

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

Effets des traitements thermiques sur les
caractéristiques mécaniques et microstructurales
d'une fonte blanche à haute teneur en chrome
borurè

Préparé par :

- Boumediene Rofaida
- Hezoul Ahlem

Soutenu publiquement le : 20 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

Mr. MADANI Ahmed	Maître Assistant "A" (Université de Tiaret)	Président
Mme Makhfi Souad	Maître de Conférences "A" (Université de Tiaret)	Examineur
Mr. Benamar Badr	Maître Assistant "A" (Université de Tiaret)	Examineur
Mr. AISSAT Sahraoui	Professeur (Université de Tiaret)	Encadrant

Année universitaire : 2023 – 2024

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers « Allah » pour nous avoir accordé la force et la guidance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous voulons également exprimer nos plus sincères remerciements à Mr AISSAT S. qui nous a guidés et soutenus tout au long de cette aventure académique. Son expertise et ses conseils précieux ont été d'une aide inestimable.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance aux membres du jury Mr Madani A., Mr Benamar B., et Mme Makhfi S. pour leur temps, leur expertise et leurs remarques constructives qui ont grandement contribué à l'amélioration de ce travail.

Un grand merci également à Monsieur ALLAOUI O. de l'Université de Laghouat pour son accueil chaleureux et son soutien tout au long de ce projet. Sa disponibilité et ses encouragements ont été d'une grande aide.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers l'ingénieur du laboratoire de l'Université de Laghouat, Monsieur BARKET M. R., pour son assistance technique et ses conseils avisés.

Nos remerciements s'adressent également aux responsables du laboratoire d'ALFET, et du laboratoire de physique de l'Université Ibn Khaldoun Tيارت pour leur soutien et leur coopération tout au long de cette recherche.

Nous voulons aussi remercier chaleureusement les employés de la résidence les frères Mnaouer de l'Université de Laghouat pour leur accueil et leur hospitalité, ainsi que les étudiantes **Lakehal Nessrine** et **bousairi sakina** pour leur soutien et leur aide précieuse

Enfin, un grand merci à tous ceux qui ont apporté leur contribution, leur soutien et leurs encouragements à la réalisation de ce travail.

Dédicace

À la mémoire de mon père, qui m'appelait toujours "l'ingénieur" bien avant mon entrée à l'université. Son amour et ses encouragements constants restent une source d'inspiration pour moi.

À ma mère pour son amour inconditionnel, son soutien et ses innombrables sacrifices. Sans elle, ce parcours n'aurait pas été possible.

À ma sœur BOUMEDIENE Zohra et à mon frère BOUMEDIENE Omar, pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de mon parcours académique.

À mes petits "KHALTI ROFI" pour leur amour et leur enthousiasme qui ont éclairé mes journées.

À mon oncle HAMDANI MESOUME, pour son aide précieuse et ses conseils avisés.

Enfin, à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Avec toute ma gratitude,

BOUMEDIENE ROFAIDA.

Dédicace

Louange à Dieu seul,

Ce modeste travail est dédié spécialement

À ma chère maman, ma raison de vivre, en témoignage de ma reconnaissance pour sa patience , son amour et ses sacrifices .

À mon cher papa pour son amour et son dévouement.

«À vous, mes parents, je dis merci d'avoir fait de moi celui que je suis aujourd'hui. Aucune dédicace ne pourra exprimer mes respects, mes considérations et ma grande admiration pour vous. Puisse ce travail vous témoigne mon affection et mon profond amour »

À mes chères sœurs ARBIAA, AMEL et FARIMA, et à mes chers frères MOHAMED et RABEH, Au mari de ma sœur SAYAH ALA EDDINE qui est comme un frère pour moi et mon soutien inébranlable .À mon petit amour SALAH qui apporte joie et bonheur à ma vie . qui je le sais, ma réussite est très importante à leurs yeux .Que Dieu vous garde pour moi.

« À vous, mes princesses et mes princes je souhaite une vie pleine de bonheur, de joie et réussite »

À celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que les self-made-femmes et les déterminés finiront par réussir leur vie, à moi-même.

À mes amis, mes enseignants, et pour ceux qui m'ont donné de l'aide un jour, que Dieu vous paye pour tous vos bienfaits.Pour finir, à tous ceux que j'aime et qui m'aiment, je dédie ce mémoire.

HEZOUL AHLEM

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Aperçu sur les fontes blanches à haute teneur en chrome

FIGURE I. 1 : SYSTEME STABLE (FER-GRAPHITE) ET SYSTEME METASTABLE EN TRAIT PLEIN (FE- FE ₃ C).....	6
FIGURE I. 2: MICROSTRUCTURE DE LA FONTE GRISE.....	7
FIGURE I. 3: MICROSTRUCTURE D'UNE FONTE A GRAPHITE LAMELLAIRE.....	7
FIGURE I. 4: MICROSTRUCTURE DE LA FONTE A GRAPHITE SPHEROÏDA L.....	8
FIGURE I. 5: MICROSTRUCTURE DE LA FONTE GV.....	9
FIGURE I. 6: MICROSTRUCTURE DE LA FONTE BLANCHE.....	11
FIGURE I. 7: PIECES EN FONTE AU CHROME.....	16
FIGURE I. 8: BOULETS DE BROUYAGE.....	16
FIGURE I. 9. : EXEMPLES DE FONTE A HAUTE TENEUR EN CHROME POUR DES PIECES COULEES RESISTANTES AUX HAUTES TEMPERATURES.....	
FIGURE I. 10 : EXEMPLES DE FONTE A HAUTE TENEUR EN CHROME POUR DES PIECES COULEES RESISTANTES AUX HAUTES TEMPERATURES.....	17
FIGURE I. 11: ILLUSTRATIONS DES COMPOSANTS MOULES RESISTANTS A L'USURE EN ALLIAGES HCWCI.....	22
FIGURE I. 15: DIAGRAMME DE PHASE FE-CR-B.....	27
FIGURE I. 16: CYCLE THERMIQUE TYPIQUE DE LA NORMALISATION DES FONTES BLANCHES A HAUTE TENEUR EN CHROME.....	30
FIGURE I. 17 : CYCLE THERMIQUE TYPIQUE DE LA TREMPE DES FONTES BLANCHES A HAUTE TENEUR EN CHROME.....	31
FIGURE I. 18: DIAGRAMME DU CYCLE THERMIQUE DE REVENU.....	32
FIGURE I. 19 : DIAGRAMME DU CYCLE THERMIQUE DU RECUIT.....	33

Chapitre II : Techniques de caractérisation mécaniques et microstructurales

FIGURE II. 1 : EXEMPLE DE POLISSAGE SUR NOS ECHANTILLONS.....	37
FIGURE II. 2: PRINCIPE DE DURETE VICKERS.....	38
FIGURE II. 3: DEROULEMENT D'UN ESSAI DE DURETE ROCKWELL.....	39
FIGURE II.4: SCHEMA TEST D'ABRASION AVEC SABLE SEC ET ROUE EN CAOUTCHOUC (ASTM G 65) [60].....	41
FIGURE II. 5 : SCHEMA DU SYSTEME DE TEST D'USURE PION/DISQUE.....	42
FIGURE II.6: TEST D'ABRASION AVEC BROYEURS A BOULETS.....	43
FIGURE II. 7 : CORROSION DE MATERIAUX METALLIQUE DE TRAITEMENT D'EAU.....	43

Chapitre III : Partie expérimentale résultats et discussions

Figure III. 1. Structure de la fonte blanche alliée au chrome (à l'état brut de coulée, échantillon non boruré), (Attaque au nital, grossissement 10 X) 50

FIGURE III. 2: ECHANTILLON BORURE A 950°C, PENDANT UNE DUREE DE 4 HEURES 51

FIGURE III. 3: ECHANTILLON BORURE A 950°C, PENDANT UNE DUREE DE 8 HEURES..... 51

FIGURE III. 4: ECHANTILLONS DESTINES POUR LES TRAITEMENTS THERMIQUES : (A) BORURES PENDANT 4 HEURES (4H), (B) PENDANT 8 HEURES (8H) ET (C) NON BORURES (NB)..... 52

FIGURE III. 5: FOUR A MOUFLE, (A) : VUE DE FACE DU FOUR, (B) : ECHANTILLONS A L'INTERIEUR DU MOUFLE (CHAMBRE)..... 52

FIGURE III. 6 : CYCLE DES TRAITEMENTS THERMIQUES REALISES 53

FIGURE III. 7 : FORMATION DE COUCHES D'OXYDE (COULEUR GRISE) SUR LES ECHANTILLONS BORURES ET REFROISIS A L'EAU 53

FIGURE III. 8. POLISSEUSE A DOUBLE DISQUE..... 54

FIGURE III. 9: DUROMETRE POUR MESURER LA DURETE HRC 55

FIGURE III. 10: EFFET DE LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT SUR LA DURETE HRC DES ECHANTILLONS NON BORURES ET BORURES PENDANT UNE DUREE DE 4 ET 8 HEURES 56

FIGURE III. 11: EFFET DE LA TEMPERATURE DE TREMPER SUR LA DURETE HRC DES ECHANTILLONS NON BORURES ET BORURES PENDANT UNE DUREE DE 4 ET 8 HEURES 58

FIGURE III. 12: COMPARAISON DES DURETES HRC DES ECHANTILLONS NON BORURES ET BORURES POUR DIFFERENTES TEMPERATURE DE TREMPER ET UN REFROIDISSEMENT A L'EAU..... 58

FIGURE III. 13. MICROSCOPE OPTIQUE DE TYPE HAND W ETZLAR..... 59

FIGURE III. 14 : MICROSTRUCTURE DES ECHANTILLONS CHAUFFES A 850°C AVEC UN REFROIDISSEMENT A L'EAU 60

FIGURE III. 15: MICROSTRUCTURE DES ECHANTILLONS CHAUFFES A 950°C AVEC UN REFROIDISSEMENT A L'EAU 60

FIGURE III. 16 : MICROSTRUCTURE DES ECHANTILLONS CHAUFFES A 1050°C AVEC UN REFROIDISSEMENT A L'EAU 61

FIGURE III. 17: MICROSTRUCTURE DES ECHANTILLONS CHAUFFES A 950°C AVEC UN REFROIDISSEMENT AU FOUR 62

FIGURE III. 18: MICROSTRUCTURE DES ECHANTILLONS CHAUFFES A 1050°C AVEC UN REFROIDISSEMENT AU FOUR 62

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Aperçu sur les fontes blanches à haute teneur en chrome

TABLEAU I. 1: CLASSIFICATION DES FONTES SELON LEURS MICROSTRUCTURES ET ASPECT DE CASSURE.....	5
TABLEAU I. 2: PROPRIETES MECANQUES DE LA FONTE GV.....	9
TABLEAU I. 3: COMPOSITIONS CHIMIQUES TYPIQUES DES FONTES BLANCHES A HAUTE TENEUR EN CHROME. [18].....	19

Chapitre III : Partie expérimentale résultats et discussions

TABLEAU III. 1: COMPOSITION CHIMIQUE DU SUBSTRAT UTILISE (FONTE BLANCHE AU CHROME)	50
---	----

Sommaire

I.1. Introduction	4
I.2. Généralités sur les fontes	4
I.2.1. La fonte	4
I.2.2. Classification des fontes	5
I.2.2.1. Les fontes grises	6
I.2.2.2. Fonte GV (Graphite Vermiculaire) ou fonte GC (graphite compact)	8
I.2.2.3. Fontes malléables.....	9
I.2.2.4. Fontes blanches.....	10
I.2.2.5. Fontes blanches alliées.....	11
I.2.2.6. Fonte blanche à forte teneur en chrome	12
I.4. Caractéristiques physiques et mécaniques moyennes des fontes blanches brutes et coulées.....	15
I.5. Applications techniques de la fonte blanche à haute teneur en chrome	15
I.6. Composition chimique des fontes blanches à haute teneur en chrome	17
I.6.2. Structure des fontes blanches à haute teneur en chrome	18
I.6.2.1. La matrice	19
I.6.2.2. Carbure	20
I.7. Propriétés des fontes blanches à haute teneur en chrome	20
I.7.1. Résistance à l'usure	21
I.7.2. Ténacité	22
I.7.3. Résistance à la corrosion	22
I.7.4. Dureté	22
I.7.5. Le module d'élasticité	23
I.8.1 Diagramme de Phase Fe-B.....	23
I.8.2. Phases et Transformations dans le Système Fe-B	23
I.8.3.1. Transformations de Phase.....	26
I.8.3.2. Interprétation du Diagramme	26
I.8.4. Diagramme de Phase Fe-Cr-B	27
I.8.5. Phases et Transformations dans le Système Fe-Cr-B	27
I.8.5.1. Phases possibles	27
I.8.5.2. Comportement des Phases lors du Refroidissement et du Chauffage.....	28
I.8.5.3. Influence du Pourcentage de Bore sur les Propriétés.....	28
I.9.1. Normalisation des Fontes Blanches à Haute Teneur en chrome.....	29
II.3.1. Types de corrosion	43
II.4. Caractérisation microstructurale (Microscope Optique, MEB)	44

II.4.1. Microscopie Optique	45
II.4.1.1. Préparation des échantillons.....	46
II.4.1.2. Observation des échantillons	47
II.4.1.3. Acquisition d'images.....	47
II.4.1.4 Analyse des résultats.....	47
II.4.2. Microscope Electronique à Balayage (MEB).....	48
III.1. Composition chimique et structure du matériau de base (substrat) et du matériau boruré	50
III.2. Procédure expérimentale	52
III.3. Résultats et discussions	54
ملخص	72
Abstract.....	72

Introduction Générale

Introduction Générale

La fonte blanche à haute teneur en chrome borurée est un matériau métallique largement utilisé dans divers secteurs industriels en raison de ses excellentes propriétés mécaniques, notamment sa haute résistance à l'usure et à la corrosion. L'étude des effets des traitements thermiques sur cette fonte revêt une importance capitale pour comprendre et optimiser ses performances dans des conditions opérationnelles variées. Ainsi, cette étude se propose d'examiner de manière détaillée les effets des traitements thermiques sur les caractéristiques mécaniques et microstructurales de la fonte blanche à haute teneur en chrome borurée, à travers trois chapitres distincts.

Le premier chapitre offre un aperçu approfondi des traitements thermiques appliqués aux fontes blanches à haute teneur en chrome. Il commence par explorer les applications techniques de ces fontes dans des domaines tels que l'industrie automobile, l'aérospatiale et la production d'outils, mettant en évidence l'importance de ces matériaux dans des environnements soumis à des conditions extrêmes. Ensuite, la composition chimique des fontes blanches à haute teneur en chrome est examinée en détail, en se concentrant sur la teneur en carbone, en chrome, ainsi que sur la nature de la matrice et des carbures de chrome. Cette analyse permet de comprendre comment ces éléments influent sur les propriétés mécaniques et la microstructure de la fonte. De plus, les propriétés clés telles que la dureté, la résistance à l'usure et à la corrosion sont discutées pour fournir un aperçu complet de la performance de ces matériaux dans des environnements spécifiques. Enfin, une attention particulière est portée aux fontes blanches à haute teneur en chrome alliées au bore, avec une analyse approfondie des diagrammes (Diagramme de phase Fe-B, Diagramme de phase Cr-B, Diagramme de phase Fe-Cr-B), ainsi qu'aux différents traitements thermiques tels que la normalisation, la trempe, le revenu et le recuit, qui visent à modifier la microstructure et les propriétés mécaniques de ces matériaux.

Le deuxième chapitre se concentre sur les techniques de caractérisations mécaniques et microstructurales utilisées pour évaluer les propriétés des fontes blanches à haute teneur en chrome borurée. Il détaille la caractérisation de la dureté, de la résistance à l'usure et de la résistance à la corrosion, en fournissant des informations sur les méthodes expérimentales utilisées pour mesurer ces propriétés. De plus, ce chapitre explore la caractérisation microstructurale à l'aide de techniques telles que le microscope optique et la microscopie électronique à balayage (MEB), permettant ainsi une analyse détaillée de la structure interne de la fonte et des changements induits par les traitements thermiques.

Enfin, le troisième chapitre présente la partie expérimentale de cette étude, ainsi que les résultats obtenus et les discussions qui en découlent. Il se penche notamment sur l'effet du

traitement thermique sur la dureté de la fonte blanche à haute teneur en chrome borurée, en examinant les différences entre les techniques de lubrification à l'eau et en four, offrant ainsi des insignes précieux pour l'optimisation des procédés de traitement thermique et des performances des matériaux.

Cette étude aspire à enrichir la compréhension des interactions complexes entre les traitements thermiques et les caractéristiques des fontes blanches à haute teneur en chrome borurée, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour leur utilisation dans des applications industrielles exigeantes.

Chapitre I : Aperçu sur les fontes blanches à haute teneur en chrome

I.1. Introduction

Les matériaux utilisés dans l'industrie de la fonderie sont variés, chacun étant choisi pour satisfaire des exigences particulières en matière de performances, de durabilité et de résistance à différentes contraintes naturelles. La fonte blanche à haute teneur en chrome est au cœur de cette variété, un matériau aux caractéristiques exceptionnelles qui a bouleversé de nombreux domaines de l'ingénierie.

La fonte blanche à chrome élevé est une variante de fonte, enrichie en chrome afin d'améliorer sa résistance à l'usure, à la corrosion et à l'oxydation. La fonte blanche possède une composition unique qui lui confère une solidité exceptionnelle, ce qui en fait un matériau privilégié pour de nombreuses applications industrielles exigeantes.

La fonte blanche à forte teneur en chrome joue un rôle crucial dans le secteur de la fonderie en répondant aux besoins essentiels des secteurs tels que l'exploitation minière, l'énergie, la construction, ...etc. En raison de ses caractéristiques mécaniques exceptionnelles et de sa résistance chimique accrue, elle est indispensable pour les pièces qui sont exposées à des conditions extrêmes de température, de pression et d'abrasion.

Nous examinerons en détail les origines, la composition, les méthodes de production, ainsi que les utilisations de la fonte blanche à forte teneur en chrome dans cette synthèse bibliographique.

I.2. Généralités sur les fontes

I.2.1. La fonte

La fonte compte parmi les matériaux de fabrication les plus anciens, avec des premières réalisations en Chine remontant avant 600 av. J.-C. En Europe, la production de fonte a débuté vers l'an 1200. Aujourd'hui, la fonte est le matériau moulé le plus prépondérant à l'échelle mondiale, représentant plus de 71 % du volume total des matériaux moulés fabriqués en 2012. La production annuelle avoisine les 93 millions de tonnes, dont 46 % sont de la fonte grise et 25 % de la fonte ductile [1].

On appelle fonte, un alliage fer-carbone dont la teneur en carbone varie de 1,7 à 6,67 % C. Pratiquement la teneur en carbone dans la fonte varie de 3 à 4 % C, 92 % de fer ainsi que d'autres éléments tels que le silicium, le manganèse, le soufre et le phosphore. Elles ont une bonne aptitude au moulage. Ces alliages sont obtenus par solidification, et ont des

caractéristiques qui dépendent des différentes phases qui les constituent (phases semblables à celles des aciers dans lesquelles vient s'insérer le graphite). L'apparition de ces phases s'explique à partir des phénomènes physiques liés à la solidification : la germination et la croissance [2]. On peut le définir comme un alliage à base de fer et de carbone, dont la teneur de carbone est suffisante pour que la fusion et la solidification se produise dans un intervalle de température, nettement plus bas que le point de fusion du fer et relativement étroit, soit généralement entre 1100°C et 1350°C.

La fonte possède une large gamme de propriétés mécaniques qui varient selon chaque type, elle peut être dure et cassante, même avec une certaine ductilité, résistance à l'usure et certains types de fonte possèdent également des propriétés d'amortissement des vibrations.

Pour avoir certaines propriétés et en éviter d'autres, il est nécessaire de maîtriser certains paramètres, tels que la vitesse refroidissement, la composition chimique et le traitement de la fonte.

I.2.2. Classification des fontes

Les fontes ont été classées pour la première fois en fonction de leur cassure. On peut distinguer les fontes blanches et les fontes grises en fonction de leur couleur de cassure. La fonte blanche se casse sur les plats des carbures de fer, tandis que la fonte grise se casse sur ceux de graphite (Tableau I.1). La distinction réside dans le processus de refroidissement utilisé, où la fonte blanche se solidifie en utilisant un système métastable tandis que la fonte grise est produite en utilisant un système stable. (Figure I.1).

Désignation	Phase riche en carbone	Matrice	Matrice Couleur de la cassure
Fonte grise	Graphite lamellaire	Perlite	Grise
Fonte ductile	Graphite sphéroïdal	Perlite, Ferrite	Argentée-Grise
Fonte Blanche	Cémentite (Fe ₃ C)	Perlite, Martensite	Blanche
Fonte truitée	Cémentite et graphite	Perlite	Truitée
Fonte malléable	Graphite	Ferrite, perlite	Argentée-Grise
Fonte ADI	Graphite sphéroïdal	Bainite	Argentée-Grise

Tableau I. 1: Classification des fontes selon leurs microstructures et aspect de cassure [16]

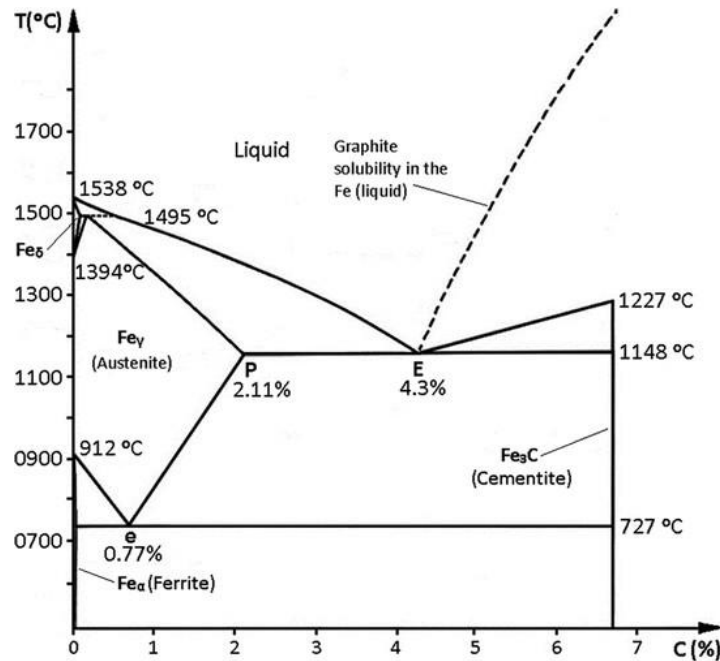


Figure I. 1 : Système stable (Fer-graphite) et système métastable en trait plein (Fe-Fe₃C) [3]

La classification repose sur les propriétés mécaniques des fontes blanches, qui sont dures et fragiles, tandis que les fontes grises et à graphite sphéroïdal présentent des caractéristiques mécaniques plus avantageuses. On distingue :

I.2.2.1. Les fontes grises

La fonte grise est fréquemment utilisée comme pièce moulée et contient généralement de 2,5% à 4% de carbone, ainsi que de 1% à 3% de silicium. En contrôlant correctement les niveaux de carbone et de silicium et la vitesse de refroidissement, on peut empêcher complètement la formation de carbure de fer pendant la solidification, permettant ainsi au graphite de précipiter directement en flocons irréguliers, souvent allongés et courbés, dans une matrice de fer saturée en carbone. La fonte grise est la forme la plus répandue et la plus ancienne de fonte (Figure I.2) [4].



