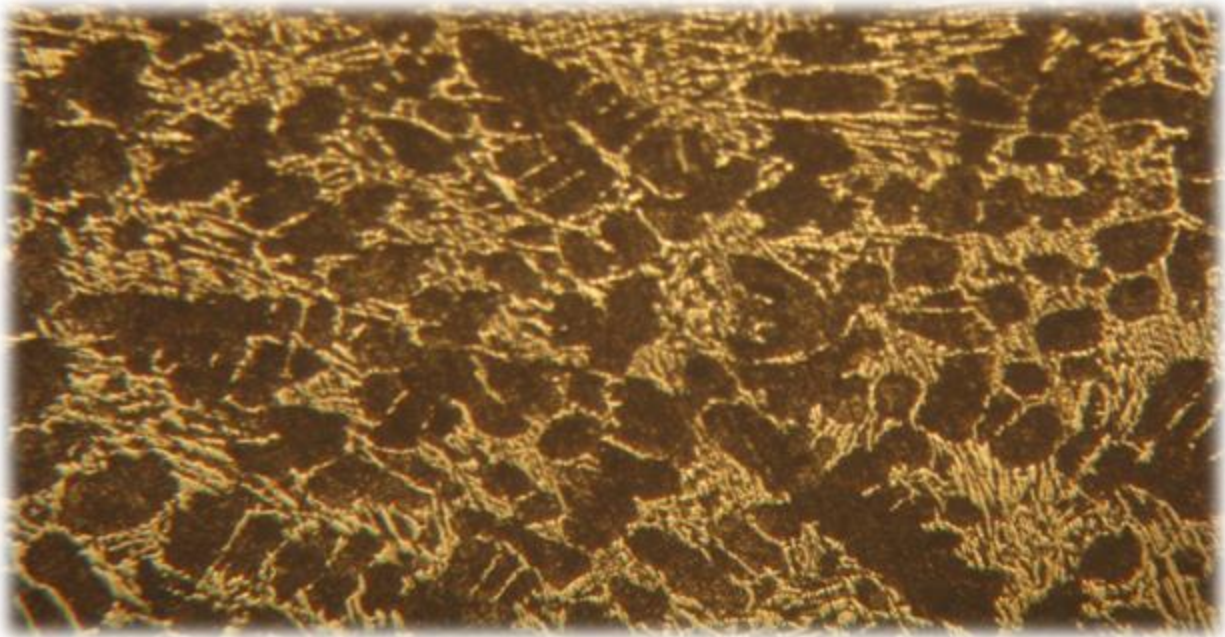


Figure V-4: microstructure de la fonte 1 après la normalisation. Gr : 6×10

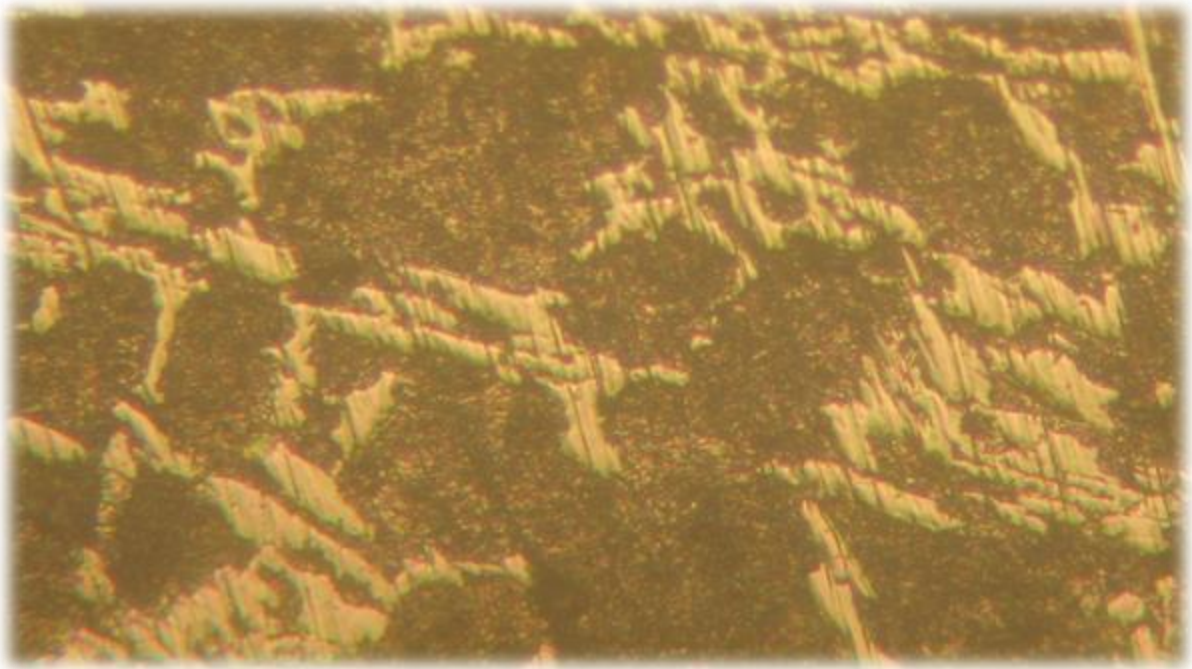


Figure V-5: microstructure de la fonte 1 après la normalisation. Gr : 12×20

❖ Echantillon 3

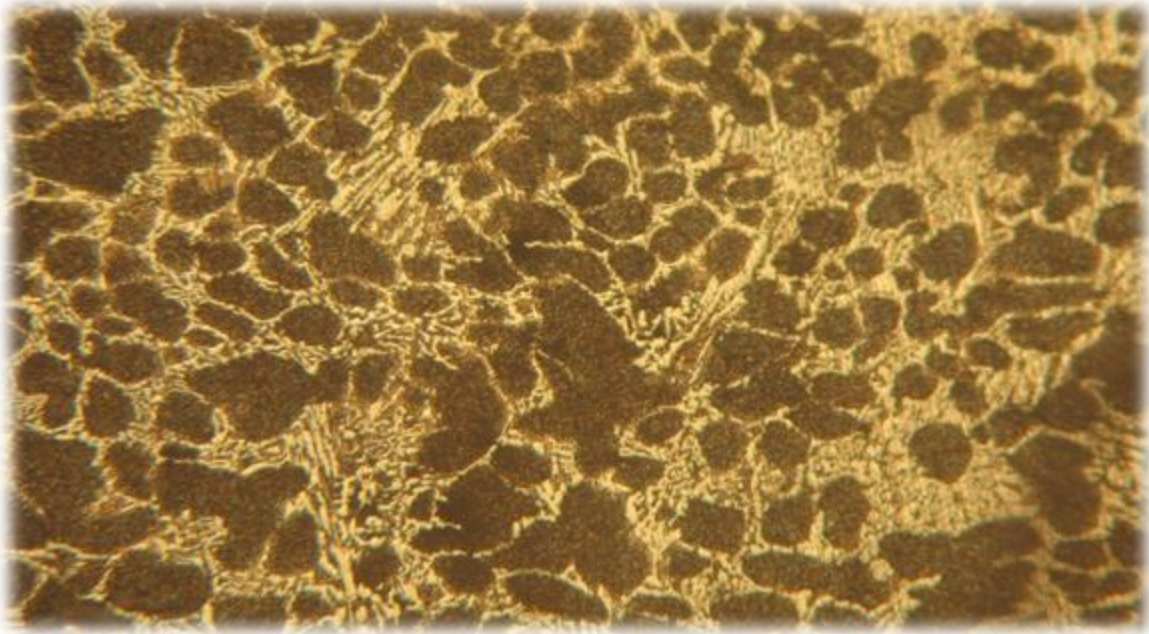


Figure V-6: microstructure de la fonte1 après normalisation + trempe. Gr : 10×6