Figure I. 2: Microstructure de la fonte grise [5]

Il y a deux types principaux qui peuvent être distingués grâce à la forme des grains de graphite :

- Les fontes grises à graphite lamellaire.
- Les fontes grises à graphite sphéroïdal [6].

A) Fonte à graphite lamellaire

3 à 4% de carbone, 1 à 3% de silicium, 0.5 à 1 % de manganèse. Elle est utilisée pour le moulage (très fluide), l'usinage, le prix est peu élevé, mais elle est dure et fragile. Elle possède une grande résistance à la compression et une bonne capacité d'amortissement des vibrations (Figure I.3).



Figure I. 3: Microstructure d'une Fonte à graphite lamellaire. [7]

B) Fontes à graphite sphéroïdal

La recherche vise à améliorer l'effet du graphite sphérique en utilisant Ni, Cr, Mn. Dans cette situation, la fonte est désignée sous le nom de fonte à graphite sphéroïdal (Figure I.4). La fonte à graphite sphéroïdal est produite en ajoutant du magnésium à la fonte en fusion. La composition chimique moyenne de cette fonte est la suivante :

- ✓ C : (3,2 à 3,6) %.
- ✓ Si : (1,8 à 3) %.
- ✓ Mn : (0,3 à 0,4) %.
- ✓ P \approx 0,05 % [8]

En comparaison, la forme sphéroïdale du graphite dans la fonte GS est plus avantageuse que la forme lamellaire du graphite dans une fonte grise classique. De plus, la fragilité des fontes grises est principalement causée par la structure lamellaire du graphite (effet d'entaille). En conclusion, le graphite améliore les propriétés de frottement de la fonte (effet autolubrifiant) et donc facilite son usinabilité.

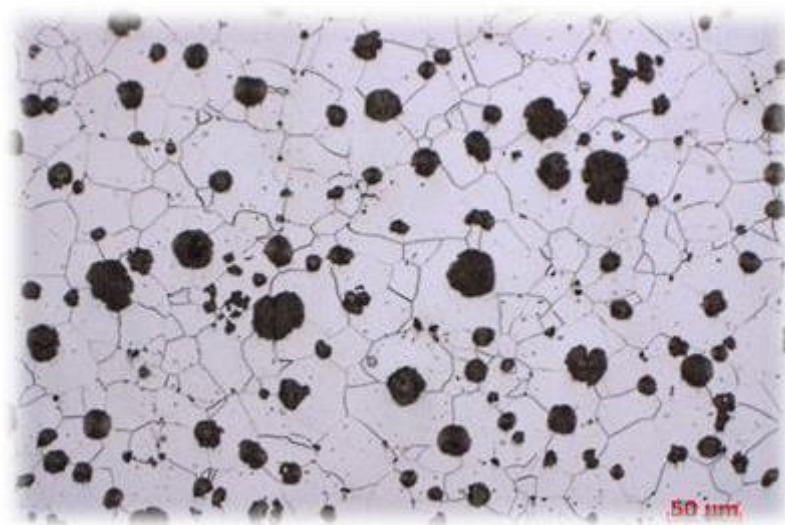


Figure I. 4: Microstructure de la fonte à graphite sphéroïdal[8]

I.2.2.2. Fonte GV (Graphite Vermiculaire) ou fonte GC (graphite compact)

Le graphite dans les fontes GV se présente sous forme de vermicules ressemblant à des vers avec des bords arrondis (Figure I.5). Ce matériau est aussi appelé fonte à graphite compacté ou fonte GC. La trouvaille fortuite de la fonte avec graphite vermiculaire s'est produite durant la fabrication en grande quantité de pièces en fonte à graphite sphéroïdal. Au départ, cette dernière était perçue comme une version inférieure de la fonte. Ensuite, elle a suscité un grand intérêt, et la production intentionnelle de fontes GV a été effectuée pour la première fois par Estes et Scheide Wind en 1955 ; différents pays ont étudié diverses méthodes de production ainsi que les propriétés physiques et mécaniques (Sissener et al. 1972 ; Sofroni et al. 1974 ; Evans et al. 1976 ;

Lalich et La Presta 1978 ; Green et Thomas 1979 ; Copper et Loper 1978 ; Aleksandrov et al. 1976) [9]. Les fontes avec graphite vermiculaire présentent certains avantages par rapport aux anciennes familles des fontes (Tableau I.2), à savoir la fonte grise, la fonte ductile et la fonte malléable :

- La teneur en soufre tolérable dans la fonte GV est bien plus élevée que dans la fonte ductile.
- L'intervalle de température dans lequel le matériau réactif est efficace est très étendu dans la fonte GV par rapport à la fonte GS.

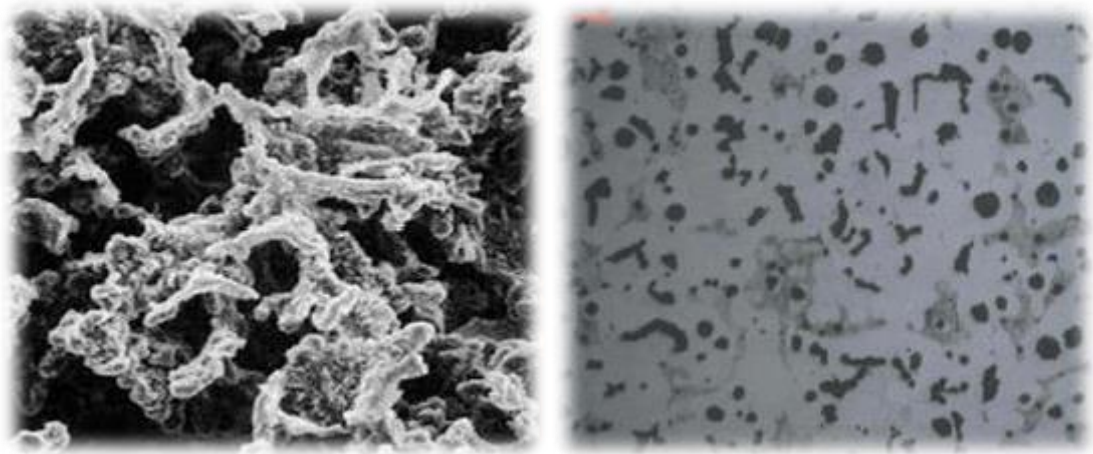


Figure I. 5: Microstructure de la fonte GV [9]

Propriétés	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 10/300)	217 – 241

Tableau I. 2: Propriétés mécaniques de la fonte GV[9]

I.2.2.3. Fontes malléables

Il ne peut obtenir ses caractéristiques que par un processus de recuit (malléabilisation). D'après le processus de traitement thermique, on obtient de la fonte malléable avec un cœur noir ou blanc. En ce qui concerne la résistance, la fonte malléable se trouve entre la fonte grise et la fonte rigide. Trois types de fontes malléables normalisées existent :

- Fonte à cœur blanc malléable : NF A32-701
- Fonte à cœur noir malléable : NF A32-702
- Fonte de perlite malléable : NF A32-703

L'avantage des fontes malléables réside dans le fait qu'elles conservent de bonnes propriétés de coulabilité tout en présentant des caractéristiques mécaniques similaires à celles de l'acier.

Aspect graphitique particulier, avec des propriétés de résistance mécanique améliorées. Plusieurs avantages sont à noter, les principaux étant les suivants :

- Grande convivialité,
- Grande durabilité face à l'usure,
- Capacité à absorber les vibrations [10].

I.2.2.4. Fontes blanches

La fonte blanche contient 1,8 à 3,6 % de carbone, 0,5 à 1,9 % de silicium et 1 à 2 % de manganèse. La vitesse de refroidissement rapide empêche le carbone de précipiter sous forme de graphite. Au lieu de cela, le carbone dissous dans la pièce moulée forme du carbure de fer (Fe_3C , également connu sous le nom de cémentite).

La structure de la fonte blanche (Figure I.6) est constituée de perlite et de lédeburite, un eutectique d'austénite et de cémentite. Les alliages durs au Ni (8-9%Cr, 5-6% Ni) ont une matrice martensitique avec des carbures de chrome. La fonte blanche présente une résistance à la compression élevée et les versions alliées montrent une bonne conservation de la résistance et de la dureté à températures élevées. En raison de ses grandes quantités de carbures, particulièrement lorsqu'elle est alliée, la fonte blanche montre une excellente résistance à l'usure et à l'abrasion. Elle est employée pour les buses de grenailage, les rouleaux de laminoir, les broyeurs, les atomiseurs et les gaines de broyeurs à boulet. En trempant la fonte grise ou ductile sur l'extérieur et en la laissant refroidir lentement à l'intérieur, il est possible de produire des pièces avec une surface dure de fonte blanche et un cœur ductile (Trempe en coquille) [11].

Les fontes blanches ne sont pas aussi faciles à former que les autres fontes car leurs températures de solidification sont généralement plus élevées et elles se solidifient avec tout le carbone présent sous forme combinée de carbures de fer.

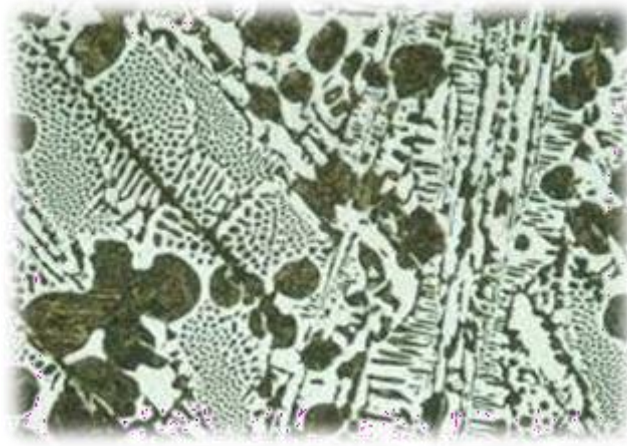


Figure I. 6: Microstructure de la fonte blanche [11]

I.2.2.5. Fontes blanches alliées

Les fontes blanches alliées sont habituellement classées selon leur composition chimique et leurs caractéristiques particulières. Ci-dessous quelques types de fontes blanches alliées fréquemment rencontrées :

A) Fonte blanche alliée au chrome : Ces fontes présentent une forte teneur en chrome, leur assurant une grande résistance à l'usure, à la corrosion et à l'abrasion. Elles sont fréquemment employées dans diverses applications comme les broyeurs, les plaques d'usure, les cylindres de laminoir, etc.

B) Fonte blanche alliée au nickel : sont renommées pour leur grande résistance à la corrosion et à l'oxydation, ainsi que pour leur excellente résistance à la chaleur. Elles sont employées dans des cas où la résistance à la corrosion est essentielle, tels que les valves, les pompes, les chemises de cylindres, etc.

C) Fonte blanche alliée au molybdène : présente une résistance à l'usure, à la corrosion et à la chaleur. Elles servent dans diverses applications comme les marteaux de broyeur, les engrenages, les axes de roulements, et d'autres encore.

D) Fonte blanche alliée au vanadium : possèdent une grande résistance à l'usure et une bonne ténacité. Elles sont souvent employées dans les secteurs miniers, les chantiers de construction et les domaines nécessitant une grande résistance aux chocs, comme les pièces d'engins de terrassement, les seaux, les lames de bulldozer, etc.

Il existe également d'autres classes de fontes blanches alliées, comme les fontes alliées au tungstène, au cobalt, au titane, etc., qui sont utilisées dans des applications spécifiques en fonction des exigences de résistance et de performance.

I.2.2.6. Fonte blanche à forte teneur en chrome

La fonte blanche à haute teneur en chrome est une fonte blanche contenant une teneur élevée en chrome comprise entre 11% et 30% et en carbone entre 1,8% et 3,6%. La présence d'une teneur élevée en chrome dans le volume de la fonte blanche entraîne le remplacement de certaines parties du carbure de fer par du carbure de chrome, dont la dureté et la ténacité sont plus élevées que celles du carbure de fer dans la fonte blanche non alliée [22].

Leur matrice est généralement constituée d'austénite résiduelle et de produits de décomposition, tous ces constituants structuraux ont une morphologie et des propriétés mécaniques caractéristiques en particulier la dureté. Grâce à la dureté des carbures et leur morphologie discontinue, ces fontes sont supérieures à n'importe quel matériau de point de vue résistance à l'usure et ce tout en gardant une ténacité qui leur permet de concurrencer les aciers martensitiques [10].

Les fontes à haute teneur en chrome sont utilisées pour la production d'éléments travaillant dans des conditions d'usure intense. Leur résistance à l'usure est le facteur clé pour les industries minières et de traitement des minéraux, énergétiques, de fonderie et de forgeage. Elles sont utilisées dans les broyeurs à boulets, les rouleaux, les écrans d'abrasion, les éléments de transport, etc., principalement en raison de leur résistance exceptionnelle à l'usure par rapport au coût de production [12].

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

1. Fontes perlitiques et martensitiques : qui contiennent 12 à 28% de chrome. Ces fontes sont utilisées dans des applications où la résistance à l'usure est primordiale, telles que les pièces d'usure dans l'industrie minière, les marteaux de concasseurs, les blindages de broyeurs, les couteaux de broyage, les pièces de pompe, etc ;

2. Fontes ferritiques : qui contiennent de 30 à 34% de chrome ;

3. 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 [6].

I.3. Influence des éléments d'addition sur les propriétés d'une fonte blanche à haute teneur en chrome

La fonte blanche à haute teneur en chrome (également connue sous le nom de fonte à chrome blanc) est un matériau largement utilisé pour sa résistance à l'usure et à la corrosion. Ces propriétés sont fortement influencées par la composition chimique et notamment par les éléments ajoutés. Voici une analyse des principaux éléments ajoutés et de leurs effets sur les propriétés de la fonte blanche à haute teneur en chrome :

1. Chrome (Cr)

- **Rôle principal** : Le chrome est l'élément de base de ces fontes, formant du carbure de chrome extrêmement dur et résistant à l'usure (Cr_7C_3 ou Cr_{23}C_6).

- **Effet sur les performances** : Augmentation de la dureté, de la résistance à l'usure et de la résistance à la corrosion. Une teneur plus élevée en chrome favorise la formation de carbures de chrome, augmentant ainsi la dureté globale.

2. Carbone (C)

- **Fonction principale** : Le carbone se combine avec le chrome pour former des carbures.
- **Effet sur les performances** : Améliore la dureté et la résistance à l'usure en augmentant le nombre de carbures. Cependant, un excès de carbone peut rendre la matrice trop fragile.

3. Manganèse (Mn)

- **Fonction principale** : Il joue le rôle de désoxydant et de désulfurant dans le processus de fusion.

- **Effet sur les performances** : Une quantité appropriée peut améliorer la ténacité et la résistance aux chocs. À des concentrations plus élevées, il forme du carbure de manganèse.

4. Molybdène (Mo)

- **Fonction principale** : affiner la structure du carbure et améliorer la trempabilité.
- **Effet sur les performances** : Résistance accrue à l'usure à haute température et meilleure résistance à la corrosion.

5. Nickel (Ni)

- **Fonction principale** : améliorer la ténacité et la résistance aux chocs.
- **Impact sur les performances** : Aide à stabiliser la matrice austénitique, améliorant ainsi la résistance à la corrosion et la ductilité.

6. Cuivre (Cu)

- **Fonction principale** : améliorer la résistance à la corrosion.
- **Effet sur les performances** : Aide à résister à l'usure et à la corrosion, notamment dans les environnements acides.

7. Silicium (Si)

- **Fonction principale** : Désoxydant dans le processus de fusion.
- **Impact sur les performances** : Améliore la résistance à l'oxydation à haute température et renforce la matrice de ferrite, mais une teneur trop élevée réduira la ductilité.

8. Vanadium (V)

- **Fonction principale** : Formation de carbure de vanadium (VC) extrêmement dur.
- **Effet sur les performances** : Améliore la dureté et la résistance à l'usure en formant du carbure de vanadium, plus dur que le carbure de chrome.

9. Bore (Br)

- **Fonction principale** : Formation de Borure de chrome (CrB et CrB_2) extrêmement dur.
- **Effet sur les performances** : Utilisé pour des revêtements durs, résistants à l'usure, et pour améliorer la résistance aux températures élevées.

10. Tungstène (W)

- **Fonction principale** : Formation du carbure de tungstène (WC) très dur.
- **Impact sur les performances** : Semblable au vanadium, augmente la dureté et la résistance à l'usure à haute température.

L'interaction entre ces éléments doit être soigneusement contrôlée pour optimiser les propriétés mécaniques et la durabilité de la fonte blanche à haute teneur en chrome pour des applications spécifiques.

I.4. Caractéristiques physiques et mécaniques moyennes des fontes blanches brutes et coulées

Les principales propriétés physiques et mécaniques des fontes blanches brutes et coulées sont les suivantes :

- Masse volumique : (7,5 à 7,8) g/cm³.
- Coefficient de dilatation à (0 à 300) °C : (9 à 11).10⁻⁶.
- Résistivité électrique : 80 μΩcm.
- Résistance à la corrosion : (200 à 400) N/mm².
- Résistance à la compression : (1500 à 1800) N/mm².
- Module d'élasticité : (168000 à 183000) N/mm².
- Résistance à la flexion : (350 - 750) N/mm².
- Dureté Brinell (350 à 500).
- Retrait de moulage (13 à 21) mm/m [8]

I.5. Applications techniques de la fonte blanche à haute teneur en chrome

La fonte à haute teneur en chrome est un alliage multiéléments avec Fe, Cr et C comme composants de base. La matrice de la fonte à haute teneur en chrome fraîchement solidifiée est l'austénite, qui est stable lorsqu'elle est chauffée à une température plus élevée et est saturée d'éléments tels que C et Cr. Lorsque la température baisse, l'austénite se transforme. Dans des conditions normales, la fonte à haute teneur en chrome présente une structure multiphasée dominée par l'austénite [13].

En raison de cette propriété, Elles sont utilisées pour la production d'éléments travaillant dans des conditions d'usure intense. Leur résistance à l'usure est le facteur clé pour les industries minières, de traitement des minéraux, énergétiques, de fonderie et de forge. Elles sont utilisées dans des broyeurs à boulets, des rouleaux, des revêtements d'abrasion, des éléments de transport, etc., principalement en raison de leur exceptionnelle résistance à l'usure par rapport au coût de production. Dans le processus de moulage, la structure de la pièce influe grandement sur ses propriétés mécaniques. Un contrôle adéquat de la cinétique des processus de cristallisation afin d'optimiser la microstructure et les propriétés mécaniques du moulage est un facteur vital pour améliorer la qualité des pièces [12]. La fonte à haute teneur en chrome est utilisée dans les domaines suivants (Figure I.7) :

- **Industrie lourde** : fabriquer des tubes de récupérateurs, des barreaux de concasseurs et des plateaux pour fours de frittage, galets d'écrasement, plaques de blindage.
- **Éléments 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 [14].

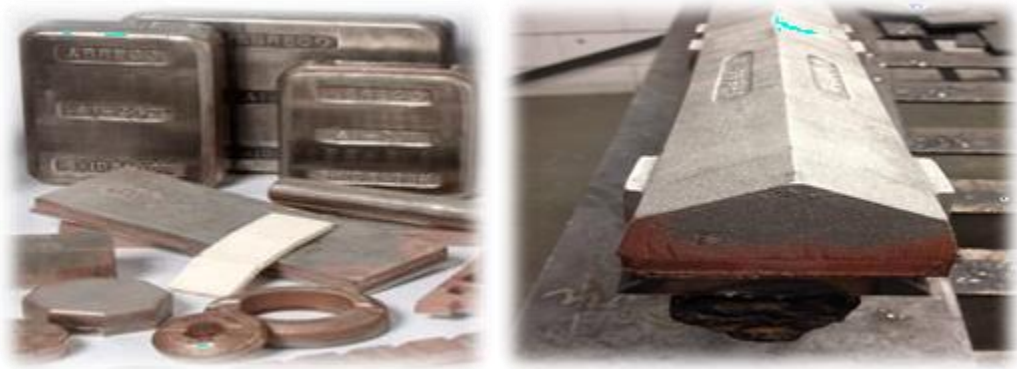


Figure I. 7: Pièces en fonte au chrome [15]

La Fonderie Tiaret est une usine spécialisée dans la production de boulets de broyage (Figure I.8) pour cimenteries. Basée à Tiaret, l'entreprise produit des boulets de hautes qualités conçues pour résister aux conditions rigoureuses rencontrées lors du broyage du ciment. Ces billes sont fabriquées à l'aide d'une technologie avancée de moulage et de traitement thermique pour garantir leur résistance à l'usure et à la corrosion, ce qui les rend indispensables dans le processus de production de ciment.



Figure I.8: Boulets de broyage [24]

- **Eléments travaillant à haute température**

En raison de leur coulabilité et de leur coût, les composants en fonte blanche contenant beaucoup de chrome peuvent fréquemment être employés pour des pièces complexes et sophistiquées dans des conditions à haute température, réalisant ainsi des économies importantes par rapport à l'acier inoxydable. Ces teintes de fonte sont mélangées avec 12 à 39 % de chrome à des températures allant jusqu'à 1040°C pour résister à l'oxydation. Le chrome crée un revêtement d'oxyde riche en chrome qui adhère bien et devient complexe à des températures élevées. Les

alliages à base de chrome, conçus pour résister à des températures élevées, sont classés en trois catégories en fonction de la configuration de leur matrice.