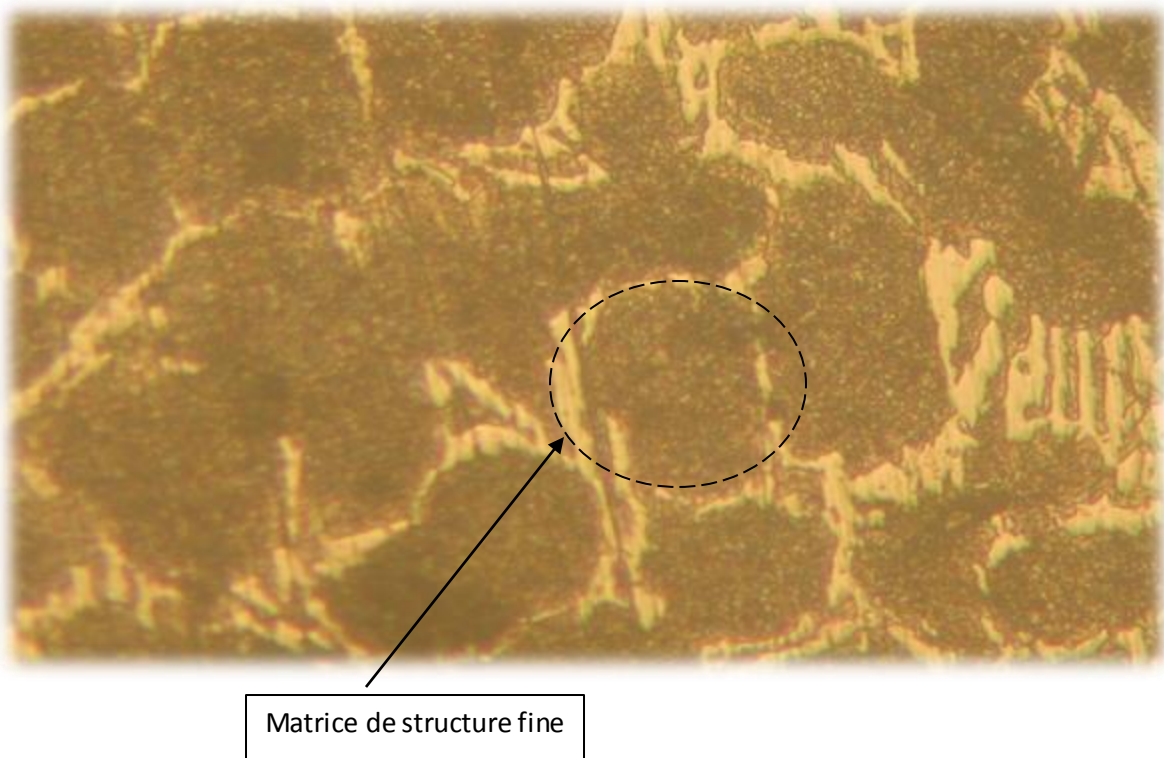


Figure V-7: microstructure de la fonte1 après normalisation + trempe. Gr : 10×6

❖ **Echantillon 4**

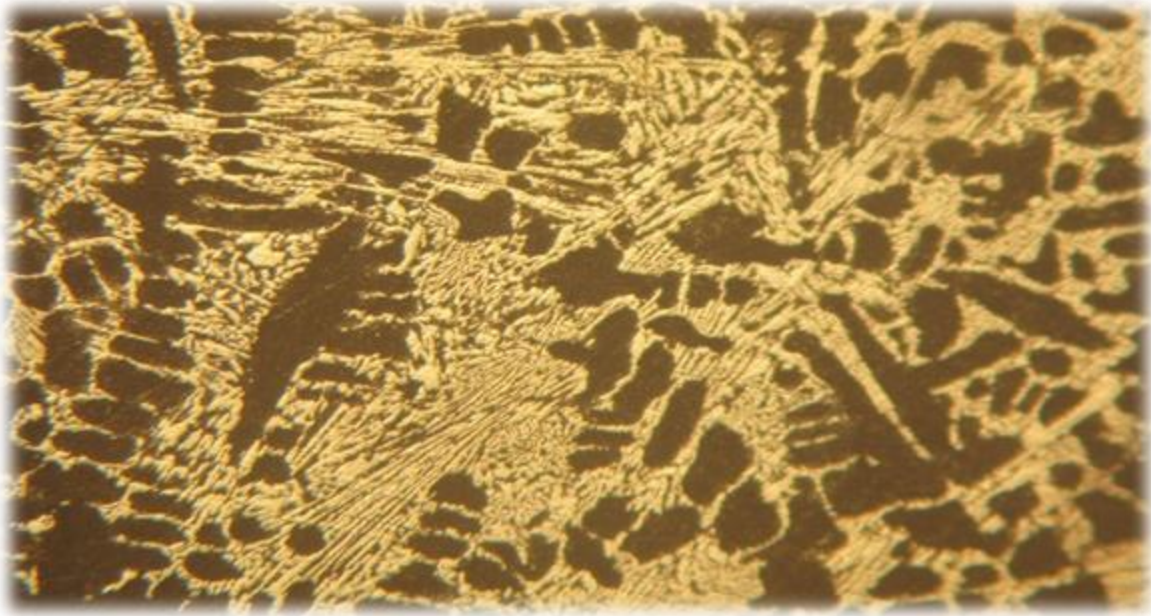


Figure V-8: microstructure de la fonte1 après normalisation + trempe. Gr : 10×6

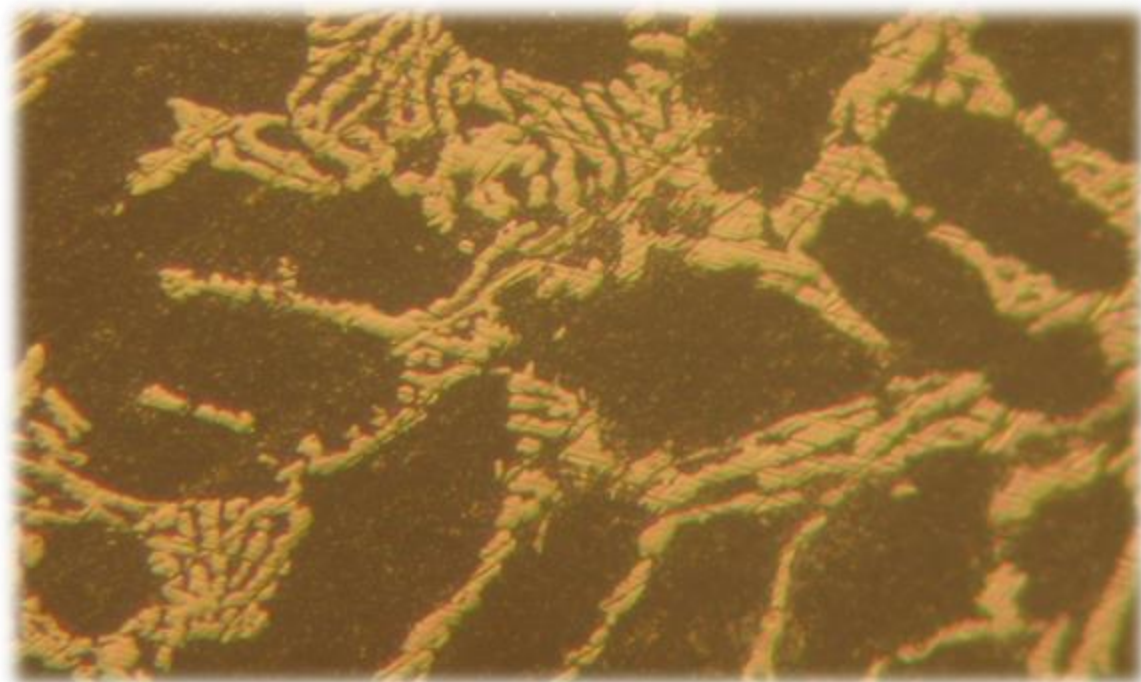


Figure V-9: microstructure de la fonte1 après normalisation + trempe. Gr : 10×6

V.5 Interprétation de l'examen métallographie de la fonte à 17% Cr (F1)

Les caractéristiques mécaniques des fontes coulées résultent de la forme et des types des carbures précipités ainsi que de la matrice sur laquelle ils se situent. Ces propriétés sont aussi affectées par la taille, la distribution et la quantité des carbures présentes dans la pièce.