1. Sources de martensite à haute teneur en chrome de 12 à 28%.

2. Sources de fonte ferritiques contenant de 30 à 34% Cr.

3. Les sources austénitiques comprenant 15 à 30 % de Cr et 10 à 15 % de Ni sont utilisées pour stabiliser la phase austénitique. La quantité de carbone dans ces alliages varie de 1 à 2 %. Il est essentiel de choisir une composition précise pour empêcher la phase σ de se former à des températures intermédiaires et pour éviter la transformation de la ferrite en austénite lors des cycles thermiques, ce qui peut causer des distorsions et des fissures. Applications courantes incluent les tubes de récupération, les barres et plateaux utilisés dans les fours à frittage, les grilles, buses de brûleur et autres composants de four, les sièges de soupape pour moteurs à combustion (Figure I.9 a), ainsi que les moules pour bouteilles en verre (Figure I.9 b) [17].



a) Sièges de soupapes



b) Moules de bouteilles en verre

Figure I.9 : Exemples de fonte à haute teneur en chrome pour des pièces coulées résistantes aux hautes températures [13]

I.6. Composition chimique des fontes blanches à haute teneur en chrome

I.6.1. Types de fontes blanches à haute teneur en chrome

La fonte blanche à forte teneur en chrome (High Chromium Cast Iron, HCCI, en anglais) contient des carbures eutectiques dans sa microstructure. En outre, on retrouve une matrice métallique constituée de carbures de chrome secondaires, de martensite, d'austénite et parfois de ferrite, suite à un processus de chauffage. Les eutectiques se forment lors de la solidification des carbures. Ils ne subissent aucune modification supplémentaire lorsqu'ils se solidifient. La seule chose qui peut être modifiée est la matrice. Trois éléments contribuent à la création de diverses microstructures dans la matrice : le processus thermique, la composition chimique du matériau et l'état initial de l'alliage (comme moulé ou recuit).

D'un point de vue chimique, les fontes sont des mélanges d'acier et de carbone comportant une phase eutectique nommée lédeburite. En se basant sur le diagramme de phase fer-carbone métastable, les fontes se réfèrent à des alliages contenant plus de 2,11 % de carbone. On distingue les différentes fontes par leur pourcentage de carbone. Dans le cas d'un alliage pur de fer et de carbone (cas théorique car la fonte contient toujours du silicium et du manganèse en quantités non négligeables), on relève les seuils suivants :

- **Fonte hypoeutectique** : de 2,11 à 4,3 % de carbone.
- **Fonte eutectique** : 4,3 % de carbone. Cette fonte a la température de fusion la plus basse à 1148 °C.
- **Fonte hypereutectique** : de 4,3 à 6,67 % de carbone [14].

La résistance à l'usure optimale du HCCI est obtenue en combinant la structure et les propriétés des phases qui composent ces alliages. Ces fontes, après austénitisation et trempe, présentent une matrice martensitique contenant les carbures M_7C_3 , $M_{23}C_7$.

I.6.2. Structure des fontes blanches à haute teneur en chrome

La fonte blanche, avec une grande quantité de chrome, est un matériau approprié pour être utilisé dans des milieux de travail exposés à la friction et aux impacts. Elle est connue pour sa grande dureté, sa forte résistance à l'usure et des coûts de fabrication peu élevés. Selon la réglementation ASTM A532-10, la fonte blanche à forte teneur en chrome se compose principalement de 11 à 30 % de chrome en poids et de 1,8 à 3,6 % de carbone en poids, avec des ajouts de molybdène, de manganèse, de cuivre et de nickel (Tableau I.3). Le chrome et ses composants associés, tels que le nickel et le molybdène, sont responsables de la robustesse et de la capacité de résistance à l'usure du matériau. De plus, le chrome empêche la formation de graphite dans les matériaux en fonte blanche et crée des carbures de chrome. Les carbures sont habituellement très durs (1200-1800 HV) et résistants à l'usure, ce qui les rend appropriés pour être utilisés comme matériau de boulets de broyage dans les broyeurs à boulets. Le traitement thermique modifie la taille des grains de carbure de chrome. L'austénitisation entraîne la dissolution du chrome et sa réaction avec le carbone, ce qui influence la création des carbures secondaires de chrome. La configuration présente dans le métal en fonte blanche riche en chrome contient des carbures eutectiques M_7C_3 entourés par une matrice d'austénite. Le processus de durcissement thermique favorise la création de martensite et de carbure de chrome (Cr_7C_3). Ces structures caractéristiques sont formées par la combinaison de chrome et de carbone à haute température pendant le processus de coulée, donnant ainsi naissance à des carbures de chrome (Cr_7C_3) ou à d'autres carbures.

On peut trouver une composition comprenant des carbures eutectiques M_7C_3 dans la matrice d'austénite. La formation habituelle de carbure de chrome (Cr_7C_3) ou de carbures secondaires se produit lorsque le chrome se dissout dans l'austénite pendant la coulée et réagit avec le carbone à la température de l'austénite. Le carbure de chrome possède une fine structure en lamelles, ce qui le rend plus résistant que les carbures ayant des structures massives et grossières, tels que le carbure de cémentite (Fe_3C).

C (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)	Si (%)
2.4 - 3.6	0.5 - 1.5	0.0 – 1.5	12.0 – 17.0	1.0
2.2 – 3.0	0.5 – 3.5	0.0 – 1.5	17.0 – 22.0	1.0
2.4 – 3.2	0.0 – 1.5	0.0 – 1.5	22.0 – 28.0	1.0

Tableau I. 3: Compositions chimiques typiques des fontes blanches à haute teneur en chrome. [18]

I.6.2.1. La matrice

La matrice métallique optimale des fontes blanches à haute teneur en chrome se réfère à la structure microscopique idéale des fontes blanches avec une forte teneur en chrome. Cette construction a été créée pour fournir des caractéristiques particulières comme une grande résistance à l'usure et une plus grande dureté. En règle générale, le chrome est principalement trouvé sous forme de carbures de chrome dans les fontes blanches à haute teneur en chrome, ce qui aide à augmenter la dureté et la résistance à l'abrasion du matériau. La meilleure matrice métallique est celle qui garantit une répartition uniforme des carbures de chrome dans la structure, assurant ainsi une grande résistance à l'usure. Cette matrice métallique idéale peut être réalisée en utilisant des méthodes de traitement thermique et de composition chimique particulières, qui permettent de maîtriser la création des phases et d'optimiser les caractéristiques souhaitées du matériau, comme la résistance à l'usure et la durabilité dans des situations spécifiques.

A) Structures de Matrice Perlite

- Ont une résistance à l'abrasion modeste et une faible résilience.
- Se produiront lorsque les éléments d'alliage de trempabilité sont insuffisants
- La plupart du Cr est lié dans des carbures de Cr, donc d'autres éléments d'alliage sont nécessaires pour fournir une trempabilité adéquate.

B) Matrice Entièrement Martensitique

- Fournit une résistance à l'abrasion maximale
- Lorsqu'elle est revenue pour minimiser l'austénite retenue (résiduelle), fournit une résistance maximale à l'écaillage et aux conditions d'impact répété [17].

C) Fontes Austénitiques Coulées

- Bien que relativement tendres, peuvent offrir des performances satisfaisantes en termes d'usure abrasive, en raison d'un durcissement prononcé lors de l'utilisation.

I.6.2.2. Carbure

La composition du carbure de chrome à grains grossiers a généralement moins d'influence sur les caractéristiques mécaniques des alliages métalliques. En utilisant du chrome dans la fonte blanche, la présence d'une structure de carbure fine dans la matrice offrira une combinaison excellente de dureté et de ténacité par rapport aux structures de carbure grossier. Après la trempe, la microstructure de la fonte blanche à haute teneur en chrome est principalement composée de carbure et d'austénite résiduelle. Les carbures formés incluent $(Fe, Cr)_7C_3$, $(Fe, Cr)_3C$, et $(Fe, Cr)_{23}C_6$ [8]. Après la trempe austénisante, il est possible de déterminer la microstructure et les valeurs de dureté, ce qui entraîne une augmentation du nombre de carbures et une diminution de la phase d'austénite. Le carbure secondaire M_7C_3 ($M = Fe, Cr$) se forme de manière continue lorsque la température baisse, entraînant une diminution de la phase d'austénite et une augmentation progressive de la phase M_7C_3 . Le procédé de traitement thermique qui peut créer une résistance à l'usure et une ténacité adaptées aux besoins doit être utilisé pour les produits de concassage.

En général, la résistance à l'usure est améliorée en augmentant la quantité de carbure (en augmentant la teneur en carbone), tandis que la ténacité est améliorée en augmentant la proportion de matrice métallique (en réduisant la teneur en carbone).

I.7. Propriétés des fontes blanches à haute teneur en chrome

La fonte blanche avec une teneur élevée en chrome est généralement utilisée en raison de son excellente résistance à l'usure. Cette propriété peut être attribuée à la présence des carbures de chrome. En pratique, cependant, l'application de ce matériau est souvent entravée par une ténacité à la rupture, à la fois statique et dynamique, très faible. Les propriétés de la matrice et la présence de pores microscopiques et macroscopiques jouent un rôle dans ce phénomène, mais une fois de plus, la présence de carbures primaires est considérée comme la principale cause. Les

carbures primaires forment un réseau, qui offre probablement un chemin à faible énergie pour la propagation des fissures.

Voici quelques-unes des propriétés mécaniques typiques des fontes à haute teneur en chrome :

I.7.1. Résistance à l'usure

L'usure est un problème important rencontré par de nombreuses industries, et le remplacement des pièces usées peut entraîner des coûts considérables, notamment le coût des pièces de rechange, la perte de main d'œuvre et de temps de production, ainsi qu'une réduction de la productivité des biens d'équipement. Pour minimiser ces coûts et les temps d'arrêt des équipements, des matériaux résistants à l'usure sont souvent utilisés dans des environnements à forte usure. Les alliages de fonte blanche à haute teneur en chrome (HCWCI \equiv High Chromium White Cast Iron, en anglais) constituent l'un des groupes de matériaux résistants à l'usure les plus couramment utilisés.

Le HCWCI subit plusieurs réactions de solidification et plusieurs réactions de transformation à l'état solide différentes lors du refroidissement à température ambiante tout en réchauffant à des températures élevées en dessous de la température du solidus.

Elles possèdent une résistance à l'usure assez bonne comparée à d'autres métaux, cependant cette résistance dépend de la microstructure de la matrice et de la quantité de carbures primaires dans l'alliage. Il est donc essentiel d'examiner l'impact de ces micro-constituants sur la résistance à l'usure. Les résultats peuvent varier en fonction du type de microstructure et des tests d'usure par abrasion utilisés [19].

Elles sont utilisées dans les composants suivants : les concasseurs de minerais (a) et (b), les rouleaux (c), les blindages de broyeur à boulets (d) et (e) et de l'équipement de pulvérisation (f) (Figure I.10).

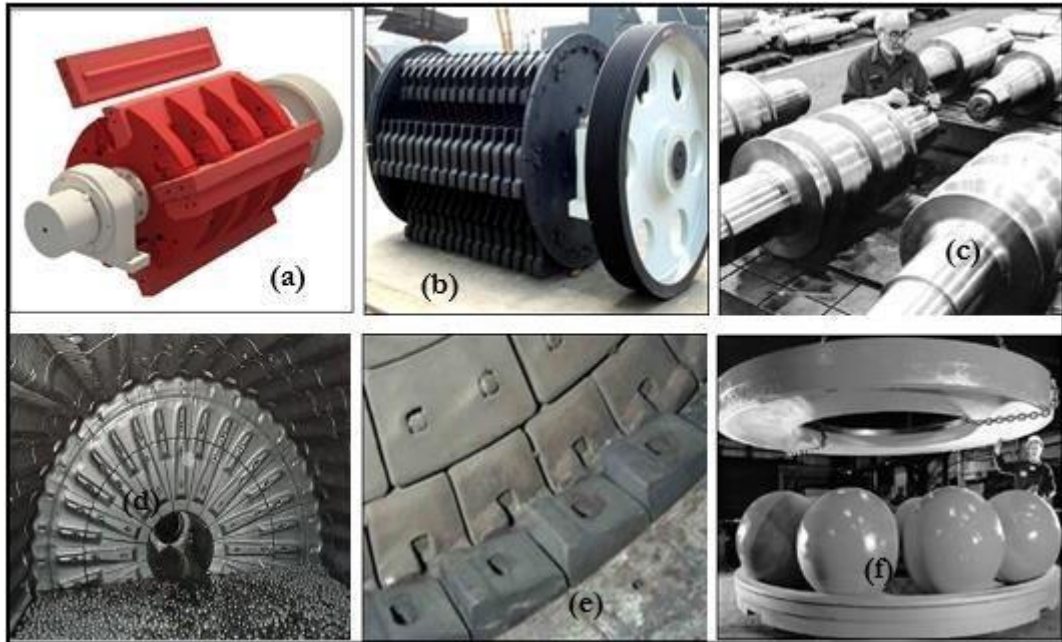


Figure I. 9 : Illustrations des composants moulés résistants à l'usure en alliages HCWCI [20]

I.7.2. Ténacité

Pour améliorer la ténacité à la rupture, plusieurs approches sont envisageables, liées à la composition chimique, aux conditions de coulée et de solidification ou au type de traitement thermique. Alternativement, il pourrait être possible d'améliorer la ténacité à la rupture en rompant de quelque manière que ce soit le réseau de carbures. Étant donné que les traitements thermiques ne sont pas très efficaces à cet égard, la seule façon d'y parvenir, tout en restant à l'état solide, est d'appliquer une certaine quantité de déformation plastique au matériau [19].

I.7.3. Résistance à la corrosion

Les HCWCI sont utilisés dans des environnements contenant différents niveaux d'usure mécanique avec corrosion, par exemple, dans le concassage du minerai, le broyage à billes et le pompage de boues. Un certain degré d'impact est toujours ressenti par les composants pendant le service. Les HCWCI doivent être conçus pour obtenir les propriétés requises en utilisant des connaissances théoriques, des données de la littérature et la modélisation mathématique.

I.7.4. Dureté

La fonte à haute teneur en chrome présente de bonnes propriétés mécaniques, une dureté élevée à l'état de coulée et de faibles fluctuations de dureté lorsque les performances changent. La fluidité des fontes à haute teneur en chrome est presque aussi bonne que celle des fontes

grises ordinaires, ce qui permet d'utiliser des pièces de formes suffisamment complexes directement après la coulée sans usinage ultérieur.

I.7.5. Le module d'élasticité

Le module d'élasticité d'une fonte blanche est considérablement influencé par sa structure de carbures. Une fonte avec des carbures eutectiques M_3C a un module de traction de 165 à 195 GPa, que ce soit perlite ou martensitique, tandis qu'une fonte avec des carbures eutectiques M_7C_3 a un module de 205 à 220 GPa [17].

I.8. Fontes blanches à haute teneur en chrome alliées au bore

I.8.1 Diagramme de Phase Fe-B

Le diagramme de phase Fe-B est essentiel pour comprendre les comportements des alliages de fer avec différentes concentrations de bore. Ce diagramme illustre les différentes phases présentes à diverses températures et compositions, fournissant des informations cruciales pour le traitement thermique et la conception des alliages [26].

I.8.2. Phases et Transformations dans le Système Fe-B

Les phases typiques dans le système Fe-B incluent le fer pur (α -Fe), le bore pur, et plusieurs phases intermétalliques comme Fe_2B et FeB . Les transformations de phase impliquent la formation de carbures de bore, qui renforcent la matrice de fer [26]. La figure I.11 représente le diagramme de phase Fe-B, qui montre les relations entre les phases en fonction de la composition en bore (B) et de la température (T). Les différentes régions et transformations représentées dans ce diagramme sont :

I.8.2.1. Phases Principales

Ferrite (α -Fe) : Phase de fer pur, de structure cubique centrée (bcc), présente à des concentrations très faibles en bore.

Fe_2B : Borure de fer, formant une phase intermétallique très dure. Elle est stable sur une large gamme de compositions et de températures et est cruciale pour les propriétés mécaniques des alliages.

FeB : Un autre borure de fer, également très dur et résistant. Il se forme à des teneurs en bore plus élevées que Fe_2B .

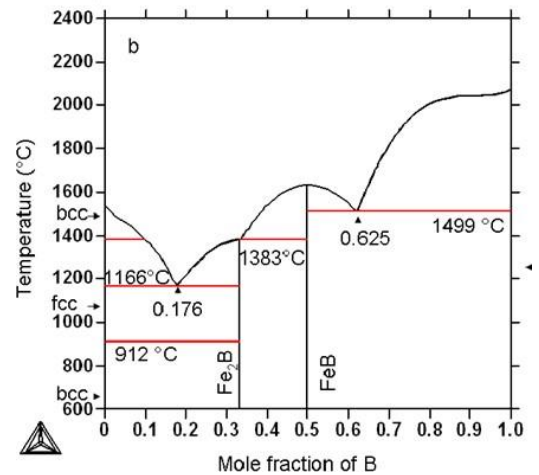
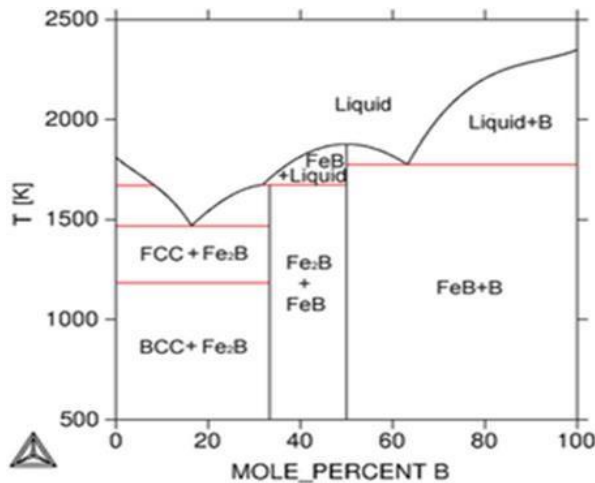


Figure I. 11 : Diagramme de phase Fe-B

I.8.2.2. Phase liquide (L) : Présente à des températures élevées, au-dessus du point de fusion des alliages Fe-B.

- **BCC + Fe₂B :** Cette région indique la coexistence de la phase cubique centrée (BCC, ou ferrite) et du borure de fer Fe₂B. Elle est présente à des compositions en bore relativement faibles et à des températures plus basses.
- **FCC + Fe₂B :** Cette région montre la coexistence de la phase cubique à faces centrées (FCC, ou austénite) et du borure de fer Fe₂B. Cette phase se trouve également à des compositions faibles en bore, mais à des températures plus élevées que la région BCC + Fe₂B.
- **Fe₂B + FeB :** À des concentrations en bore intermédiaires, cette région montre la coexistence de deux borures, Fe₂B et FeB. Cette région est stable sur une large plage de températures.
- **FeB + B :** À des concentrations en bore très élevées, cette région montre la coexistence de FeB et de bore pur (B).

I.8.2.3. Liquide + FeB et Liquide + B : Ces régions montrent la coexistence des phases liquides avec FeB ou avec du bore pur, respectivement, à des températures élevées.

I.8.2.4. Transformations Importantes (Transformation Eutectique (FeB + Liquide))

À une certaine composition en bore et température, le liquide se transforme en FeB et une phase liquide résiduelle. Cela est représenté par la région "FeB + Liquide". À mesure que la température baisse, le liquide se transforme en phases solides. Par exemple, le liquide peut se transformer en FeB ou en B selon la composition en bore.

I.8.2.5. Points Clés du Diagramme

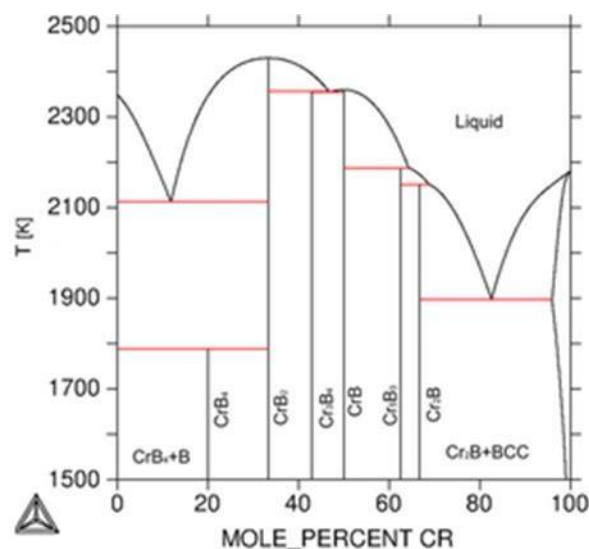
- **Composition Faible en Bore** : À des compositions faibles en bore, les phases dominantes sont les phases fer (BCC et FCC) et Fe₂B. À basse température, la phase BCC est stable, tandis qu'à haute température, la phase FCC est présente.
- **Composition Intermédiaire en Bore** : Cette région montre principalement la coexistence des borures Fe₂B et FeB. La transition entre ces phases se produit sur une large plage de températures.
- **Composition Élevée en Bore** : À des teneurs en bore élevées, le diagramme montre la coexistence de FeB et de bore pur, ainsi que des phases liquides à haute température

Le bore, même en petites quantités, peut améliorer significativement la dureté, la résistance à l'usure et la stabilité thermique des alliages de fer. Cela est dû à la formation de carbures de bore extrêmement durs et stables [28].

I.8.3. Diagramme de Phase Cr-B

Les alliages Cr-B sont largement utilisés dans des applications où une dureté élevée et une résistance à l'usure sont nécessaires, comme dans les outils de coupe, les revêtements résistants à l'abrasion, et les composants de haute performance. Les phases borures comme CrB et Cr₂B apportent des propriétés mécaniques exceptionnelles grâce à leur structure cristalline dure et stable [29].

Le chrome améliore la résistance à la corrosion, la dureté et la résistance mécanique des alliages de fer. Il favorise également la formation de phases dures comme les carbures de chrome, ce qui est essentiel pour les applications où la résistance à l'usure est cruciale [30].



Le diagramme de phase Cr-B montre plusieurs phases intermétalliques importantes, ainsi que des régions où ces phases coexistent avec des phases pures de Cr et B (figure I.12). Les principales phases sont :

- **CrB** : Borure de chrome, formant une phase dure et stable sur une large gamme de compositions.
- **Cr₂B** : Un autre borure de chrome, stable à des compositions en bore plus faibles que CrB.
- **Cr₅B₃** : Phase intermétallique complexe contenant du chrome et du bore.
- **CrB₄** : Phase borure plus riche en bore, présente à des compositions élevées en bore.

Bore pur (B) : Présent à des compositions élevées en bore.

Chrome pur (Cr) : Présent à des compositions faibles en bore.