La fonte faisant le sujet de l'étude est hypoeutectique contenant 2.5% de carbone et 17% de chrome. Les résultats de l'étude métallographie effectuée après les traitements thermiques montrent la formation de carbures primaires de types $(Cr, Fe)_7C_3$ et $(Cr, Fe)_{23}C_6$ qui sont supportés par une matrice martensitique de structure non fine. Le carbure M_7C_3 est un carbure riche en chrome et qui existe sous trois formes cristallographiques : hexagonal, orthorhombique ou trigonal. Il ne peut se former que si la teneur en chrome est suffisamment élevée par rapport aux autres éléments d'alliage. La présence du molybdène avec une teneur assez faible entraîne la formation du carbure $M_{23}C_6$. Ce dernier est un carbure riche en chrome et plus stable par sa structure cristalline cubique à faces centrées CFC. Ainsi, la présence de ces deux carbures primaire confère à la fonte ses propriétés intrinsèques de dureté et de rigidité.

D'autre part, la microstructure de la fonte examinée à l'état brut de la coulée (échantillon N°1), montre que ces carbures précipitent aux joints des grains et que l'orientation des aiguilles se fait de manière aléatoire, ce qui engendre une très faible résistance au choc.

L'observation de la microstructure effectuée sur les échantillons après la normalisation (échantillon N°2), montre que la phase majoritaire est une matrice de phase perlitique. Cette transformation de phase après le traitement se fait au point eutectoïde, ce qui engendre la diminution des carbures de chrome M_7C_3 et $M_{23}C_6$ qui existent au niveau des joints de grains.

En passant à l'observation des échantillons traités après la normalisation et la trempe (échantillon N°3), nous constatons que la matrice est martensitique de structure fine, nous constatons aussi la diminution de la concentration des carbures vu leur précipitation aboutissant à l'apparition des carbures secondaires.

En ce qui concerne la structure métallographie des échantillons traités par revenu (échantillon N°4), nous avons constaté qu'elle n'a pas changé et est restée martensitique, ce qui justifie l'effet du revenu qui est de réduire et relaxer les contraintes résiduelles.

V.5.1 Microstructure de la fonte à 27% Cr (F2)

❖ Echantillon 5

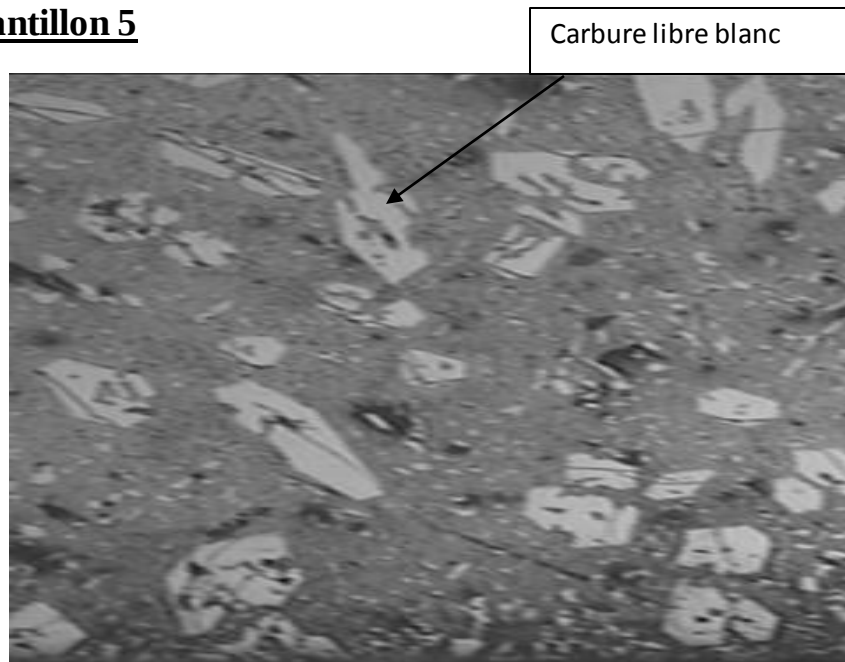


Figure V-10: microstructure de la fonte 2 à l'état brut. Gr : 100

❖ Echantillon 6



Figure V-11: microstructure de la fonte 2 après la normalisation. Gr : 200

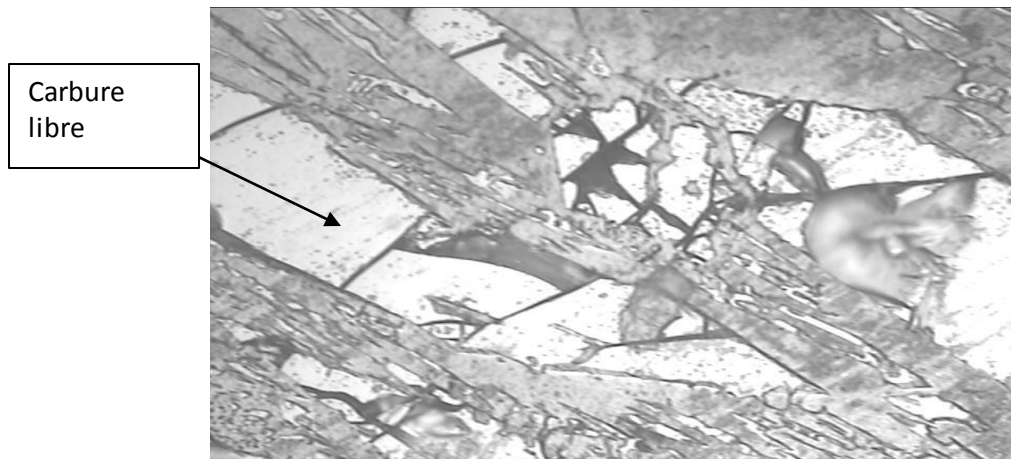


Figure V-12: microstructure de la fonte 2 après la normalisation. Gr : 400

❖ **Echantillon 7**

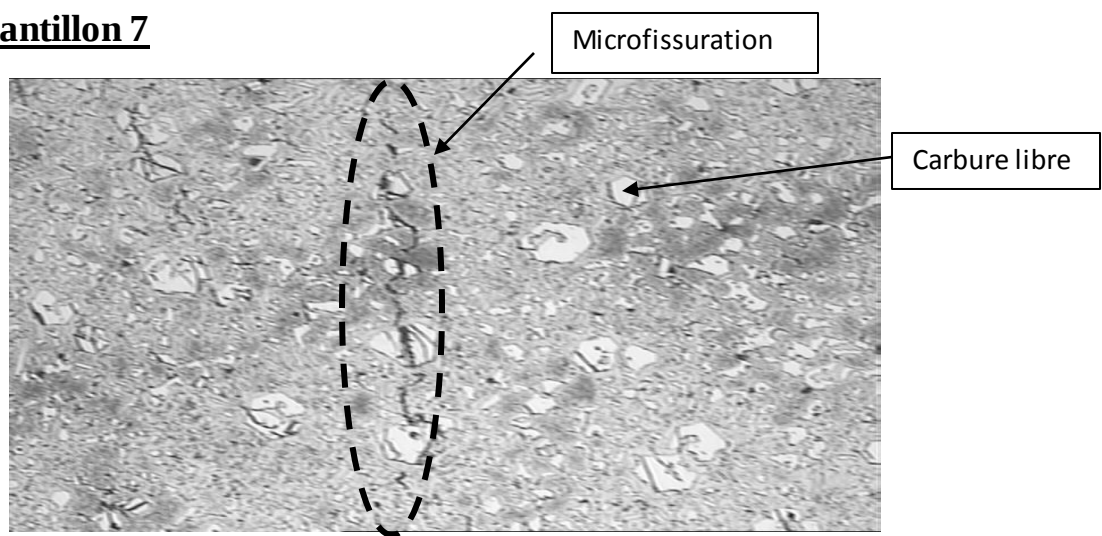


Figure V-13: microstructure de la fonte 2 normalisée + trempée. Gr : 200

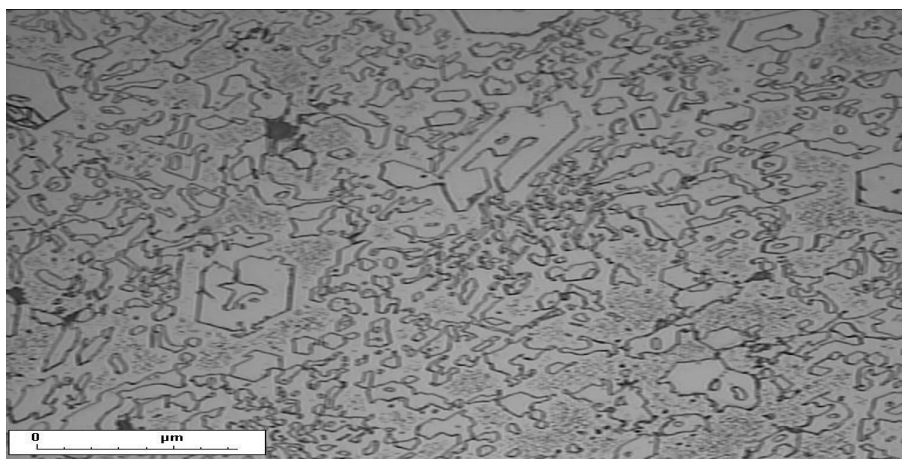


Figure V-14: microstructure de la fonte 2 normalisée + trempée. Gr : 400

❖ **Echantillon 8**

Figure V-15: microstructure de la fonte 2 après normalisation + trempe + revenu. Gr :100

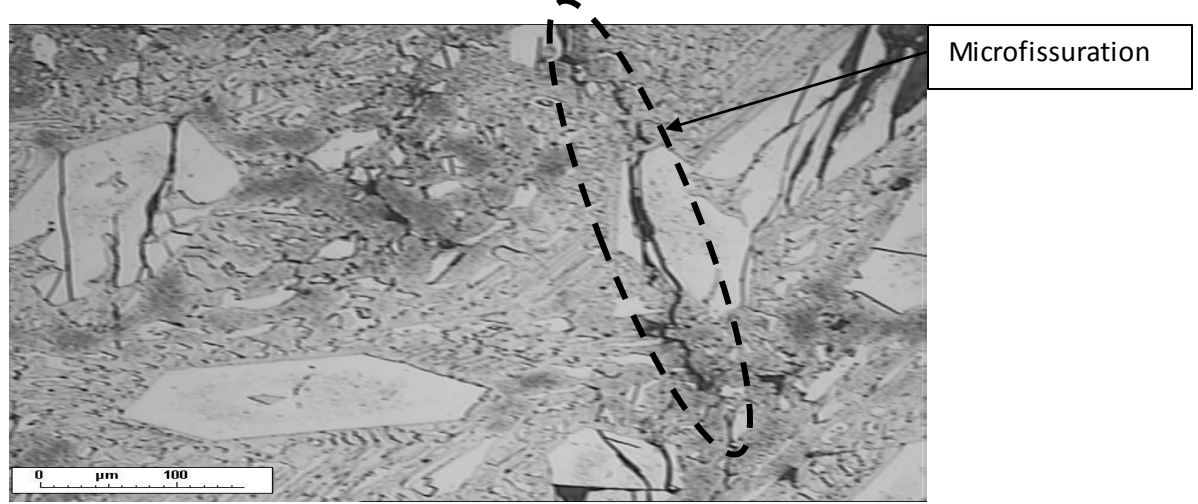


Figure V-16: microstructure de la fonte 2 après normalisation + trempe + revenu. Gr :200