I.8.3.1. Transformations de Phase

Les transformations de phase dans le système Cr-B sont cruciales pour la formation des microstructures des alliages. Les principales transformations comprennent :

Solidification : À haute température, le liquide se solidifie pour former des phases telles que CrB, Cr₂B, et Cr₅B₃ en fonction de la teneur en bore.

Réactions Eutectiques : À certaines compositions spécifiques, le liquide peut se transformer directement en une combinaison de phases solides, comme CrB et B.

Transformations Solides-Solides : Par exemple, Cr₂B peut se transformer en CrB à des températures et compositions spécifiques.

I.8.3.2. Interprétation du Diagramme

En analysant le diagramme de phase Cr-B, nous pouvons identifier plusieurs régions de coexistence des phases et les transitions de phases à différentes températures :

- **Région CrB + B** : À des compositions élevées en bore et des températures modérées, cette région montre la coexistence du borure de chrome CrB et du bore pur.
- **Région Cr₂B** : À des compositions plus faibles en bore, la phase Cr₂B prédomine, indiquant une structure stable et dure.
- **Région Cr₅B₃** : Entre Cr₂B et CrB, cette phase intermédiaire complexe est stable à une plage de compositions intermédiaires.
- **Région Liquide + CrB** : À des températures élevées, le liquide peut coexister avec la phase CrB, indiquant les conditions de solidification.

- **Région Liquide** : À des températures très élevées, le matériau est entièrement fondu, passant progressivement à des phases solides lors du refroidissement.

I.8.4. Diagramme de Phase Fe-Cr-B

Le chrome et le bore peuvent former diverses phases intermétalliques telles que $(Cr, Fe)_2B$. Ces phases influencent les propriétés des alliages de fer, notamment en augmentant leur dureté et leur résistance à l'usure [31].

I.8.5. Phases et Transformations dans le Système Fe-Cr-B

En plus des phases du système Fe-Cr, des phases intermétalliques contenant du bore, comme Fe_2B et $(Cr,Fe)_2B$, sont présentes. Ces phases ont des propriétés distinctes et influencent les transformations de phase et la microstructure globale des alliages [32]. La figure I.13 représente le diagramme Fe-Cr-B. Le diagramme est présenté sous forme triangulaire en trois dimensions, montrant la relation entre les concentrations de fer, de chrome et de bore dans l'alliage. Chaque coin représente une concentration pure d'un des composants, permettant aux utilisateurs de déterminer les points d'équilibre entre les différentes phases. Ces composants sont :

Fer (Fe) : Constitue la matrice principale de l'alliage.

Chrome (Cr) : Ajouté pour améliorer la résistance à la corrosion et à l'usure.

Bore (B) : Utilisé comme élément d'alliage pour modifier les propriétés des phases formées.

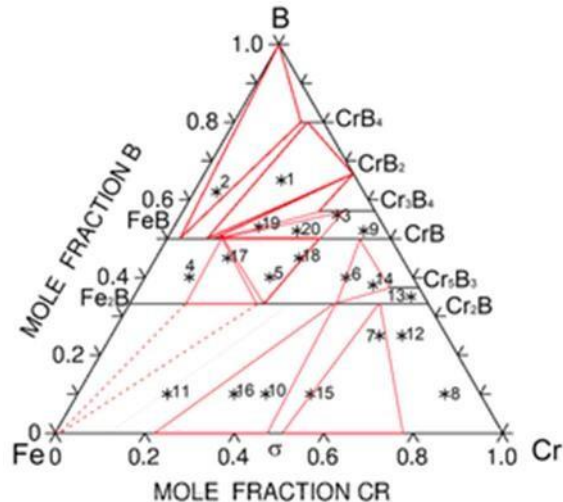


Figure I. 13: Diagramme de phase Fe-Cr-B

I.8.5.1. Phases possibles

Le diagramme inclut plusieurs phases possibles telles que :

Carbures chrome : de comme Cr_3C_2 et Cr_7C_3 , formés lorsque le chrome réagit avec le carbone disponible dans l'alliage.

Borures : comme FeB et CrB , formés lorsque le bore réagit avec le fer et le chrome.

Matrice de fer : la phase principale qui inclut le fer et d'autres éléments dissous.

Ce diagramme est utilisé dans une large gamme d'applications, y compris le développement et l'amélioration des alliages pour atteindre les propriétés souhaitées telles que la résistance à la corrosion et la haute dureté, Il aide à identifier les compositions d'alliages appropriées qui améliorent les performances des matériaux dans divers environnements et applications industrielles.

I.8.5.2. Comportement des Phases lors du Refroidissement et du Chauffage

Les phases intermétalliques dans les alliages Fe-Cr-B montrent des comportements distincts lors du chauffage et du refroidissement, influençant la microstructure finale. Ces comportements déterminent les propriétés mécaniques et thermiques des alliages [33].

I.8.5.3. Influence du Pourcentage de Bore sur les Propriétés

Effet sur la Structure Microcristalline

Le pourcentage de bore affecte la formation et la distribution des carbures de bore, influençant ainsi la microstructure des alliages. Une distribution homogène de ces carbures peut améliorer les propriétés mécaniques [34].

A. Propriétés Mécaniques

Le bore améliore la dureté, la résistance à l'usure et la ténacité des alliages de fer, en raison de la formation de phases dures comme les carbures de bore. Ces propriétés sont essentielles pour les applications nécessitant une résistance élevée à l'abrasion [35].

B. Propriétés Thermiques

Les alliages avec différentes concentrations de bore montrent des comportements thermiques variés lors des traitements thermiques. Le bore influence la stabilité thermique et la résistance à la déformation thermique [36].

C. Propriétés Physiques

Le bore affecte également la densité, la conductivité thermique et électrique des alliages de fer. Ces propriétés doivent être optimisées en fonction des exigences spécifiques des applications industrielles [37].

I.9. Traitement thermique des fontes blanches à haute teneur en chrome

Le traitement thermique est un processus fondamental dans l'ingénierie des matériaux, offrant un moyen précieux de manipuler et d'améliorer les propriétés des matériaux [38]. En utilisant des techniques de chauffage et de refroidissement contrôlées, le traitement thermique permet de modifier la structure interne des matériaux, ce qui a un impact significatif sur leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Les matériaux soumis à des traitements thermiques comprennent les métaux, les alliages, les céramiques, les polymères et même certains composés organiques [39]. Chaque matériau réagit différemment aux variations de température, de temps et de taux de refroidissement, ce qui nécessite une approche personnalisée pour obtenir les propriétés désirées [40]. Les principaux objectifs du traitement thermique incluent l'amélioration de la dureté, de la résistance, de la ductilité, de la ténacité, de la résistance à la corrosion et de la stabilité dimensionnelle des matériaux [41]. Ces améliorations sont essentielles pour diverses applications industrielles, allant de l'automobile à l'aérospatiale en passant par l'électronique et la construction [42]. Ainsi, le traitement thermique se présente comme un outil puissant pour façonner les matériaux selon les exigences spécifiques de chaque application, ouvrant la voie à l'innovation et à l'amélioration continue dans de nombreux domaines industriels.

I.9.1. Normalisation des Fontes Blanches à Haute Teneur en chrome

La normalisation est un traitement thermique visant à homogénéiser la microstructure (assurer une distribution uniforme des carbures de chrome, améliorer la performance mécanique globale), réduire les tensions internes (introduites lors de la solidification), et affiner la taille des grains des fontes blanches à haute teneur en chrome (améliorer la dureté et la résistance mécanique). Ce traitement est particulièrement utile après la coulée pour préparer la fonte à des traitements thermiques ultérieurs ou à une utilisation directe en service.

La procédure typique de normalisation des fontes blanches à haute teneur en chrome comprend plusieurs étapes :

1. **Chauffage** : La fonte est chauffée à une température entre 900°C et 1100°C, bien au-dessus de la température de transformation critique.
2. **Maintien à température** : La pièce est maintenue à cette température pendant une période déterminée, généralement entre 1 à 2 heures, pour assurer une transformation complète et homogène

3. Refroidissement : La pièce est refroidie à l'air calme, permettant une transformation contrôlée et uniforme de la microstructure

La Figure I.14 ci-dessous illustre le cycle thermique typique de la normalisation avec refroidissement à l'air.

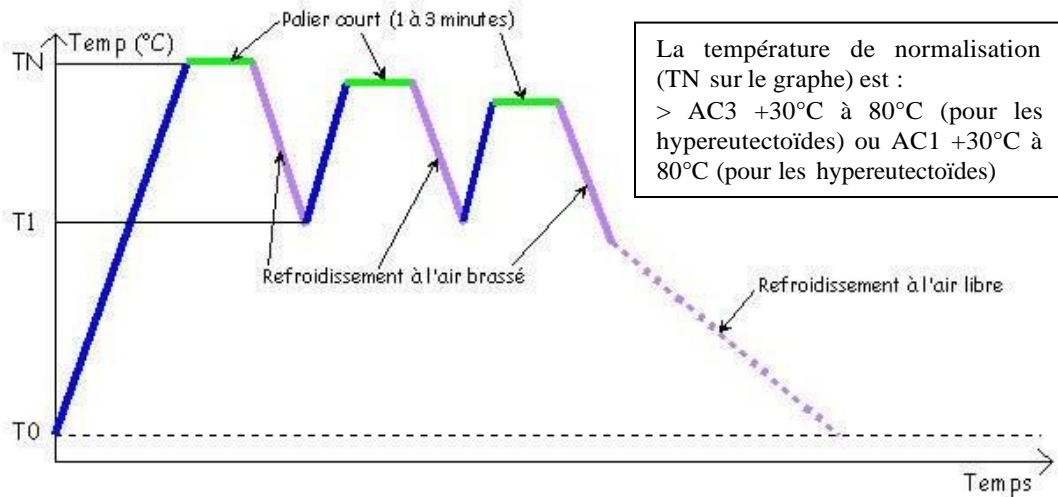


Figure I.14 : Cycle thermique typique de la normalisation des fontes blanches à haute teneur en chrome [43].

I.9.2. Trempe des Fontes Blanches à Haute Teneur en Chrome

La trempe est un traitement thermique essentiel visant à améliorer la dureté et la résistance à l'usure des fontes blanches à haute teneur en chrome. Ces propriétés sont cruciales pour les applications industrielles nécessitant une haute résistance à l'abrasion et une durabilité accrue.

La procédure de trempe des fontes blanches à haute teneur en chrome inclut plusieurs étapes importantes :

- **Chauffage :** La pièce est chauffée à une température comprise entre 950°C et 1050°C. Cette étape permet la dissolution des carbures dans la matrice austénitique.
- **Maintien à température :** La pièce est maintenue à cette température pendant 1 à 2 heures pour assurer une transformation homogène.
 - **Refroidissement rapide :**
 - **Refroidissement à l'eau :** La pièce est rapidement plongée dans de l'eau, ce qui permet de transformer la matrice austénitique en une structure martensitique dure, accompagnée de carbures de chrome secondaires.
 - **Refroidissement à l'huile :** Utilisé pour un refroidissement moins agressif, réduisant le risque de fissuration mais assurant toujours une trempe rapide.

La Figure I.15 présente un cycle thermique typique de la trempe :

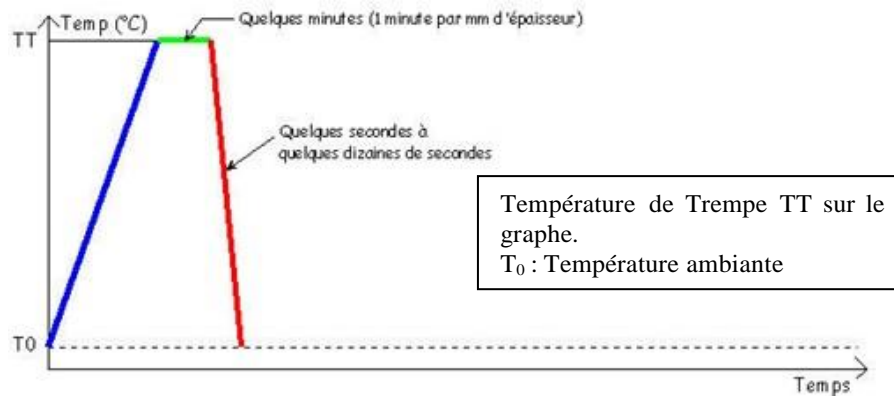


Figure I. 15 : Cycle thermique typique de la trempe des fontes blanches à haute teneur en chrome [43].

I.9.3. Revenu des Fontes Blanches à Haute Teneur en Chrome

Le revenu des fontes blanches à haute teneur en chrome est un traitement thermique secondaire essentiel visant à améliorer les propriétés mécaniques et à réduire les contraintes internes induites par la trempe. Les principaux objectifs du revenu sont :

- **Relaxation des contraintes internes :** Le revenu permet de soulager les contraintes internes générées lors de la trempe, réduisant ainsi les risques de fissuration et de déformation.
- **Ajustement des propriétés mécaniques :** Ce traitement ajuste la dureté et améliore la ténacité du matériau, équilibrant ainsi la fragilité résultante de la trempe pour optimiser les performances mécaniques globales [44].

La procédure de revenu des fontes blanches à haute teneur en chrome suit des paramètres spécifiques de température et de durée pour obtenir les propriétés désirées :

Température de Chauffe : Généralement comprise entre 200°C et 700°C, selon la composition spécifique de l'alliage et les propriétés mécaniques souhaitées.

Maintien à la Température de revenu : Typiquement de 1 à 4 heures, selon l'épaisseur de la pièce et les propriétés recherchées.

Refroidissement Contrôlé : Refroidissement lent à l'air ou dans le four pour éviter la formation de nouvelles contraintes internes.

La figure I.16 présente un cycle thermique typique du revenu.

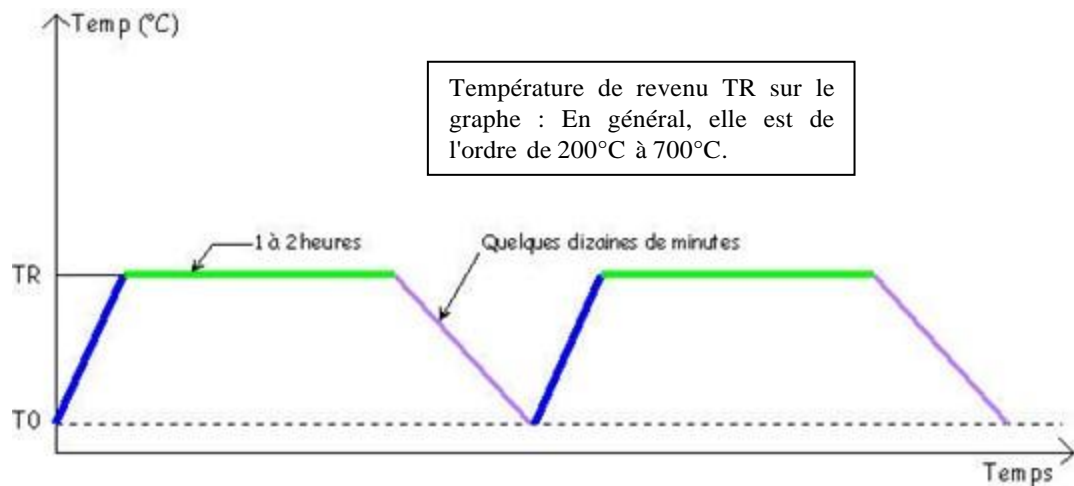


Figure I.16 : Diagramme du cycle thermique de revenu [43]

Le revenu influence de manière significative la microstructure et les propriétés mécaniques finales des fontes blanches à haute teneur en chrome :

- **Transformation des Carbures** : Les carbures de chrome (comme Cr_7C_3 et Cr_3C_2) peuvent se transformer en carbures plus stables à haute température, améliorant la résistance à l'usure.
- **Affinement des Grains** : Le revenu peut affiner la structure granulaire, augmentant ainsi la ténacité du matériau.

I.9.4. Recuit des Fontes Blanches à Haute Teneur en Chrome

Le recuit est un processus de traitement thermique utilisé pour améliorer les propriétés mécaniques et physiques des alliages métalliques, notamment les fontes blanches à haute teneur en chrome. Ce traitement implique de chauffer le matériau à une température spécifique, le maintenir à cette température pendant une période donnée, puis le refroidir lentement. Le recuit est utilisé pour ces différents usages tels que :

1. Soulagement des Contraintes Internes

Le recuit aide à réduire ou éliminer les contraintes internes générées lors des procédés de fabrication tels que la coulée. Cela permet de diminuer le risque de fissures et de déformations ultérieures [45].

2. Amélioration de la Ductilité et de la Ténacité

Le recuit augmente la ductilité et la ténacité du matériau en raffinant sa microstructure, ce qui le rend moins fragile et plus résistant aux chocs et aux charges dynamiques [46].

3. Homogénéisation de la Composition Chimique

Le recuit favorise la diffusion des éléments d'alliage, conduisant à une composition chimique plus homogène et à une microstructure uniforme [47].

4. Affinement de la Microstructure

En chauffant et en refroidissant le matériau de manière contrôlée, le recuit permet de former une microstructure plus fine et plus stable, ce qui peut améliorer les propriétés mécaniques et physiques du matériau [46].

5. Réduction de la Dureté

Le recuit peut être utilisé pour réduire la dureté excessive du matériau, rendant ainsi les opérations d'usinage et de formage plus faciles et prolongeant la durée de vie des outils de coupe [46].

6. Amélioration de la Stabilité Dimensionnelle

Le recuit aide à stabiliser les dimensions des pièces, en particulier celles qui nécessitent des tolérances strictes, en réduisant les déformations résiduelles [48]. La Figure I.17 présente un cycle thermique typique du recuit:

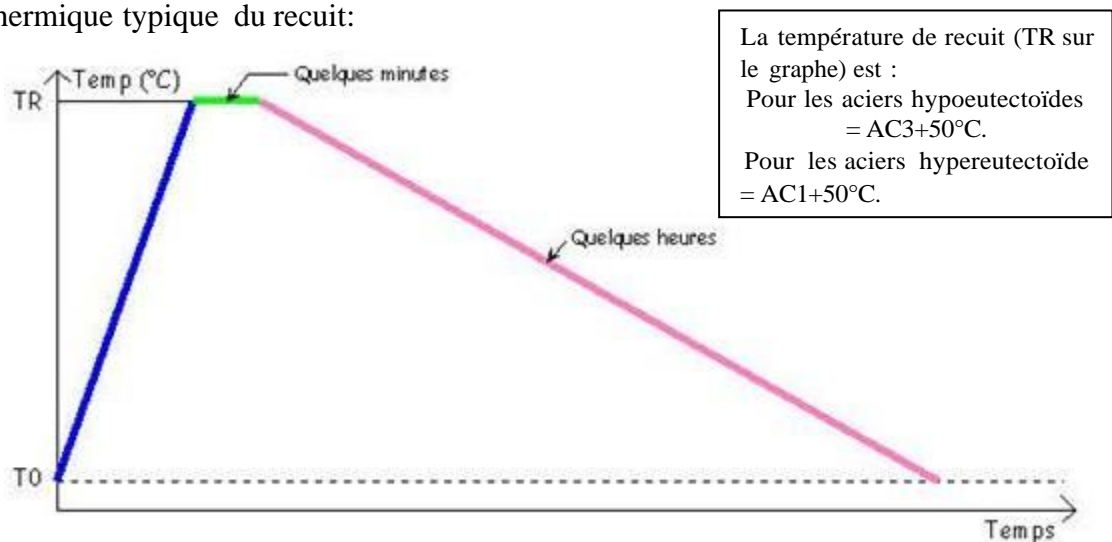


Figure I. 17 : Diagramme du cycle thermique du recuit [43]

On distingue plusieurs Types de Recuits :

- **Recuit de Recristallisation** : Ce traitement thermique est appliqué aux métaux déformés à froid pour éliminer les défauts de la structure cristalline [49], son but est de réduire la dureté et augmenter la ductilité en formant de nouveaux grains sans défaut [50].

- **Recuit d'Adoucissement** : Traitement visant à réduire la dureté du matériau pour améliorer son usinabilité [51], il facilite les opérations d'usinage et de formage, et améliorer la stabilité dimensionnelle [52].

- **Recuit de Sphéroïdisation** : Ce traitement est appliqué aux aciers à haute teneur en carbone pour transformer les carbures en particules sphéroïdales [53], il est utilisé dont le but d'améliorer l'usinabilité et augmenter la ductilité [54].

- **Recuit de Réduction des Contraintes** : Traitement visant à diminuer les contraintes internes générées par les procédés de fabrication [55], il permet de réduire les contraintes résiduelles et améliorer la stabilité dimensionnelle [56].

En conclusion, les fontes blanches à haute teneur en chrome se distinguent par leurs applications techniques variées et leur composition chimique spécifique, comprenant une haute teneur en chrome et en carbone, formant une matrice dure de carbures de chrome. Ces fontes sont réputées pour leur dureté exceptionnelle et leur résistance remarquable à l'usure et à la corrosion, ce qui les rend indispensables dans les environnements sévères et abrasifs. L'ajout de bore améliore encore ces propriétés, tandis que les traitements thermiques comme la normalisation, la trempe, le revenu et le recuit permettent d'optimiser leur performance en ajustant leur microstructure. Ces caractéristiques font des fontes blanches à haute teneur en chrome des matériaux de choix pour les applications industrielles exigeantes, offrant une durabilité et une efficacité accrues.

Chapitre II : Techniques de caractérisation mécaniques et microstructurales

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous plongerons dans le monde complexe des techniques de caractérisation mécanique et microstructurale de la fonte blanche à haute teneur en chrome. Ces matériaux sont appréciés pour leur résistance à l'usure, leur robustesse et leur résistance à la corrosion exceptionnelles et nécessitent une évaluation approfondie pour bien comprendre leurs performances et leur comportement dans des conditions réelles.

Nous débuterons en explorant la caractérisation de la dureté, une mesure cruciale de la résistance d'un matériau à la pénétration ou à l'abrasion. Grâce à des techniques telles que l'essai de Vickers ou Rockwell, nous pourrions évaluer la capacité des fontes blanches à maintenir leur intégrité structurelle sous contrainte.

Ensuite, nous nous pencherons sur la caractérisation de la résistance à l'usure, une propriété essentielle pour les applications où ces fontes sont fréquemment sollicitées. Nous examinerons les méthodes d'essai de frottement, d'abrasion et de micro-indentation pour évaluer la capacité des matériaux à résister à l'usure dans des conditions variées.

Par la suite, nous aborderons la caractérisation de la résistance à la corrosion, un aspect critique étant donné les environnements souvent corrosifs dans lesquels ces fontes sont utilisées. Des tests tels que la spectroscopie d'émission atomique et les essais électrochimiques fourniront des informations précieuses sur la capacité des alliages à résister à la dégradation due à la corrosion.