V.6 Interprétation de l'examen métallographie de la fonte à 27% Cr (F2)

La structure est composée de gros carbures primaires blancs, de carbures secondaires sous formes de lamelles dans une matrice perlitique. Nous remarquons surtout la présence de microfissures que l'on visualise dans les carbures primaires. Ces microfissures peuvent se propager de grains en grains.

Nous remarquons sur l'échantillon numéro 7 que la matrice est composée de fins précipités sur un fond blanc, ce qui doit vraisemblablement être de l'austénite. La morphologie de cette structure est proche d'une martensite. Nous notons aussi la présence de tapures reliées à la surface qui apparaissent après polissage.

Nous constatons davantage un phénomène de microfissuration dans les grains qui semble accentué par rapport aux échantillons 7 et 8.

V.7 Analyse mécanique

V.7.1 Dureté

Vu la relation entre la dureté et la plupart des propriétés intéressantes des fontes, la mesure de la dureté permet d'assurer la validation de l'identification des échantillons. L'essai de dureté a été effectué dans ce travail à l'échelle de Rockwell HRC et Brinell HB.

Les résultats de l'essai de dureté pour les fontes étudiée sont présentés dans les tableaux suivants :

		Ech1	Ech2	Ech3	Ech4
Fonte 1	dureté HRC	43.5	32.7	55.2	45.8
		43.9	35.3	56	43.9
		43.7	35.2	57.4	43.8
	moyenne	43.7	34.4	56.2	44.5

Tableau V-3: Mesure de dureté de la fonte à 17% Cr (F1)

Les mesures de dureté sont effectuées après le polissage mécanique et l'attaque chimique des échantillons ayant subi de différents traitements thermiques.

		Ech5	Ech6	Ech7	Ech8
Fonte 2	dureté HRC	58.1	46.3	61.5	59.2
		59.5	47.1	59.1	59.8
		60.36	46.7	46.7	58.5
	moyenne	59.32	46.7	61.03	59.16

Tableau V-4: Mesure de dureté de la fonte à 27% Cr (F2)

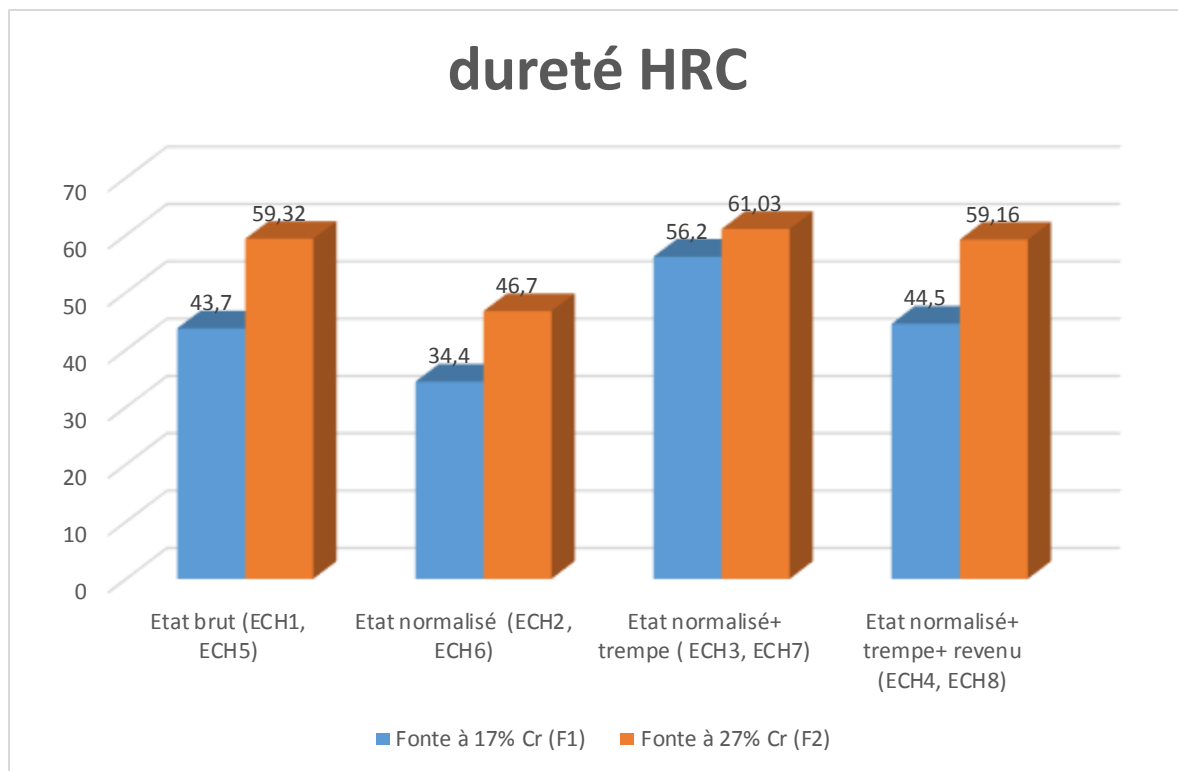


Figure V-17: résultats de la dureté HRC des échantillons étudiés

Les résultats de cet essai mettent en évidence l'influence du changement de la structure de la fonte de base sur la variation de la dureté, on constate que la différence entre les duretés des 8 échantillons est due aux effets des traitements thermiques envisagés pour chaque échantillon.

V.7.2 Relation entre la dureté Rockwell C et la résistance à la traction

L'essai de dureté à l'échelle HRC mené durant l'étude a montré que la fonte alliée au chrome est très dure : elle peut atteindre jusqu'à 56 HRC. Par conséquent, il s'avère difficile d'usiner ces fontes pour en obtenir des éprouvettes pour effectuer l'essai de traction. En revanche, la dureté Rockwell est liée aux caractéristiques contrainte-déformation du matériau.

En particulier, une formule liant la résistance mécanique R_m à la dureté Rockwell HRC nous permet de déduire la valeur de la résistance à la traction, elle est de la forme :

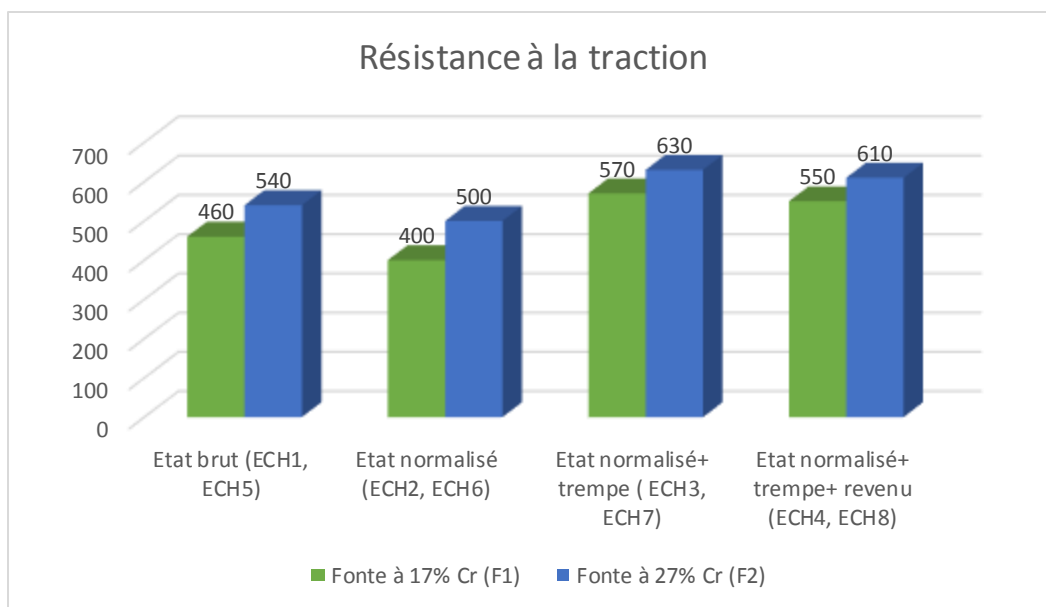
$$HRC = a \times R_m$$

Équation V-2: relation entre la dureté de Rockwell C et la résistance à l'attraction

Résistance à la traction R_m (MPa)	Fonte 1			
	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4
	460	400	570	550

Tableau V-5: les valeurs de la résistance à la traction

Résistance à la traction R_m (MPa)	Fonte2			
	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8
	540	500	630	610

Tableau V-6: Les valeurs de la résistance à la traction de la fonte 2**Figure V-18:** résultats de la résistance mécanique R_m des échantillons étudiés

V.7.3 L'essai de l'usure

Les résultats de l'usure par abrasion pour les différents échantillons étudiés avant et après le traitement sont présentés dans le tableau suivant :

		poids avant l'usure P_i (g)	poids après l'usure P_o (g)	perde de poids ΔP (g)
Fonte F1	Ech1	262.44	262.4	0.040
	Ech2	236.523	236.5	0.023
	Ech3	204.615	204.6	0.015
	Ech4	217.618	176.6	0.018

Tableau V-7: variation de la perte de masse après l'usure par abrasion de la fonte 1

		poids avant l'usure P_i (g)	poids après l'usure P_o (g)	perde de poids ΔP (g)
Fonte F2	Ech5	205.486	205.451	0.0 35
	Ech6	216.453	216.433	0.020
	Ech7	200.5	200.490	0.010
	Ech8	218.438	218.425	0.013

Tableau V-8: variation de la perte de masse après l'usure par abrasion de la fonte 2

La perte de masse de la fonte de base à l'état brut est de 0.04 g pour la fonte 1 et 0.035 g pour la fonte 2. Après les traitements thermiques de normalisation, trempe et revenu, la résistance de l'usure par abrasion s'est notamment améliorée par rapport à la fonte à l'état brut de la coulée.

L'amélioration de la résistance à l'usure est expliquée par le changement de structure entre les différents échantillons ainsi que l'augmentation de la dureté et plus particulièrement après le traitement thermique de la trempe.