Enfin, nous explorerons la caractérisation microstructurale des fontes blanches à haute teneur en chrome, en utilisant des techniques telles que la microscopie optique et. Ces outils nous permettront d'analyser la structure et la morphologie des phases présentes dans les fontes, offrant ainsi un aperçu détaillé de leur composition et de leur organisation à l'échelle microscopique.

En combinant ces différentes approches de caractérisation, nous espérons offrir une compréhension approfondie des fontes blanches à haute teneur en chrome, facilitant ainsi leur utilisation efficace dans une gamme diversifiée d'applications industrielles exigeantes.

II.2. Caractérisation de la dureté

La dureté est définie comme la résistance d'un matériau à la déformation permanente, telle que l'indentation, l'usure, l'abrasion ou les rayures. Principalement, l'importance des essais de dureté réside dans la relation entre la dureté et les autres propriétés du matériau. Par exemple, à la fois l'essai de dureté et l'essai de traction mesurent la résistance d'un métal au fluage plastique, et les résultats de ces tests peuvent être étroitement liés. L'essai de dureté est préféré car il est simple, facile et relativement non destructif.

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la dureté de ces matériaux, chacune présentant ses propres avantages en fonction des spécifications de l'application et des exigences de précision. Nous nous intéressant par la suite aux méthodes les plus utilisées.

II.2.1. Méthode de Vickers (HV)

Le test de la dureté Vickers est une méthode fiable et précise pour mesurer la résistance d'un matériau à la déformation permanente. La mesure comporte de nombreuses étapes bien organisées, débutant par la préparation de l'échantillon et se terminant par l'analyse des résultats. Les étapes à suivre sont les suivantes :

1. Détermination de la zone de test :

En premier lieu, repérez la zone de la surface de l'échantillon où le test de dureté Vickers sera réalisé. Il est nécessaire que cette zone soit représentative de la pièce et ne présente aucune distorsion, fissure ou défaut quelconque.

2. Nettoyage de la surface :

Éliminez les saletés et les débris de la surface. Nettoyez minutieusement la surface de l'échantillon afin de supprimer toute saleté, graisse, poussière ou toute autre forme de contamination. Utilisez des lingettes non pelucheuses et un solvant adapté pour assurer une surface propre et dépourvue de contaminants.

3. Polissage :

Le polissage est utilisé pour supprimer les défauts importants et les traces visibles à la surface. Utilisez du papier de verre à gros grain ou une meuleuse avec un abrasif à grain élevé pour rendre la surface de l'échantillon plus lisse (Figure II.1).

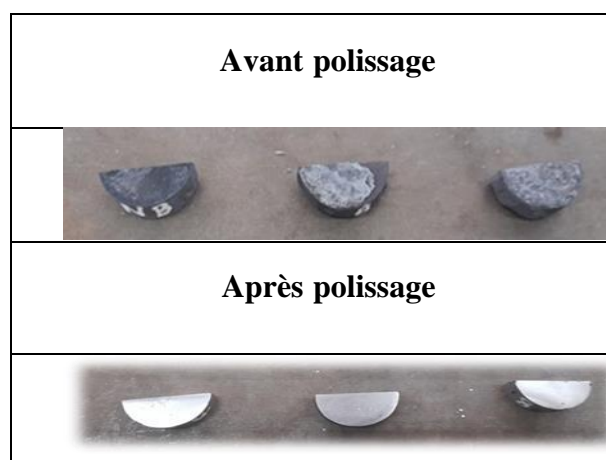


Figure II. 1 : Exemple de polissage sur nos échantillons

4. Installation de l'échantillon :

Après avoir préparé et poli correctement l'échantillon, placez-le avec soin sur la plate-forme de test de l'appareil de mesure. Veuillez à ce que l'échantillon soit bien fixé afin d'éviter tout mouvement pendant le test, car cela pourrait entraîner des modifications dans les résultats.

5. Réglage de l'appareil :

Il est essentiel de vérifier que l'appareil de test de dureté Vickers est correctement calibré avant de commencer le test. Assurez-vous que la charge appliquée et la durée de l'application respectent les spécifications du test afin d'assurer des résultats précis et fiables.

6. Application de la charge :

Positionnez soigneusement le pénétrateur en diamant, directement au-dessus de la surface de l'échantillon. (Figure II.2). Appliquez le pénétrateur sur la surface de l'échantillon en utilisant une charge spécifiée, généralement comprise entre 1 et 100 kg. Maintenez cette charge pendant une durée prédéterminée, typiquement de 10 à 15 secondes, pour permettre une indentation adéquate. L'essai est effectué à température ambiante.

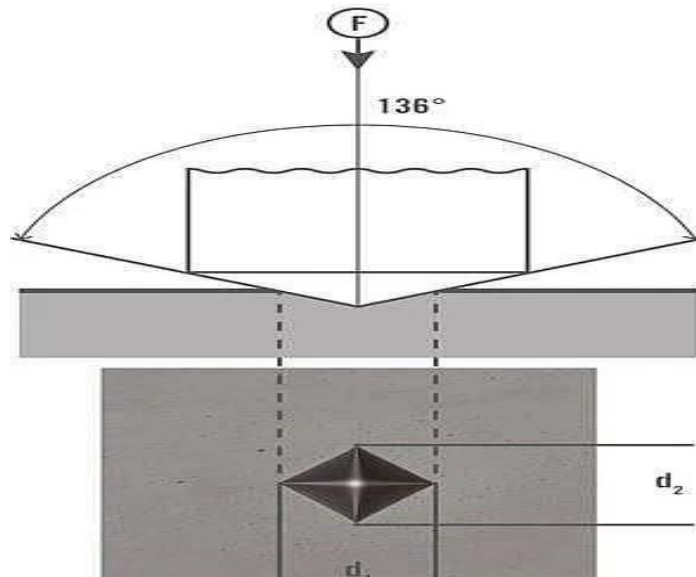


Figure II. 2: Principe de dureté Vickers [57]

L'indentateur Vickers est une pyramide à base carrée avec un angle entre faces de 136° et un rapport entre la diagonale de l'empreinte d, et la profondeur de pénétration, h de 7. La dureté est alors donnée par l'équation (1) :

$$HV = \frac{2F \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

Avec :

F : est la force appliquée (en kg).

θ : est l'angle entre les faces opposées de l'indentateur, soit 136 degrés.

d : est la moyenne des diagonales de l'indentation (en mm).

II.2.2. Méthode de Rockwell (HRC)

Le test de dureté Rockwell est une méthode basée sur la différence de profondeur, qui mesure la profondeur de pénétration permanente créée par l'indentateur. En revanche, les méthodes optiques comme celles de Brinell, Vickers et Knoop mesurent la taille de l'empreinte laissée par l'indentateur.

Plus l'empreinte laissée par l'indentateur sur la surface d'un échantillon soumis à une force d'essai définie est profonde, plus le matériau testé est mou. La profondeur de pénétration permanente, ainsi que quelques autres facteurs, permettent ensuite de déterminer la dureté Rockwell (HR).

Lors du test de dureté Rockwell, la force d'essai totale est appliquée en deux étapes. Cela permet d'éliminer l'influence de la rugosité de la surface de l'échantillon (comme les rainures) ainsi que l'erreur de mesure due au jeu dans la mesure de la profondeur de pénétration.

Pour la dureté Rockwell HRC, l'indentateur est un cône à 120° avec une pointe en diamant de rayon 0,2 mm (Figure II.3). L'essai est effectué à température ambiante et les charges doivent être appliquées sans choc.

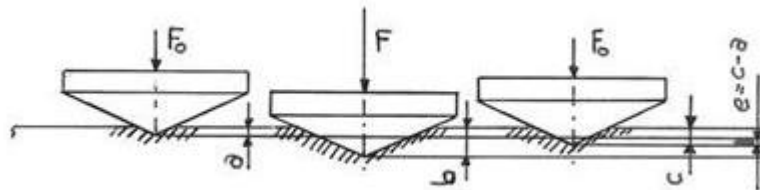


Figure II. 3: Déroulement d'un essai de dureté Rockwell [58]

La valeur de dureté Rockwell est calculée selon la formule (2) :

$$HR = N \cdot \frac{H}{S} \quad (2)$$

II.3. Caractérisation de la résistance à l'usure

Lorsque deux surfaces solides se déplacent l'une sur l'autre, l'usure se produit en raison de l'interaction des matériaux de surface. Cela implique une déformation progressive et un enlèvement de matériau d'une ou des deux surfaces. Il est important de souligner que l'usure est une réponse du système et non une propriété du matériau.

L'usure est généralement classée en deux catégories en fonction de l'absence ou de la présence d'un lubrifiant efficace. L'usure lubrifiée est l'usure qui se produit en présence de lubrifiants efficaces. L'usure sèche est l'usure qui se produit dans l'air et en l'absence de tout lubrifiant efficace. Dans de nombreuses applications pratiques, différents types d'usure sont apparents, par exemple, l'usure par roulement, l'usure par glissement, l'usure par frettage et l'usure par impact. En effet, ces termes ne décrivent pas les mécanismes d'usure, ils décrivent en fait le type de mouvement qui entraîne l'usure.

Les mécanismes d'usure sont décrits comme usure mécanique, usure chimique et usure thermique [57].

L'usure physique dans le sens technique, est définie comme un processus caractérisé par une attaque mécanique, en première ligne par un frottement conduisant à une perte progressive de matière en surface d'un corps solide par séparation de petites particules, donc c'est un changement de forme non voulue de la surface. L'usure peut avoir lieu dans un mouvement relatif entre un objet et son milieu gazeux liquide ou solide.

Le plus souvent l'usure est accompagnée par des phénomènes de corrosion où ces derniers ne sont pas clairs à séparer de l'usure. Même les connaissances et résultats obtenus pour les phénomènes d'usure n'ont pas une validité générale pour simplifier le danger de ce phénomène [46]

II.3.1. Méthodes de Mesure de la Résistance à l'Usure

II.3.1.1. Essai d'usure par abrasion

Il est possible d'envisager la caractérisation de matériaux en vue de leur choix optimal pour diverses applications industrielles grâce à divers moyens d'essais d'abrasion, dont la gamme des sollicitations et la possibilité de les faire varier de façon contrôlée. Les moyens d'essais d'abrasion ont connus, dans ce cadre, des développements très rapides pour répondre à des besoins divers. La diversité et la complexité des problèmes industriels définissent sur la plupart des cas une large gamme de types d'essais abrasifs. Premièrement, ces moyens peuvent être mis en œuvre dans une optique conventionnelle de caractérisation du matériau : Les essais de type conventionnel permettent d'apprécier et de comparer les caractéristiques d'élaboration du matériau, en accentuant sur un ou plusieurs des paramètres d'abrasion.

1 Test d'abrasion avec sable sec et roue en caoutchouc (ASTM G 65)

La méthode ASTM G 65 standard pour les essais d'abrasion par l'essai à l'aide de l'appareil à sable sec / roue de caoutchouc, connu sur le marché en tant que type de test Dillidur, est un type d'essai d'abrasion mesurant la perte de masse quantifiée par la pesée, ou le volume de masse perdue mesuré est un essai sur l'abrasion du sable sec. Cet essai c'est exécutée par l'initiation d'un écoulement de sable dans l'espace entre l'échantil on testé et une roue en caoutchouc en rotation. (Figure II.4)

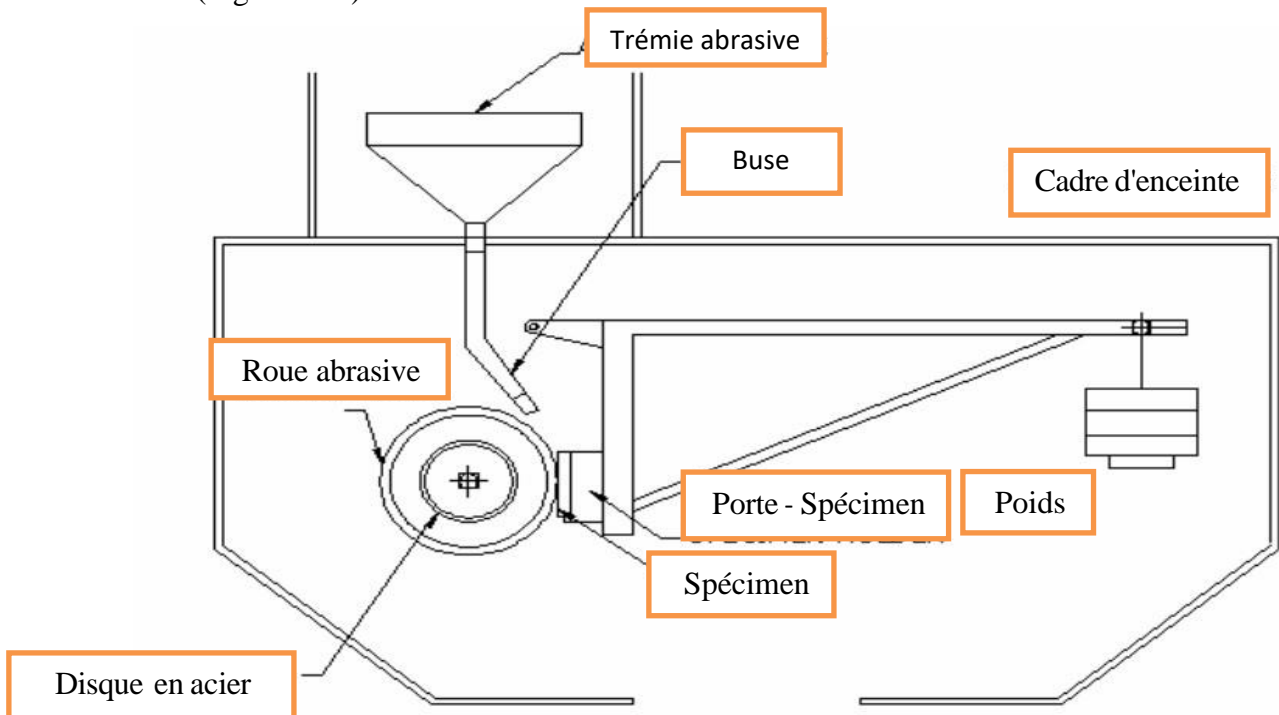


Figure II.4: Schéma test d'abrasion avec sable sec et roue en caoutchouc (ASTM G 65) [60]

Cette méthode de test couvre les procédures de laboratoire pour déterminer la résistance des matériaux métalliques à l'abrasion par rayure à l'aide du test de roue en caoutchouc avec sable sec. L'objectif de cette méthode de test est de produire des données permettant de classer de manière reproductible les matériaux selon leur résistance à l'abrasion par rayure dans un ensemble de conditions spécifiées.

Les résultats du test d'abrasion sont rapportés en termes de perte de volume en millimètres cubes pour la procédure de test spécifiée. Les matériaux ayant une résistance à l'abrasion plus élevée présenteront une perte de volume plus faible.

3. Cette méthode de test couvre cinq procédures recommandées qui sont appropriées pour des degrés spécifiques de résistance à l'usure ou des épaisseurs du matériau testé [61].

2 Test pion/disque (ASTM G 99)

La description générale du système de test d'usure à broche sur disque, illustrée dans la figure II.5, présente deux types de configuration. L'un implique un axe entraîné et un mandrin pour maintenir le disque en rotation, avec un dispositif à bras de levier pour la broche, permettant à celle-ci d'être forcée contre le disque en rotation avec une charge contrôlée. L'autre configuration charge une broche en rotation autour du centre du disque contre un disque stationnaire. Dans les deux cas, la piste d'usure sur le disque est circulaire, entraînant plusieurs passages d'usure sur la même trajectoire. Le système peut également être équipé d'un dispositif de mesure de la force de frottement, tel qu'une cellule de charge, pour déterminer le coefficient de frottement.

En ce qui concerne l'entraînement du moteur, un moteur à vitesse variable capable de maintenir une vitesse constante sous charge est requis, avec des vitesses de rotation typiquement comprises entre 0,3 et 3 rad/s. La machine doit être munie d'un compteur de révolutions pour enregistrer le nombre de rotations du disque et éventuellement arrêter la machine après un nombre pré-sélectionné de révolutions. Le porte-éprouvette de broche et le bras de levier doivent être conçus de manière robuste pour minimiser les vibrations pendant le test, en ajustant idéalement le pivot du bras dans le plan du contact d'usure pour éviter les forces de chargement extrinsèques. Enfin, les systèmes de mesure de l'usure doivent présenter une sensibilité de 2,5 μm ou meilleure pour les mesures linéaires, et une sensibilité de 0,1 mg ou meilleure pour la perte de masse de l'éprouvette de test, avec une sensibilité accrue pouvant être nécessaire dans les situations d'usure faible [62].

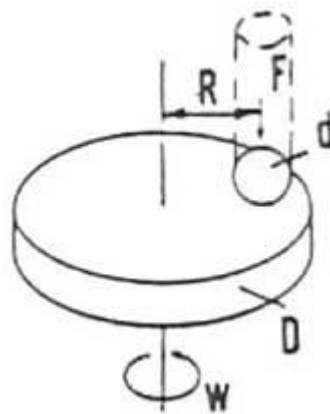


Figure II. 5 : Schéma du système de test d'usure pion/disque [62]

3 Test d'abrasion avec broyeurs à boulets de laboratoire

Les broyeurs à boulets de laboratoire (Figure II.6) sont utilisés par plusieurs équipes de recherche comme une autre alternative pour simuler les conditions d'abrasion sévères rencontrées dans les broyeurs à boulets industriels. Ils donnent des prévisions précises de la durée de vie des

alliages résistant à l'usure dans les applications de broyage. Ces des essais peu coûteux et beaucoup plus rapides que les essais effectués avec des broyeurs industriels. Les premières tentatives de développement de ces essais datent des années 1940 [63].

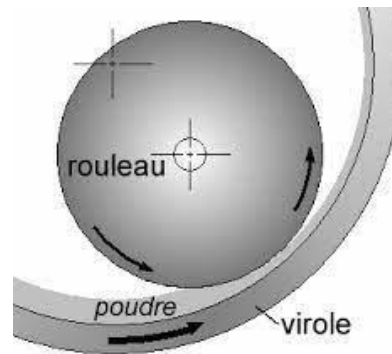


Figure II.6: Test d'abrasion avec broyeurs à boulets

II.3. Caractérisation de la résistance à la corrosion

Les processus de la corrosion sont des réactions hétérogènes chimiques ou électrochimiques qui se produisent à la surface de séparation du métal et le milieu ambiant (figure II.7) ; donc la corrosion est un mode de destruction du métal progressant par la surface [55].



Figure II. 7 : Corrosion de matériaux métallique de traitement d'eau [64]

II.3.1. Types de corrosion

La corrosion d'un métal ou d'un alliage peut se développer suivant différents processus, chacun d'eux caractérisant un type de corrosion.

1 Corrosion électrochimique

Elle se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité, soit dans le métal, soit dans le réactif. L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, un courant circule entre les anodes et les cathodes. Il est important que le produit final de la corrosion se développe à une certaine distance de la zone corrodée, dans la région où se rencontrent les produits élémentaires de corrosion anodiques et cathodiques [65].

2 Corrosion chimique

Cette corrosion se traduit par une réaction hétérogène entre le métal et la phase gazeuse dans un milieu sec gazeux. La corrosion chimique est plus rapide que la corrosion électrochimique qui met en évidence des échanges d'électron entre les plages anodiques et cathodiques [66].

II.3.2. Mécanismes de Corrosion

Corrosion uniforme : Attaque homogène de la surface.

Corrosion par piqûres : Formation de trous localisés.

Corrosion intergranulaire : Attaque des joints de grains.

Corrosion galvanique : Lorsqu'un métal est en contact avec un autre, provoquant un courant électrique qui accélère la corrosion.

Corrosion sous contrainte : Combinaison de contraintes mécaniques et de corrosion chimique [67] [68].

II.3.3. Méthodes de Caractérisation

Tests électrochimiques : Polarisation potentiodynamique, spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS).

Essais de corrosion accélérés : Exposition des matériaux à des environnements corrosifs contrôlés pour accélérer la corrosion [68].

Microscopie électronique à balayage (MEB) : Observation des surfaces corrodées pour analyser la morphologie et la profondeur de la corrosion.

Diffraction des rayons X (DRX) : Identification des produits de corrosion formés [69].

Analyse chimique : Détection des éléments présents sur la surface corrodée et identification des réactions chimiques impliquées.

II.4. Caractérisation microstructurale (Microscope Optique, MEB)

Parfois, il est nécessaire ou souhaitable d'examiner les éléments structurels et les défauts qui influencent les propriétés des matériaux. Certains éléments structurels ont des dimensions macroscopiques, c'est-à-dire qu'ils sont suffisamment grands pour être observés à l'œil nu.

Par exemple, la forme et la taille moyenne ou le diamètre des grains d'un échantillon polycristallin sont des caractéristiques structurelles importantes.

Cependant, dans la plupart des matériaux, les grains constitutifs ont des dimensions microscopiques, avec des diamètres pouvant être de l'ordre du micron, et leurs détails doivent être examinés à l'aide de divers types de microscopes.

Les microscopes optiques, électroniques et à sonde de balayage sont couramment utilisés en microscopie. Ces instruments aident à l'investigation des caractéristiques microstructurales de tous les types de matériaux. Certaines de ces techniques utilisent des équipements photographiques en conjonction avec le microscope ; la photographie sur laquelle l'image est enregistrée est appelée une photomicrographie. De plus, de nombreuses images microstructurales sont générées et/ou améliorées par ordinateur.

L'examen microscopique est un outil extrêmement utile dans l'étude et la caractérisation des matériaux. Voici quelques-unes des applications importantes des examens microstructuraux :

- garantir que les relations entre les propriétés et la structure (et les défauts) sont correctement comprises,
- prédire les propriétés des matériaux une fois que ces relations ont été établies, concevoir des alliages avec de nouvelles combinaisons de propriétés,
- déterminer si un matériau a été correctement traité thermiquement et établir le mode de fracture mécanique.

II.4.1. Microscopie Optique

La microscopie optique offre plusieurs avantages significatifs dans l'étude des échantillons biologiques et des matériaux. Tout d'abord, elle permet une observation directe des échantillons à des niveaux de détail visuellement accessibles, facilitant ainsi une compréhension rapide de leur structure et de leur composition. De plus, cette technique est non destructive pour les échantillons biologiques vivants, ce qui permet des observations en temps réel et la possibilité d'étudier les processus dynamiques. Cependant, la résolution limitée de la microscopie optique constitue l'un de ses principaux inconvénients. Cette limite empêche la visualisation des détails à l'échelle nanométrique, rendant difficile l'observation des structures ultrafines. De plus, l'usage de fluorescence ou de colorants spécifiques peut altérer les échantillons et introduire des artefacts, nécessitant une manipulation soignée pour obtenir des résultats précis.