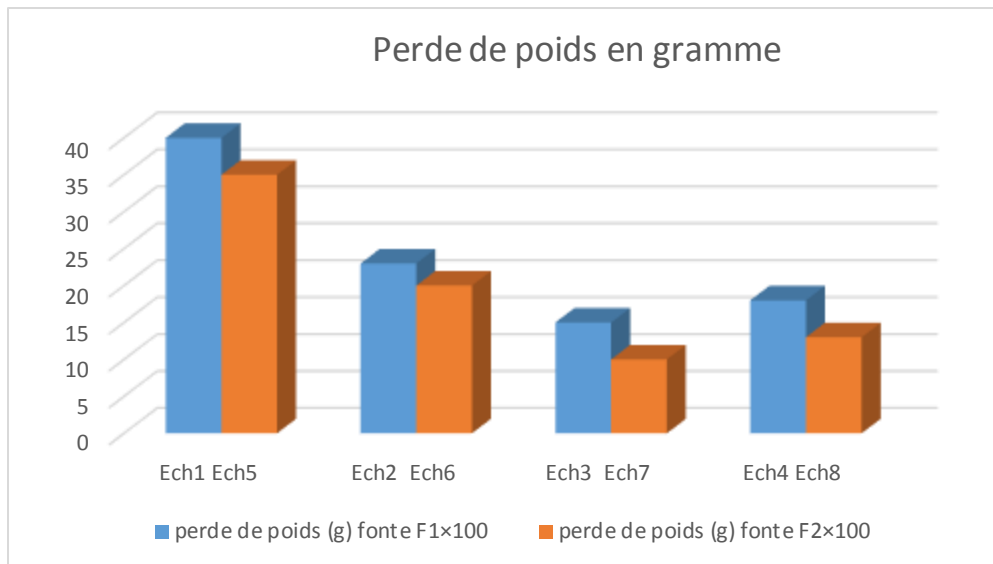


Figure V-19: résultats de la perte de masse des échantillons étudiés

Nous constatons que la meilleure résistance à l'usure par abrasion est obtenue après le traitement thermique de la trempe.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce projet de fin d'études a pour objectif la caractérisation des fontes à hautes teneurs en chrome destinées à la fabrication des pièces moulées sollicitées par l'usure tels que les marteaux, les battoires et les mâchoires. Nous avons étudié deux nuances de la fonte avec des teneurs respectives de 17% et 27% en chrome et une teneur moins importante en molybdène. Pour étudier l'effet des traitements thermiques sur ces deux nuances, elles ont subi la normalisation, la trempe et le revenu.

L'analyse chimique de la fonte à 17% en chrome a montré qu'elle est hypoeutectique et que sa composition chimique ne varie pas après les traitements thermiques. Par contre l'analyse chimique de la fonte à 27% montre que les teneurs en éléments d'alliage changent. Ceci nous amène à supposer 2 hypothèses : soit les protocoles des traitements thermiques n'ont pas été respectés, soit il y a ségrégation au niveau des échantillons après les traitements.

L'étude métallographique a révélé plusieurs structures de finesse et répartition variable en fonction du type de traitement thermique adopté. Les microstructures des deux fontes après les traitements thermiques comprennent les carbures eutectiques de types M_7C_3 et $M_{23}C_6$ riches en chrome et supportés par une matrice martensitique fine, ce qui leur confère aux deux fontes de grandes duretés beaucoup plus intéressantes que leur duretés à la coulée.

L'addition du chrome dans les fontes étudiées a permis une amélioration très remarquable de la dureté à l'état brut de coulée comme à l'état après les traitements thermiques. On constate, d'après les résultats, que la dureté de la fonte à 27% chrome est plus importante que la fonte à 17% de chrome ce qui justifie l'effet du chrome. Cette élévation de dureté est très remarquable après traitement thermique de la trempe.

L'essai de l'usure effectué sur les deux nuances montre que la fonte à 27% en chrome est plus résistante à l'usure que celle à 17%. Un constat qui nous mène à dire que l'augmentation de la teneur en chrome renforce la dureté à cœur du matériau et par conséquent sa résistance. Les résultats ont montré que plus la teneur en chrome est importante plus la résistance à l'usure augmente.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Barry THOMAS et Jean-Hubert SCHMITT. Technique de l'ingénieur : le rôle de la microstructure.
- [2] Madeleine Durand-Charre. Microstructure of steels and cast irons. Translated by: James H. Davidson B. Met. Ph. D. Eng. M.I.M.
- [3] Simone PARENT-SIMONIN et Jean-Claude MARGERIE. Technique de l'ingénieur : traitement thermiques des fontes.
- [4] B. Khédidja. Thèse de doctorat : Effet di titane, manganèse et molybdène sur le comportement à l'usure des fontes au chrome traitées.
- [5] PIERRE BASTIEN. DEPARTEMENT DE GENIE ET METALLURGIQUE. Thèse de la recherche : étude de la résistance à l'abrasion de boulets de broyage en fonte blanche alliée.
- [6] article de la fonte métallurgique
- [7] MATTHIEU BARGE. Thèse de doctorat : étude expérimentale et numérique des mécanismes de coupe par abrasion.
- [8] H.ALI et M. IBRIR : Revue de mécanique appliqué et théorique : l'effet de titan, molybdène, manganèse sur le comportement à l'usure de la fonte au chrome.
- [9] ABDELAZIZ MEDJALDI. MEMOIRE de Magister : Elaboration d'une fonte synthétique de moulage à propriétés mécaniques améliorées.