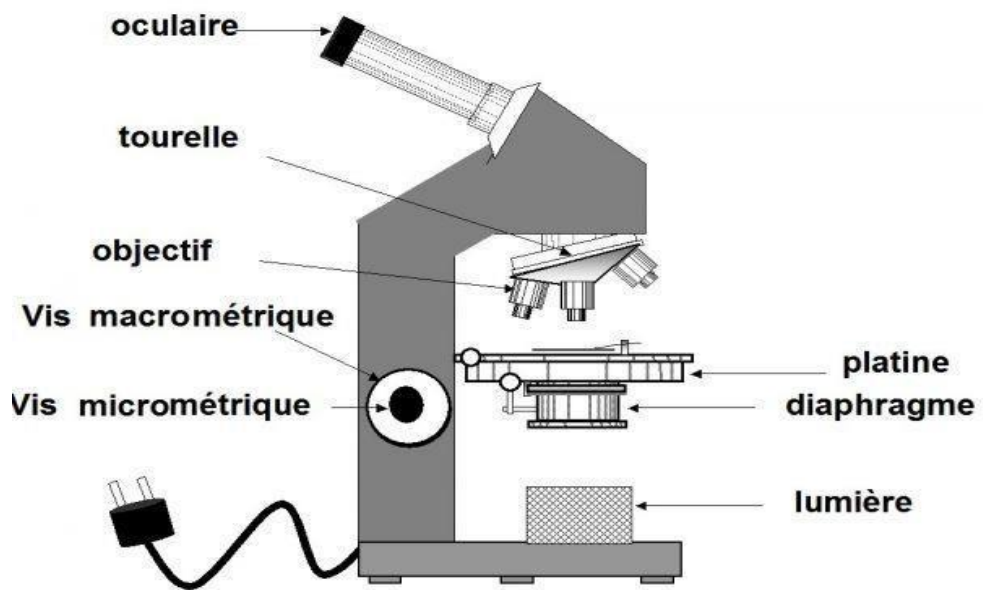


Figure II. 8 : Détails d'un microscope optique [74]

L'observation d'un échantillon sur un microscope optique passe par plusieurs étapes, à savoir :

II.4.1.1. Préparation des échantillons

1. Coupe et montage des échantillons

- Sélectionner l'échantillon à étudier.
- Utiliser une scie diamantée ou une autre méthode appropriée pour couper l'échantillon en une taille appropriée.
- Monter l'échantillon coupé sur une plaque ou un support en utilisant de la résine époxy ou d'autres matériaux de montage adaptés.

2. Polissage et attaque chimique

- Polir la surface de l'échantillon monté pour éliminer les rayures et obtenir une surface lisse.
- Utiliser des abrasifs de différentes granulométries pour le polissage grossier et fin.
- Nettoyer soigneusement l'échantillon après chaque étape de polissage pour éliminer les résidus d'abrasifs.
- Si nécessaire, effectuer une attaque chimique pour révéler les phases ou structures spécifiques de l'échantillon.

II.4.1.2. Observation des échantillons

1. Utilisation de la lumière réfléchie ou transmise

- Placer l'échantillon préparé sur le microscope métallographique (figure II.8).
- Utiliser la lumière réfléchie pour observer les surfaces polies.
- Utiliser la lumière transmise pour observer les échantillons montés en coupe mince, si nécessaire.

2. Réglage des paramètres

- Ajuster le grossissement du microscope pour obtenir le niveau de détail souhaité.
- Contrôler le contraste et la luminosité pour améliorer la visibilité des structures et des phases.

II.4.1.3. Acquisition d'images

- Capturer des images de haute qualité des zones d'intérêt de l'échantillon à l'aide d'un système de capture d'image connecté au microscope.
- Assurer une mise au point précise et une exposition appropriée pour chaque image capturée.

II.4.1.4 Analyse des résultats

1. Identification des phases et des structures

- Analyser les images pour identifier les différentes phases présentes dans l'échantillon.
- Utiliser des techniques d'analyse comme la comparaison avec des standards connus, la coloration sélective ou d'autres méthodes spécifiques à la composition des matériaux étudiés.

2. Mesure de la taille des grains

- Utiliser des logiciels d'analyse d'image pour mesurer la taille des grains présents dans l'échantillon.
- Sélectionner des zones représentatives de l'échantillon pour assurer une mesure précise et statistiquement significative de la taille des grains.

En suivant ces étapes avec précision et en utilisant les techniques appropriées, vous pourrez obtenir des données fiables et détaillées sur la structure et la composition de vos échantillons.

II.4.2. Microscope Electronique à Balayage (MEB)

La Microscopie Électronique à Balayage (MEB) est une technique d'imagerie qui utilise des faisceaux d'électrons pour produire des images à haute résolution de la surface des échantillons. Contrairement à la microscopie optique qui utilise la lumière, le MEB utilise des électrons, permettant ainsi une résolution beaucoup plus fine, généralement de l'ordre de quelques nanomètres (figure II.9). On peut accéder à des informations sur la topographie de surface de l'échantillon, la composition chimique, et d'autres propriétés comme la conductivité électrique.

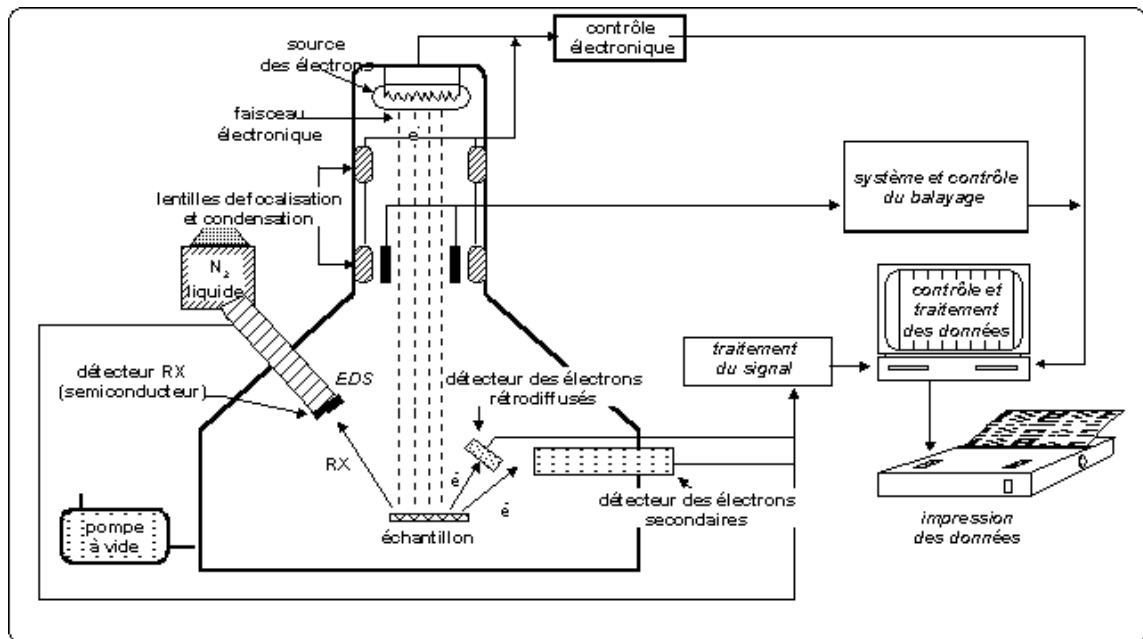


Figure II. 9 : Schéma d'un microscope électronique à balayage [75]

Chapitre III

Partie expérimentale

Résultats et discussions

Dans ce chapitre, nous détaillons les étapes de préparation des échantillons, les traitements thermiques appliqués à ceux-ci, et nous présentons les résultats obtenus (mesure de la dureté HRC et observations microstructurales) ainsi que leur interprétation.

Nous avons étudié l'effet de la température de trempe (température d'austénisation) et de la sévérité du milieu de trempe sur le matériau brut de coulée (non boruré) ainsi que sur le matériau ayant subi un traitement de boruration pendant quatre heures et huit heures.

III.1. Composition chimique et structure du matériau de base (substrat) et du matériau borurée

Le matériau étudié dans ce travail est une fonte blanche alliée au chrome. La composition chimique de cette fonte a été obtenue grâce à une analyse spectrométrique et elle est résumée dans le tableau III.1.

Cette nuance appartient à la classe FBCr12MoNi selon la norme AFNOR NFA32-401 ou à la classe II.A selon la norme ASTM A532-75a des fontes alliées au chrome – molybdène.

Désignation	C%	Si%	Mn	P%	S%	Cr%	Mo	Ni%	Cu%
Pourcentage	2,82	0,57	0,40	0,03	0,03	12,8	0,09	0,30	0,17

Tableau III. 1: Composition chimique du substrat utilisé (fonte blanche au chrome)

La figure III.1 montre la structure du matériau à l'état brut de coulée. Cette structure est composée de carbures de chrome de type M_7C_3 ($(Fe, Cr)_7C_3$) et d'une matrice austénitique formée après solidification.

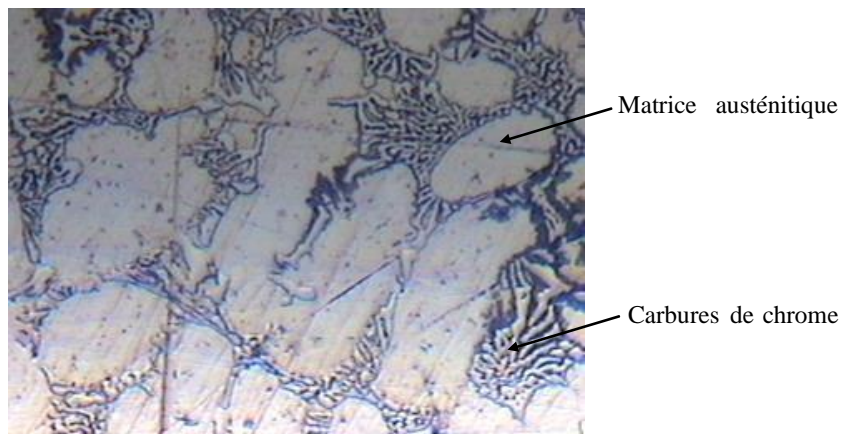


Figure III. 1. Structure de la fonte blanche alliée au chrome (à l'état brut de coulée, échantillon non boruré), (Attaque au nital, grossissement 10 X)

La structure typique des couches obtenues par boruration pendant une durée de 4 heures et 8 heures à 950°C sont représentées sur les figures III.2 et III.3 respectivement.

Les couches de borures métalliques sous forme de structure aciculaire se composent de deux composés intermétalliques de bore dans la couche superficielle du matériau, à savoir FeB et Fe₂B. Ces composés ont été observés et analysés à l'aide de la microscopie optique et de la microscopie électronique à balayage (MEB) dans le cadre d'un projet de fin d'études mené durant l'année 2022/2023.

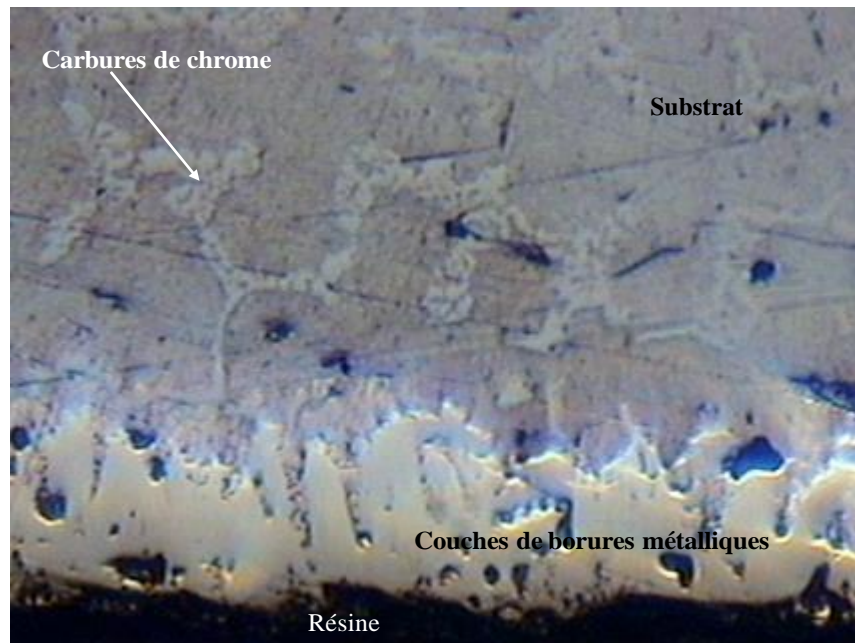


Figure III. 2: Echantillon boruré à 950°C, pendant une durée de 4 heures

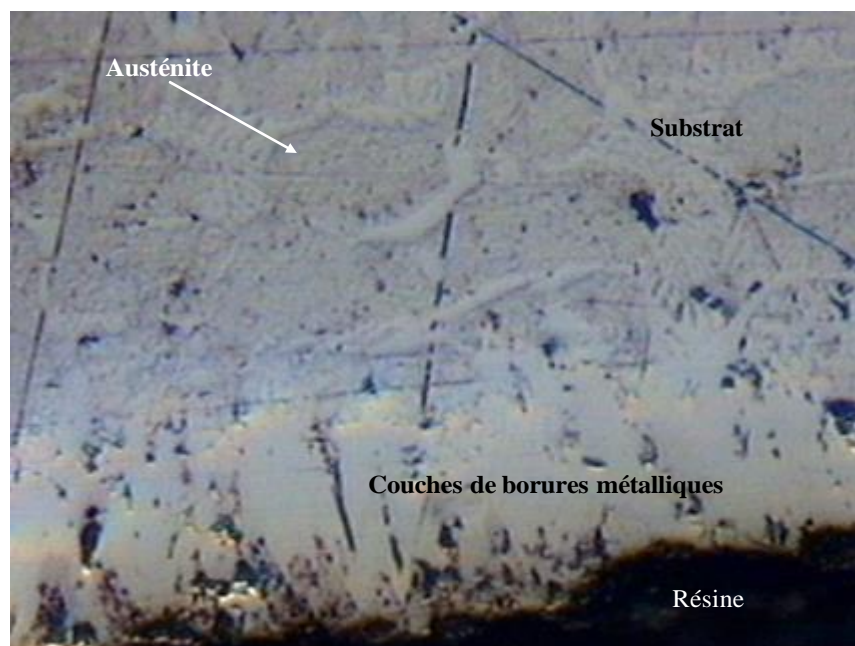


Figure III. 3: Echantillon boruré à 950°C, pendant une durée de 8 heures

III.2. Procédure expérimentale

III.2.1. Découpage

Les échantillons bruts de coulée et borurés utilisés dans les différents traitements ont été découpés au niveau du hal technologique de l'université de Tiaret. La figure III.4 illustre les échantillons découpés et repérés en fonte blanche.

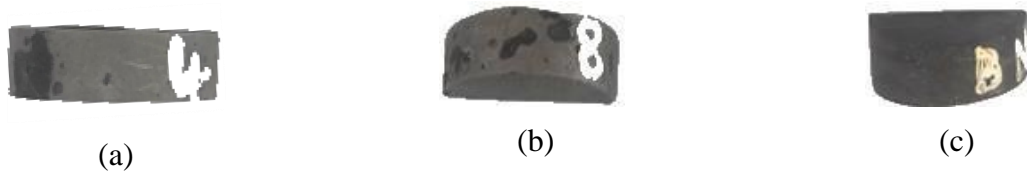


Figure III. 4: Echantillons destinés pour les traitements thermiques : (a) Borurés pendant 4 Heures (4H), (b) pendant 8 Heures (8H) et (c) non borurés (NB)

III.2.2. Emplacement des échantillons dans le four à moufle

Les échantillons à traiter sont disposés et placés dans un four à moufle Carbolite type 3216 P1 du laboratoire de recherche des technologies industrielles de l'Université de Tiaret, comme le montre les figures III.5a et III.5b.

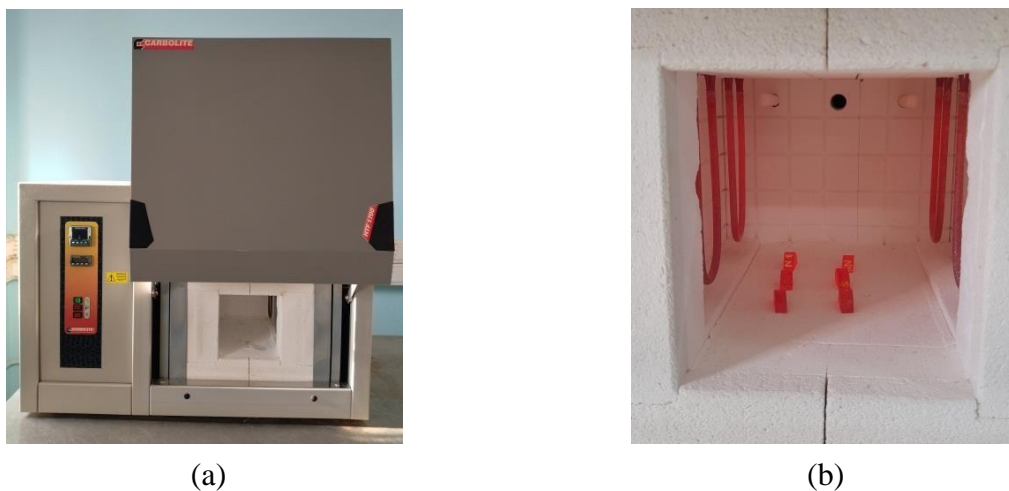


Figure III. 5 : Four à moufle, (a) : Vue de face du four, (b) : échantillons à l'intérieur du moufle (chambre)

III.2.3. Cycle des traitements thermiques réalisés

Les échantillons bruts de coulée et borurés ont subi des traitements de trempe à des températures de 850°C, 950°C et 1050°C, conformément au cycle thermique illustré à la figure III.6.

Un maintien de 25 minutes à la température de trempe a été effectué, suivi d'un refroidissement à l'eau pour trois échantillons et d'un refroidissement au four pour les trois autres.

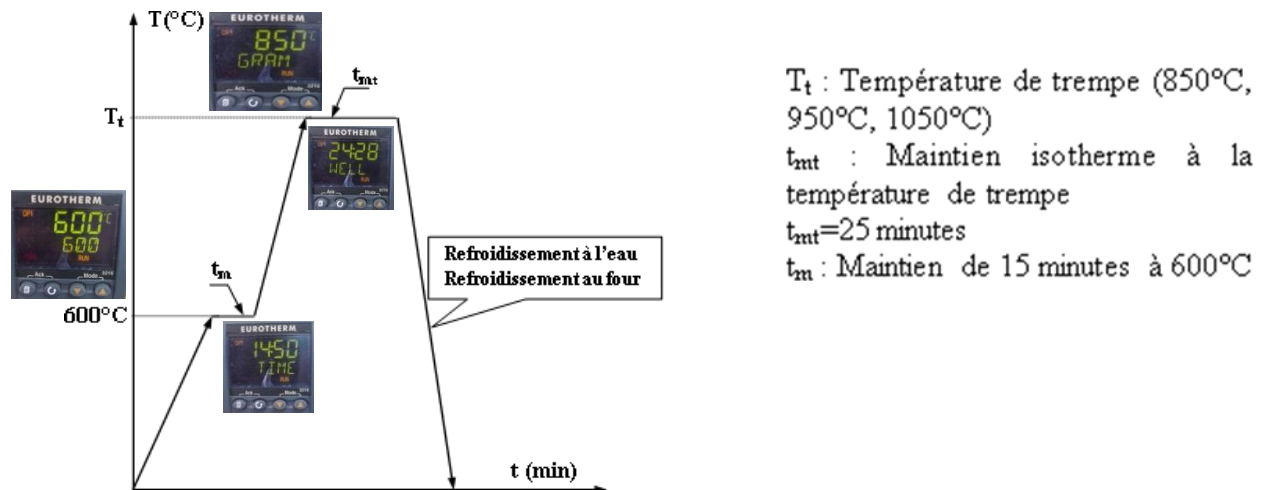


Figure III. 6 : Cycle des traitements thermiques réalisés

Les traitements thermiques effectués à 850°C, 950°C et 1050°C sont suffisants pour favoriser la formation d'oxydes de fer comme la magnétite (Fe_3O_4), l'hématite (Fe_2O_3) l'oxyde de chrome (Cr_2O_3) à la surface des échantillons, car ils ont été réalisés en présence d'oxygène. Le refroidissement rapide à l'eau crée des gradients thermiques importants et des tensions résiduelles, entraînant le décollement de la couche d'oxydes formée (figure III.7).

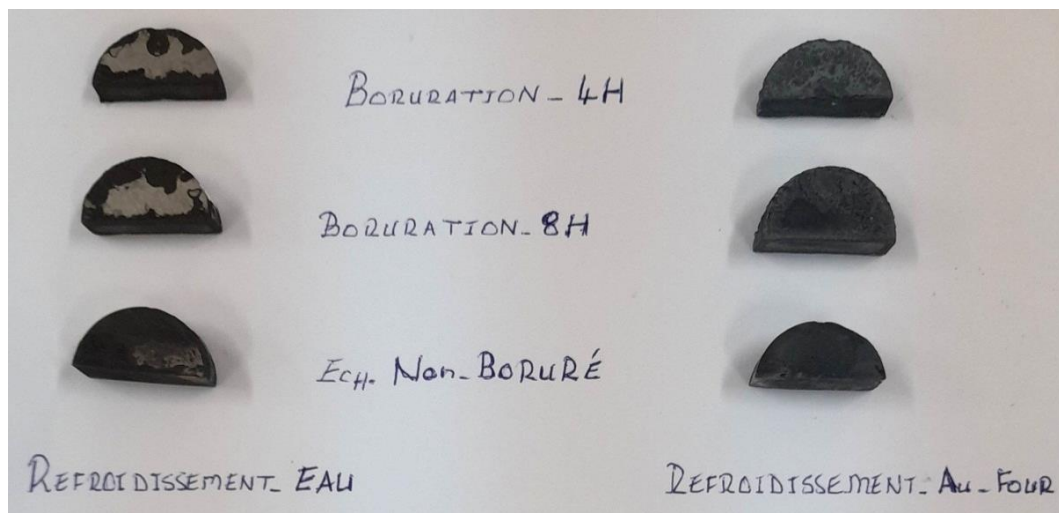


Figure III. 7 : Formation de couches d'oxyde (couleur grise) sur les échantillons borurés et refroidis à l'eau

III.2.4. Polissage des échantillons

Toutes les pièces ont été polies à l'aide de la polisseuse représentée sur la figure III.8, qui est un modèle de marque Struers Knuth-Rotor 3. Le polissage a été effectué en utilisant du papier abrasif en carbure de silicium avec deux granulométries différentes, 240 et 100.

L'opération de polissage vise à obtenir des surfaces lisses, propres et de haute qualité, en éliminant les défauts et en améliorant l'apparence et les propriétés fonctionnelles des échantillons avant la mesure de la dureté HRC.



Figure III. 8. Polisseuse à double disque

III.3. Résultats et discussions

III.3.1. Effets des traitements thermiques sur la dureté

Nous avons réalisé des essais de dureté Rockwell HRC sur les échantillons à l'état brut de coulée et borurés pendant 4 heures et 8 heures, traités et non traités au laboratoire des essais mécaniques d'ALFET de Tiaret. Ces essais étaient effectués à l'aide d'un duromètre du type HP250 (220 V / 50 HZ / 6 A) représenté sur la figure III.9. Il est doté d'un pénétrateur conique constitué par un diamant. Ce cône ayant un angle au sommet de 120° est arrondi à son sommet ($R = 0.2 \text{ mm}$). La charge d'essai est de 1500 N (150 kgf).

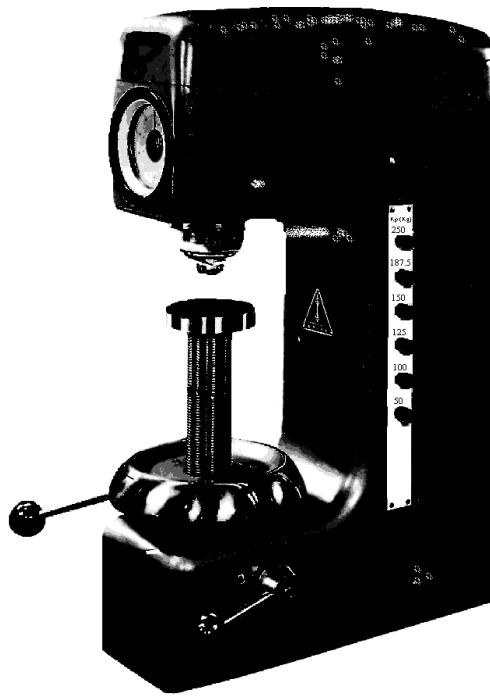
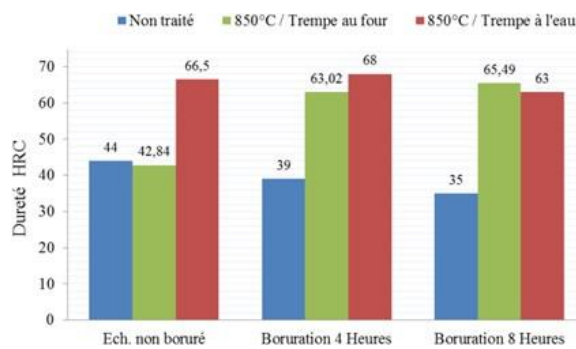


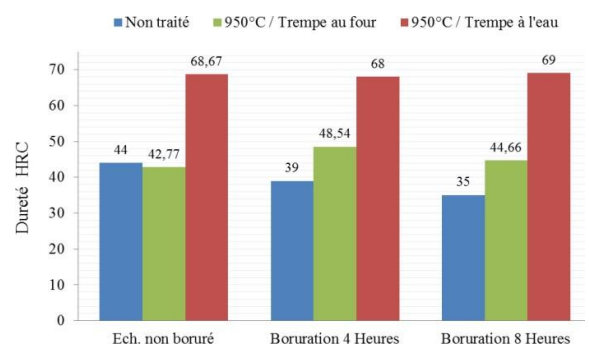
Figure III. 9: Duromètre pour mesurer la dureté HRC

III.3.1.1. Effet de la sévérité du milieu de trempe (vitesse de refroidissement)

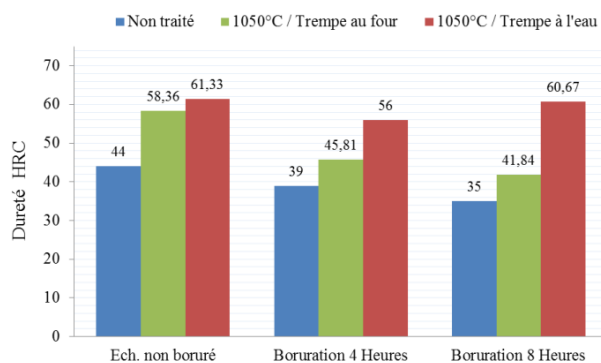
Les valeurs montrant l'effet de la vitesse de refroidissement sur la dureté HRC des échantillons non borurés (substrat à l'état brut de coulée) et borurés pendant 4 et 8 heures, ainsi que celles des échantillons non traités et traités thermiquement à 850°C, 950°C et 1050°C, sont présentées dans la figure III.10.



(a) Température d'austénisation = 850°C



(b) Température d'austénisation = 950°C



(c) Température d'austénisation = 1050°C

Figure III. 10: Effet de la vitesse de refroidissement sur la dureté HRC des échantillons non borurés et borurés pendant une durée de 4 et 8 Heures

Il est observé que la trempe à l'eau augmente significativement la dureté des échantillons non borurés ainsi que ceux borurés pendant 4 et 8 heures à différentes températures d'austénisation. Cela est probablement attribuable à la formation d'une matrice martensitique, réputée pour sa haute dureté et sa bonne résistance à l'usure.

Les échantillons soumis à un refroidissement au four présentent des duretés considérablement réduites, surtout pour les échantillons chauffés à 950°C et 1050°C, en raison des faibles vitesses de refroidissement qui favorisent la formation de structures ferritique ou bainitique. Ces structures, moins dures que la matrice martensitique, améliorent l'usinabilité des fontes blanches alliées au chrome et elles peuvent contenir une quantité significative d'austénite résiduelle.

Des températures comprises entre 950 et 1050°C sont assez élevées pour dissoudre les carbures de chrome et de bore dans la matrice de ferrite lors d'un refroidissement lent. Cela permet une précipitation progressive des carbures, qui peuvent devenir plus gros et plus espacés par rapport à un refroidissement rapide, réduisant ainsi la dureté globale du matériau.

La faible dureté observée à 950°C pourrait être le résultat d'une combinaison de facteurs liés à la microstructure de la matrice, à la taille des carbures et à la distribution des éléments d'alliage (chrome, bore), ainsi qu'à la vitesse de refroidissement.

Les échantillons non traités au bore chauffés à 850°C présentent une faible dureté (42,84 HRC) en raison de la formation d'une matrice ferritique dans laquelle des précipités de carbures de chrome sont dispersés. Bien que les carbures de chrome soient des composés durs, leur dispersion dans la matrice ferritique ne suffit pas à compenser la faible dureté intrinsèque de cette dernière.

Le chauffage à 850°C confère aux échantillons borurés pendant 4 et 8 heures des duretés élevées. Cela s'explique par la formation d'une matrice plus dure, de type bainite ou martensite, dans laquelle sont dispersés des carbures de chrome et de bore.

Le refroidissement rapide à l'eau permet de produire une structure martensitique très dure. En revanche, le refroidissement plus lent au four offre un meilleur contrôle des températures, ce qui réduit le risque de déformations et de fissures. Le choix du mode de refroidissement dépend des exigences spécifiques de l'application et des propriétés mécaniques recherchées.

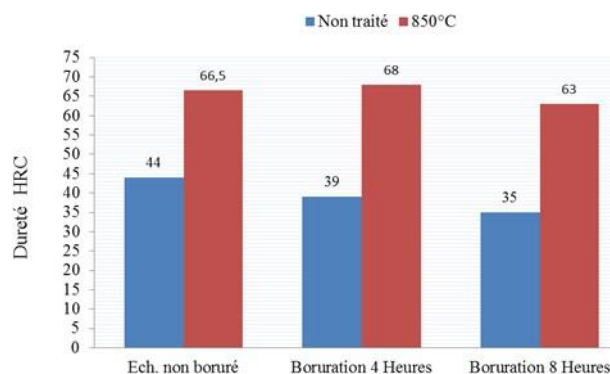
III.3.1.2. Effet de la température de trempe

Les résultats de dureté HRC obtenus pour les échantillons non borurés (substrat à l'état brut de coulée) et borurés pendant 4 et 8 heures non traités et chauffés à 850°C, 950°C et 1050°C sont illustrés sur la figure III.11.

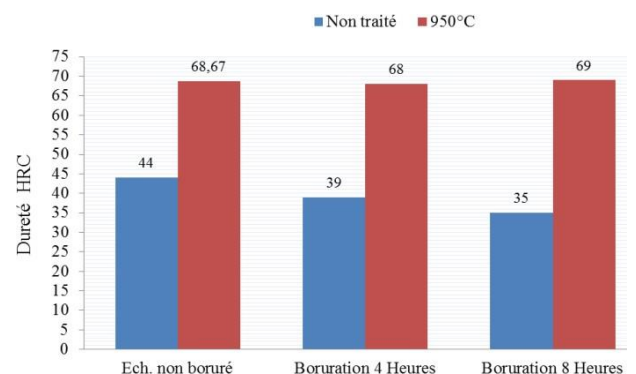
Une augmentation significative de la dureté HRC est observée pour les échantillons traités à 850°C, 950°C et 1050°C. Cependant, le traitement thermique à 1050°C (supérieur à 950°C) réduit légèrement la dureté HRC.

La hausse de la dureté HRC des échantillons non traités au bore est expliquée par la présence de carbures de chrome (Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6) qui sont des phases dures, dispersés dans une matrice martensitique également très dure.

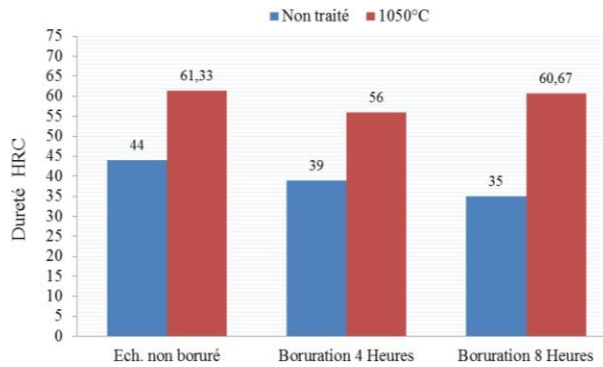
Un taux élevé de chrome favorise la création de composés tels que le CrB (Borures de chrome) ou le Cr_2B , qui augmentent la dureté des échantillons traités par boruration sur une période de 4 et 8 heures. L'ajout de bore dans une fonte favorise aussi la formation de carbures de bore (B_4C) qui sont extrêmement durs et résistants à l'usure.



(a) Température de trempe = 850°C
(refroidissement à l'eau)



(b) Température de trempe = 950°C
(refroidissement à l'eau)



(c) Température de trempe = 1050°C (refroidissement à l'eau)

Figure III. 11 : Effet de la température de trempe sur la dureté HRC des échantillons non borurés et borurés pendant une durée de 4 et 8 Heures

En examinant les données illustrées dans la figure III.12, il est confirmé que la dureté atteint son maximum à une température de trempe de 950°C, et cela se produit avec une vitesse de refroidissement dans l'eau plus rapide que celle obtenue lors du refroidissement au four.

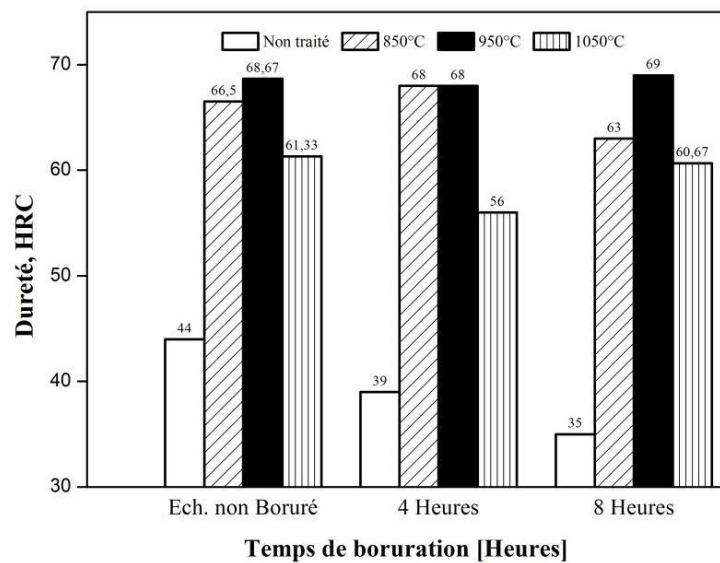


Figure III. 12: Comparaison des duretés HRC des échantillons non borurés et borurés pour différentes température de trempe et un refroidissement à l'eau

À l'issue de ces essais, nous confirmons que les traitements thermiques sont très bénéfiques pour augmenter la dureté et la résistance à l'usure des boulets.

III.3.2. Résultats des examens métallographiques

Les échantillons borurés examinés au microscope métallographique (optique), ont été préparés selon la technique suivante :

Les échantillons sont polis par passes successives sur une série de papiers abrasifs en carborundum (SiC) de grosseur de grains décroissante dont la granulométrie passait de 220 à 2500.

Le polissage consiste à rendre la surface d'examen brillante, et cela par élimination des raies laissées par les papiers abrasifs sur cette dernière en tournant les échantillons de 90° lors du passage d'un papier à l'autre. Le travail était fait manuellement sous lubrification continue.

Le polissage de finition (finissage) est la phase la plus longue et la plus délicate du polissage. Il s'effectuait sous un arrosage abondant d'alumine très fine, celle-ci étant déposée sur un drap.

L'attaque donne des différences de relief ou de coloration entre les différents constituants ou entre les cristaux différemment orientés d'une même phase ; ceci permet de les observer.

Les surfaces à attaquer ont été trempées dans du Nital composé d'acide nitrique (HNO_3) : 2 à 10% en volume dissous dans de l'éthanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) : 90 à 98% en volume, qui est le réactif courant utilisé pour examiner les fontes. L'attaque était effectuée à la température ambiante pendant quelques secondes et elle est terminée par un lavage à l'eau puis à l'alcool suivi d'un séchage rapide à l'air chaud.

Les examens métallographiques étaient réalisés sur un microscope métallographique du type Hand WETZLAR H600 AM (figure III.13) du laboratoire de génie physique de l'université de Tiaret avec prise de clichés photographiques. Nous avons utilisé un grossissement 10 X.



Figure III. 13. Microscope optique de type Hand WETZLAR

III.3.2.1. Refroidissement à l'eau

A) Température d'austénisation $T=850^{\circ}\text{C}$

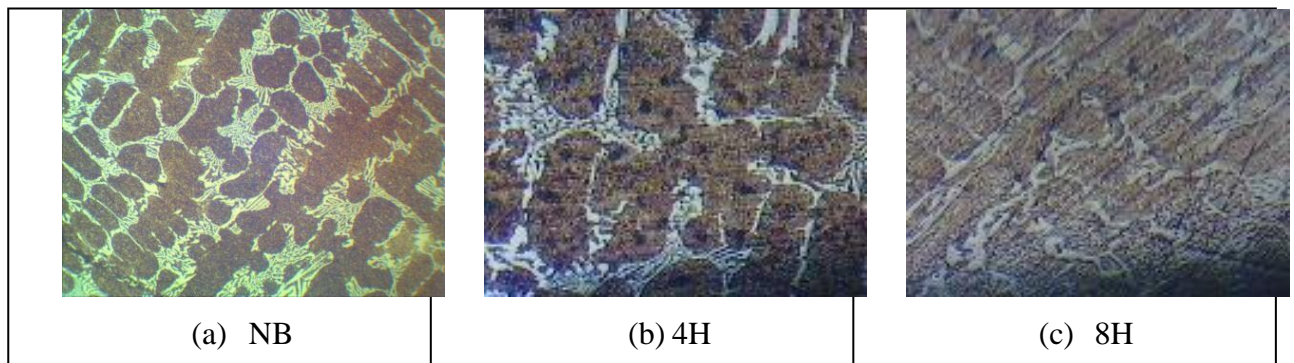


Figure III. 14 : Microstructure des échantillons chauffés à 850°C avec un refroidissement à l'eau

La figure III.14 montre la microstructure de la fonte à haute teneur en chrome, sans bore (a) et borurée pendant 4H (b) et 8H (c), chauffée à 850°C et refroidis à l'eau. Cette figure montre la présence d'une matrice martensite formée à partir de l'austénite suite au refroidissement rapide par trempe dans l'eau (zones sombres). La martensite est une phase dure et fragile.

La haute teneur en chrome entraînera la formation de carbures de chrome, qui apparaissent comme des zones blanches brillantes filamenteuses sur la figure III.14.

Une boruration pendant 4 Heures et 8 Heures peut former des carbures de bore, qui sont extrêmement durs et résistants à l'usure. Ces carbures apparaissent comme des particules blanches dispersées (figure III.14).

B) Température d'austénisation $T=950^{\circ}\text{C}$

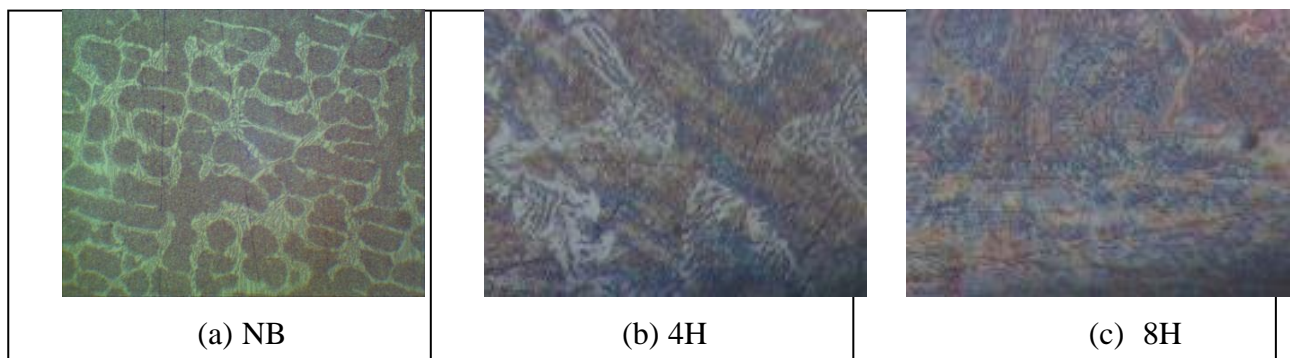


Figure III. 15: Microstructure des échantillons chauffés à 950°C avec un refroidissement à l'eau

Les photos métallographiques de la figure III.15 montreraient principalement une matrice sombre martensitique avec des phases claires représentant des carbures de chrome et des carbures de bore (68 à 69 HRC). La présence du bore dans la composition chimique améliore la trempabilité de la fonte en retardant la formation de la ferrite et de la perlite et favorisant la

formation de la martensite. Il permet d'augmenter la dureté globale du matériau et l'affinement des grains (surtout pour une boruration pendant 8 Heures).

C) Température d'austénisation $T=1050^{\circ}\text{C}$

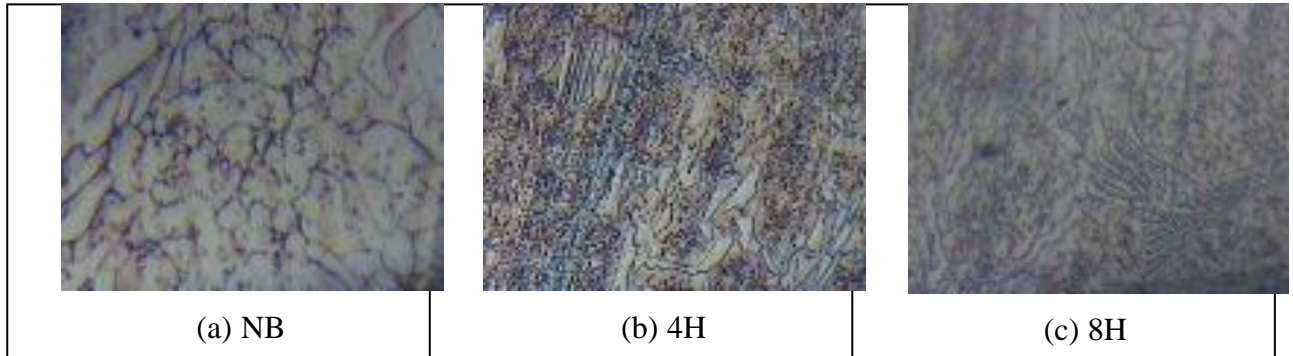


Figure III. 16 : Microstructure des échantillons chauffés à 1050°C avec un refroidissement à l'eau

En augmentant la température de chauffage à 1050°C (figure III.16) de nombreuses phases présentes à des températures plus basses (comme les carbures de chrome et de bore) peuvent se dissoudre dans l'austénite, augmentant la teneur en éléments d'alliage dissous. La trempe à partir de 1050°C entraînera la formation de martensite, qui sera la phase dominante. Cette martensite sera dure et peut contenir des éléments d'alliage dissous tels que le chrome et le bore et des carbures de chrome et de bore peuvent précipiter finement dans cette matrice.

Les figures III.14, III.15 et III.16 montrent principalement une matrice sombre martensitique avec des phases claires représentant des carbures de chrome et une présence limitée de carbures de bore dépendant de la durée de boruration. Cette microstructure améliorerait les propriétés mécaniques de la fonte, notamment la dureté et la résistance à l'usure.

Pour une analyse plus approfondie et détaillée, il serait idéal d'effectuer des tests complémentaires comme la microscopie électronique à balayage (MEB) et l'analyse par diffraction des rayons X (DRX).

III.3.2.2. Refroidissement au four

A) Température d'austénisation $T=850^{\circ}\text{C}$

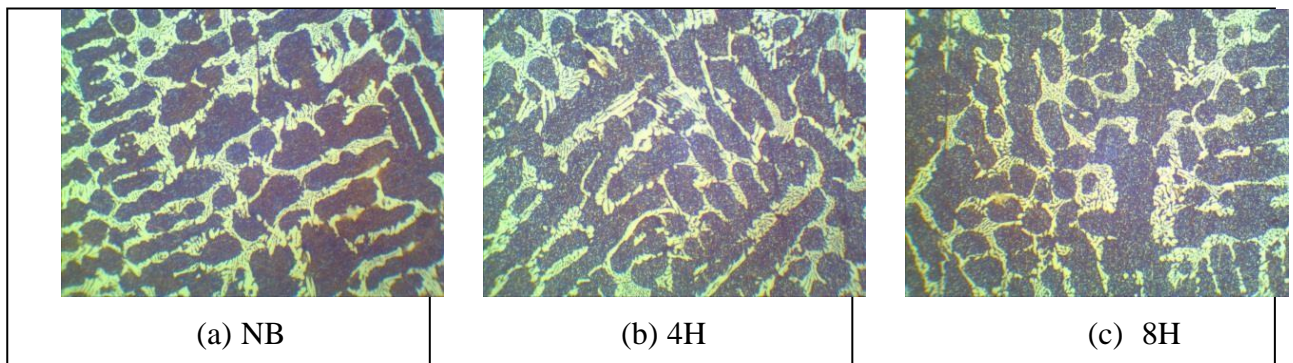


Figure III.17 : Microstructure des échantillons chauffés à 850°C avec un refroidissement au four

B) Température d'austénisation $T=950^{\circ}\text{C}$

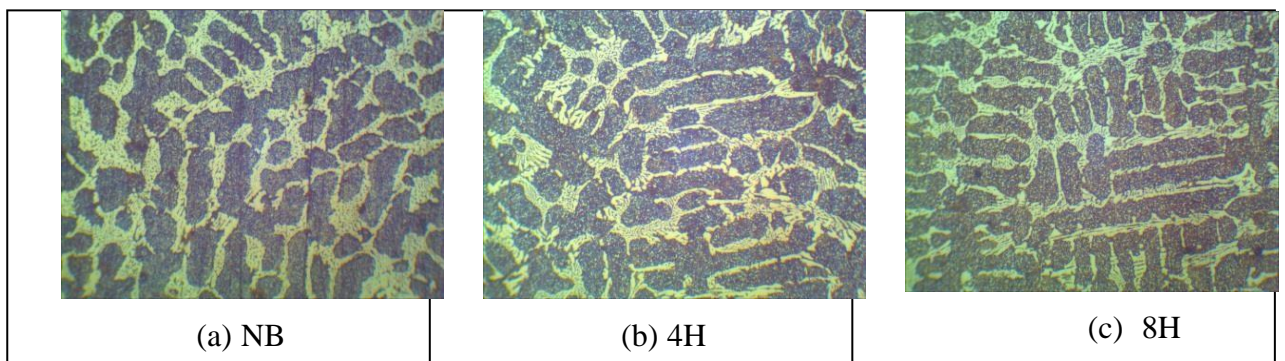


Figure III. 178 : Microstructure des échantillons chauffés à 950°C avec un refroidissement au four

C) Température d'austénisation $T=1050^{\circ}\text{C}$

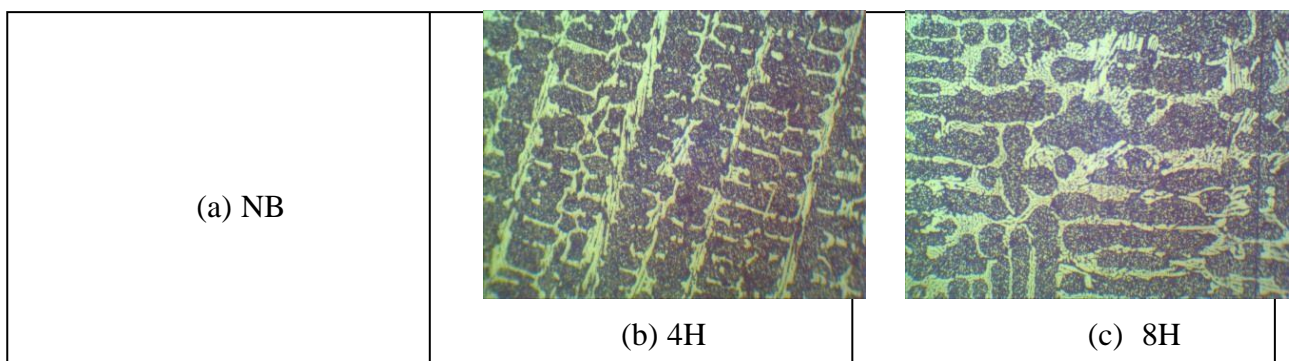


Figure III. 189 : Microstructure des échantillons chauffés à 1050°C avec un refroidissement au four

Le refroidissement lent au four favorise la formation d'une matrice plus douce (perlite, ferrite) que la matrice martensitique à des températures de chauffage de 850°C , 950°C et 1050°C (zones sombres, figures III.17, III.18 et III.19). À des températures plus élevées, telles que 950°C et 1050°C , les carbures présents sont plus gros, ce qui conduit à des niveaux de dureté modérés à

élevés et une résistance à l'usure adéquate (zones claires). À 850°C, les carbures de chrome et de bore se forment également, mais ils restent relativement fins et bien répartis dans la matrice, surtout dans le cas des échantillons borurés pendant 4 et 8 heures, ce qui contribue à augmenter la résistance à l'usure du matériau.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans cette étude, nous avons défini la fonte blanche à haute teneur en chrome, en soulignant ses applications industrielles, notamment dans des environnements exigeants où la dureté, la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion sont essentielles. Nous avons également exploré les traitements thermiques appliqués à cette fonte ainsi que les techniques de caractérisation mécaniques et microstructurales, incluant l'essai de dureté Rockwell (HRC), et des analyses microstructurales à l'aide du microscope optique.

Les essais de dureté Rockwell HRC ont révélé que les traitements thermiques et la durée de boruration influencent significativement la dureté des échantillons. Les échantillons borurés pendant 4 et 8 heures montrent une augmentation notable de la dureté par rapport à l'état brut de coulée, indiquant une amélioration de la résistance à l'usure. La trempe à l'eau des échantillons, borurés ou non, a entraîné une dureté élevée en raison de la formation de martensite, une structure réputée pour sa haute dureté et résistance à l'usure.

En revanche, les échantillons refroidis lentement au four ont montré des duretés réduites, particulièrement à des températures élevées (950°C et 1050°C), en raison de la formation de structures ferritiques ou bainitiques moins dures mais améliorant l'usinabilité. À des températures de traitement comprises entre 950°C et 1050°C, la dissolution des carbures de chrome et de bore dans la matrice ferritique, suivie d'une précipitation progressive lors du refroidissement, réduit également la dureté globale du matériau.

Les examens métallographiques ont montré que la boruration et la trempe à différentes températures influencent la microstructure, favorisant la formation de carbures de chrome et de bore, ce qui augmente la dureté et la résistance à l'usure des échantillons. Des tests supplémentaires tels que la microscopie électronique à balayage (MEB) et l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) pourraient fournir une analyse plus détaillée.

En conclusion, les traitements thermiques et la boruration améliorent les propriétés mécaniques des fontes blanches alliées au chrome, augmentant leur dureté et leur résistance à l'usure. Le choix du mode de refroidissement et des conditions de traitement doit être adapté aux exigences spécifiques de l'application pour optimiser les performances du matériau.

Perspectives

D'autres techniques expérimentales pourront être employées à l'avenir pour la caractérisation de nos échantillons, telles que :

- ✓ La microdureté HV,
- ✓ Le MEB avec EDS,

- ✓ La diffraction des rayons X,
- ✓ Les essais de corrosion.

Références Bibliographiques

- [1] P. Bastien, « Étude de la résistance à l'abrasion de boulets de broyage en fonte blanche alliée ». POUR OBTENTION DU DIPLOME DE MAITRISE EN INGENIERIE 1982
- [2] A. Kehal, « ELABORATION DE FONTES BLANCHES A HAUTE TENEUR EN CHROME ET ETUDE DE LEUR RESISTENCE A L'USURE. ».
- [3] « Introduction de base de la fonte à haute teneur en chrome - Connaissance ». 5 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.tg-machinery.com/info/basic-introduction-of-high-chromium-cast-iron-88125391.html>
- [4] H. Berns et W. Theisen, *Ferrous Materials: Steel and Cast Iron*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [5] « Revêtement en fonte blanche à haut chrome », Soluroc. Consulté le: 6 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://soluroc.com/abreco/>
- [6] A. Studnicki, R. Dojka, M. Dojka, et M. Kondracki, « Influence of Titanium on Crystallization and Wear Resistance of High Chromium Cast Iron », *Archives of Foundry Engineering*, vol. 16, mars 2016, doi: [10.1515/afe-2016-0014](https://doi.org/10.1515/afe-2016-0014).
- [7] M. Janssen' et M. B. van Leeuwen', « FRACTURE TOUGHNESS OF HIGH-CHROMIUM WHITE CAST IRON IN RELATION TO THE PRIMARY CARBIDE MORPHOLOGY ».
- [8] J. Kaleicheva, K. Kirov, V. P. Mishev, et Z. Karaguiozova, « MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH CHROMIUM WHITE CAST IRONS ALLOYED WITH BORON », *ENVIRONMENT. TECHNOLOGIES. RESOURCES. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, vol. 3, p. 137-141, juin 2021, doi: [10.17770/etr2021vol3.6656](https://doi.org/10.17770/etr2021vol3.6656).
<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=ES&NM=500>
- [9] Ameer Mansour Faïçal, Ammar Mokhtar « Caractérisation d'une fonte à haute teneur en chrome borurée » Mémoire de Master année 2023
- [10] S. Tomovic-Petrovic, S. Markovic, et S. Zec, « The effect of boron on the amount and type of carbides in chromium white irons », *J Serb Chem Soc*, vol. 67, n° 10, p. 697-707, 2002, doi: [10.2298/JSC0210697T](https://doi.org/10.2298/JSC0210697T).
- [11] W. Zhai *et al.*, « Recent Progress on Wear-Resistant Materials: Designs, Properties, and Applications », *Advanced Science*, vol. 8, p. 2003739, mars 2021, doi: [10.1002/adv.202003739](https://doi.org/10.1002/adv.202003739).
- [12] « High Chromium Cast Iron: Part Two : Total Materia Article ». Consulté le: 12 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=ES&NM=500>

- [13] D. A. Nofal, « Metallurgical Aspects of HIGH- ». Cairo Egypt
- [14] C. P. Tabrett et I. R. Sare, « Fracture toughness of high-chromium white irons: Influence of cast structure », *Journal of Materials Science*, vol. 35, n° 8, p. 2069-2077, avr. 2000, doi: [10.1023/A:1004755511214](https://doi.org/10.1023/A:1004755511214).
- [15] M. B. Mohamed, « Métallurgie : Cours et exercices corrigés ».
- [16] Marouf Abderraouf « Etude des fontes grises : Développement de la formation structurale – cas du graphite » Mémoire de Master, année : 2019/2020
- [17] M. Collignon, C. Anne Lise, Y. Desplanques, P. Dufrénoy, G. Regheere, et D. Balloy, « Modification de la morphologie du graphite pour l'amélioration de la durée de vie des disques de frein poids lourd », *MATEC Web of Conferences*, vol. 7, p. 01006, nov. 2013, doi: [10.1051/mateconf/20130701006](https://doi.org/10.1051/mateconf/20130701006).
- [18] « Revêtement en fonte blanche à haut chrome 5 », Soluroc. Consulté le: 6 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://soluroc.com/abreco/>
- [19] « Cast Iron - none - Cast Iron: History and Application Andrew Ruble Department of Materials - Studocu 19 ». Consulté le: 14 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-nove-de-julho/biomedicina/cast-iron-none/17785529>
- [20] P. Ortega Cubillos, P. Bernardini, M. Fredel, et R. Campos, « Wear resistance of high chromium white cast iron for coal grinding rolls », *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, vol. 2015, déc. 2015, doi: [10.17533/udea.redin.n76a16](https://doi.org/10.17533/udea.redin.n76a16).
- [21] « Vermicular Graphite Cast Iron : Total Materia Article ». Consulté le: 15 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=263>
- [22] P. Ortega Cubillos, P. Bernardini, M. Fredel, et R. Campos, « Wear resistance of high chromium white cast iron for coal grinding rolls », *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, vol. 2015, déc. 2015, doi: [10.17533/udea.redin.n76a16](https://doi.org/10.17533/udea.redin.n76a16).
- [23] M. Collignon, C. Anne Lise, Y. Desplanques, P. Dufrénoy, G. Regheere, et D. Balloy, « Modification de la morphologie du graphite pour l'amélioration de la durée de vie des disques de frein poids lourd », *MATEC Web of Conferences*, vol. 7, p. 01006, nov. 2013, doi: [10.1051/mateconf/20130701006](https://doi.org/10.1051/mateconf/20130701006).
- [24] B. Mohamed et B. Ali, « Dégradation par corrosion et protection des surfaces métalliques des boulets de broyage. ».

- [25] yahiouche, « Les fontes à graphite lamellaire et sphéroïdal », MetalBlog. Consulté le: 16 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://metalblog.ctif.com/2021/03/01/les-fontes-a-graphite-lamellaire-et-spheroidal/>
- [26] Massalski, T. B. (1990). Binary Alloy Phase Diagrams.
- [27] Okamoto, H. (2003). "Fe-B (Iron-Boron)" in Binary Alloy Phase Diagrams.
- [28] Articles universitaires correspondant aux termes holmquist, M., et al. (2002). Materials Science and Engineering: A, 333(1-2), 38-49 .
- [29] Articles universitaires correspondant aux termes Phase equilibria in the Fe-Cr system," Journal of Phase Equilibria and Diffusion, .
- [30] Articles universitaires correspondant aux termes 29 Saqib, M., & Papp, J. (2016). Materials Science and Engineering: A, 651, 44-50
- [31] Articles universitaires correspondant aux termes et al. (2010). Journal of Alloys and Compounds, 492(1-2)
- [32] Phase composition and properties of Fe-Cr-B alloys, 497(1-2), 64-71.
- [33] Articles universitaires correspondant aux termes "High temperature phase stability and microstructural evolution in Fe-Cr-B alloys
- [34] Articles universitaires correspondant aux termes . " Materials Science and Engineering: A, 528(3), 1241-1248.
- [35] Articles universitaires correspondant aux termes Kumar, A., et al. (2014). Materials & Design, 55, 1-7.
- [36] Articles universitaires correspondant aux termes Wang, J., et al. (2009).Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 96(3), 951-956.
- [37] journal of applied physics, 118(6), 063905.liu, y., et al. (2015).
- [38]. Birol, Y., et al. Materials Research 22.4 (2019): e20190014.
- [39].Study of the Structure and Properties of High-Chromium Cast Iron.
- [40]. Duan, H. L., et al. Journal of Iron and Steel Research International 22.10 (2015): 969-975.
- [41]. Grange, R. A., et al. "High-Chromium White Irons: Exceptional Abrasion and Corrosion Resistance." International Journal of Cast Metals Research 33.1 (2020): 1-9.
- [42]. ASM Handbook, Volume 13A: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. ASM International, 2003.
- [43] COUSTIL - Forge / Coutellerie / Bladesmithing 29 juin 2021 (Version 21.02)
- [44] Davis, J. R. (Ed.). (1996). Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics. ASM International.

- [45] Chandler, H. (Ed.). (1997). Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels. ASM International.
- [46] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley.
- [47] Totten, G. E., & Howes, M. A. H. (Eds.). (1997). Steel Heat Treatment Handbook. CRC Press
- [48] Bhadeshia, H. K. D. H., & Honeycombe, R. W. K. (2017). Steels: Microstructure and Properties. Butterworth-Heinemann.
- [49] ASM International. (1991). ASM Handbook, Volume 4: Heat Treating.
- [50] Davis, J. R. (Ed.). (2001). Alloying: Understanding the Basics. ASM International.
- [51] Totten, G. E., & Mackenzie, D. S. (2003). Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes. CRC Press.
- [52] Totten, G. E., & Mackenzie, D. S. (2003). Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes. CRC Press.
- [53] Recristallisation - Recuit/Normalisation - Traitement ...
- [54] Améliorer la stabilité dimensionnelle et la résistance aux ...
- [55] Traitement thermique d'un métal ;Wikipédia https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_thermique ..
- [56] Traitement thermique.pdf, Université Mohamed Khider Biskra
- [57] « Essai de dureté Vickers: ISO 6507, ASTM E384 II 2 », Essai de dureté Vickers: ISO 6507, ASTM E384. Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/metal/normes-metal/essai-vickers-iso-6507/>
- [58] F. Laurans, « Panorama des techniques microscopiques adaptées à l'imagerie descriptives des cellules de bois », 2016.
- [60] B. Mokhtar et O. Hamid, « Estimation de l'usure abrasive des boulets de broyage par un essai Los Angeles 51 ».
- [61] G02 Committee, « Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus 52 ». ASTM International. doi: [10.1520/G0065-04R10](https://doi.org/10.1520/G0065-04R10).
- [62] ASTM G99-17 - REDLINE ASTM G99-17 (iteh.ai)
- [63] B. Mokhtar et O. Hamid, « Estimation de l'usure abrasive des boulets de broyage par un essai Los Angeles 54 ».
- [64] chambre syndicale de la recherche et de production du pétrole et du gaz naturel , Edition Technip-RARIS,1981
- [65] Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel , Edition Technip - PARIS , 1981 .

- [66] Doolittle, L. R. (1985). *Corrosion Science*, 25(8-9), 735-746.
- [67] Goldstein, J., et al. (2017). *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Springer.
- [68] Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). *Elements of X-ray Diffraction*. Prentice Hall.
- [69] Frankel, G. S. (2008). *Journal of the Electrochemical Society*, 145(6), 2186-2198.
- [70] Pitting corrosion of metals: A review of the critical factors
- [71] BERNARD , A. MICHEL . J. PH ; LIBERT , J. TALBOT , « Métallurgie général » , 2eme édition , 1984 .
- [72] D. LANDOLT , « < Traité des matériaux » , volume 12 , Corrosion et chimie de surfaces des métaux presse polytechnique , CH - 1015 Lausanne , 1993 .
- [73] C. FUVELLE , « Introduction à la corrosion . Forme et prévention > , Centre technique des industries mécaniques , 1988 .
- [74] S. Gajghate, « Introduction to Microscopy », 8 novembre 2017. doi: [10.13140/RG.2.2.24105.49768](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24105.49768).
- [75] M. Bouabdellaoui, « Épitaxie, condensation et gravure des nanostructures Si/Si_{1-x}G_x pour des applications photoniques et microélectroniques. », 2018. doi: [10.13140/RG.2.2.33264.00008](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33264.00008)..
- [76] D. Van Labeke, « La microscopie optique à sonde locale », in *Optique instrumentale*, La Londe les Maures, France: EDP Sciences, 1997, p. 151-177. doi: [10.1051/sfo/1997002](https://doi.org/10.1051/sfo/1997002).
- [77] TP master 1 <https://www.unilim.fr/sermiel/wp-content/uploads/sites/5/2012/10/TP-Master-1.pdf>
- [78] F. Laurans, « Panorama des techniques microscopiques adaptées à l'imagerie descriptives des cellules de bois », 2016.

Résumé :

Dans cette étude, nous avons défini la fonte blanche à haute teneur en chrome et souligné ses applications industrielles, particulièrement dans les environnements exigeants nécessitant une haute dureté, une résistance à l'usure et à la corrosion. Nous avons exploré les effets des traitements thermiques et de la boruration sur la dureté des échantillons, ainsi que les techniques de caractérisation mécaniques et microstructurales telles que l'essai de dureté Rockwell, et les analyses microstructurales à l'aide de microscopie optique.

Les résultats ont montré que la boruration augmente significativement la dureté des échantillons par rapport à l'état brut de coulée. La trempe à l'eau a produit une dureté élevée grâce à la formation de martensite, tandis que le refroidissement au four a entraîné des duretés réduites en raison de la formation de structures ferritiques ou bainitiques. Les examens métallographiques ont confirmé que la boruration et les traitements thermiques favorisent la formation de carbures de chrome et de bore, améliorant ainsi la dureté et la résistance à l'usure.

En conclusion, les traitements thermiques et la boruration améliorent les propriétés mécaniques des fontes blanches alliées au chrome. Le choix du mode de refroidissement et des conditions de traitement doit être adapté aux exigences spécifiques de l'application pour optimiser les performances du matériau.

ملخص

في هذه الدراسة، تم تعريف الحديد الأبيض عالي الكروم وأبرز تطبيقاته الصناعية، خاصة في البيئات التي تتطلب صلابة عالية، مقاومة للتآكل، ومقاومة للاحتكاك. تم استكشاف تأثيرات المعالجات الحرارية والمعالجات الكيميائية على صلابة العينات، بالإضافة إلى تقنيات التوصيف الميكانيكية والميكروهيكلية مثل اختبار صلابة روكويل، والتحليلات الميكروهيكلية باستخدام المجهر الضوئي. أظهرت النتائج أن المعالجة الكيميائية تزيد بشكل كبير من صلابة العينات مقارنة بالحالة الصب. التبريد في الماء أنتج صلابة عالية نتيجة لتكوين المارتنسايت، في حين أن التبريد في الفرن أدى إلى صلابة منخفضة بسبب تكوين الهياكل الفريتية أو الباينيتية. أكدت الفحوصات الميكروهيكلية أن المعالجات الكيميائية والمعالجات الحرارية تعزز تكوين كربيدات الكروم والبور، مما يحسن من الصلابة ومقاومة التآكل. استنتجنا أن المعالجات الكيميائية والمعالجات الحرارية تحسن الخصائص الميكانيكية للحديد الأبيض عالي الكروم. يجب اختيار طريقة التبريد ودرجات المعالجة المناسبة لتتناسب مع متطلبات التطبيق لتحقيق أفضل أداء للمادة.

Abstract:

In this study, we defined high-chromium white cast iron and highlighted its industrial applications, particularly in demanding environments requiring high hardness, wear, and corrosion resistance. We explored the effects of heat treatments and boriding on the hardness of the samples, as well as mechanical and microstructural characterization techniques such as Rockwell hardness testing and microstructural analyses using optical microscopy. The results showed that boriding significantly increases the hardness of the samples compared to the as-cast state. Water quenching produced high hardness due to the formation of martensite, while furnace cooling resulted in reduced hardness due to the formation of ferritic or bainitic structures.

Metallographic examinations confirmed that boriding and heat treatments promote the formation of chromium and boron carbides, thereby improving hardness and wear resistance. In conclusion, heat treatments and boriding improve the mechanical properties of chromium-alloyed white cast irons. The choice of cooling method and treatment conditions must be tailored to the specific application requirements to optimize the material's performance.