

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



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Génie Mécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Construction Mécanique

### Thème

Caractérisation d'une fonte blanche à haute teneur en chrome borurée

Préparé par :

- Ameer Mansour Faïçal
- Ammar Mokhtar

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

Mr. HAMMOU Mahmoud	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
Mr. MADANI Ahmed	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mr. DEBBIH Snouci	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mr. AISSAT Sahraoui	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2022 – 2023

# *Remerciements*

Tout d'abord, nous tenons à remercier « ALLAH » qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Nous exprimons notre gratitude envers nos parents qui ont été présents pour nous tout au long de notre existence, et c'est grâce à leur soutien que nous avons atteint ce stade de notre parcours.

Nos vifs remerciements vont à Mr AISSAT S., notre promoteur pour son aide, ses critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité des orientations tout au long de ce travail et pour nous avoir apporté tant de soutien à la réalisation de ce travail.

Nous voulons remercier Mr. ALLAOUI O. Professeur à l'université de Laghouat qui nous a aidés pour l'élaboration et la caractérisation de nos échantillons et pour ces conseils et ces remarques.

Nos remerciements vont à Mr. BARKET M. R., Ingénieur de laboratoire au département de génie mécanique de l'université de Laghouat, qui nous a facilité le travail au sein du laboratoire.

Nous remercions également les membres du jury, Mr. Hammou M., Mr. Madani A. et Mr. Debbih S.

Nos remerciements vont aussi aux responsables, du laboratoire d'ALFET, du laboratoire de génie physique et du laboratoire synthèse et catalyse de l'université de Tiaret.

Nous tenons à remercier tous nos enseignants du département de génie mécanique pour leurs efforts et leurs persévérances à accomplir leur tâche.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui nous ont apporté encouragement et soutien tout au long de ce travail.

# *Nomenclature*

- Austénite :** Solution solide de carbone dans la forme  $\gamma$  du fer
- FeB :** Le borure de fer, qui se forme lorsque le fer réagit avec le bore dans des conditions appropriées.
- Fe<sub>2</sub>B :** Le borure de fer(II), également connu sous le nom de borure ferreux. Il se forme lorsque deux atomes de fer réagissent avec un atome de bore.
- EDX(EDS) :** Energy-dispersive X-ray spectroscopy.
- MEB :** Microscopie électronique à balayage.
- MO :** Microscope optique.
- Perlite :** Structure métallique en couches de deux phases, qui se compose de couches alternées de ferrite (87,5 % en poids) et de cémentite (12,5 % en poids).
- Martensite :** Une Phase Métastable Des Aciers, Issue De La Transformation Sans Diffusion De L'austénite  $\Gamma$  En Dessous D'une Température Martensitique.
- CrB :** Le borure de chrome, qui se forme lorsque le chrome réagit avec le bore dans des conditions appropriées.
- Cr<sub>2</sub>B :** Le borure de chrome(II), également connu sous le nom de borure dichromique.
- HCWCI :** High chromium white cast iron.
- HRC :** Dureté Rockwell(C) (Cône).
- HV<sub>0.1</sub> :** Microdureté HV (0.1 Kgf).
- HB :** Dureté Brinell.
- DRX :** Diffraction par rayon X.

# *Liste des figures*

<b>Figure I.1 :</b> Germination des phases de la fonte blanche à partir du liquide au cours refroidissement fonte hypo- et hyper eutectique .....	4
<b>Figure I.2 :</b> Microstructure des fontes blanches .....	5
<b>Figure I.3 :</b> Solidification d'une fonte grise hypo eutectique .....	8
<b>Figure I.4 :</b> Microstructure d'une fonte grise à graphite lamellaire .....	10
<b>Figure I.5 :</b> Micrographie de la fonte à graphite Sphéroïdal avec matrice ferritique.....	11
<b>Figure I.6 :</b> Observations des microstructures des fontes GS .....	11
<b>Figure I.7 :</b> Microstructures de la fonte à haute teneur en chrome dans la coulée .....	13
<b>Figure I.8 :</b> Microstructure de la microstructure de la matrice martensitique traitée.....	14
<b>Figure I.9 :</b> Evolution du volume de carbure en fonction de la teneur en carbone .....	15
<b>Figure I.10 :</b> Influence des éléments trempant sur la profondeur de trempé.....	16
<b>Figure I.11 :</b> Structure de fonte blanche au chrome-molybdène .....	17
<b>Figure I.12 :</b> Diagramme de phase fer-carbure de fer (Fe-Fe <sub>3</sub> C) .....	18
<b>Figure I.13 :</b> Effet de la ténacité sur la résistance à l'abrasion des matériaux .....	20
<b>Figure I. 14 :</b> Illustrations des composants moulés résistants à l'usure en alliages HCWCI...	21
<b>Figure I.15 :</b> d'autres applications pour Industrie sidérurgique.....	21
<b>Figure I.16 :</b> Composants de pompage de lisier constitués d'alliage HCWCI.....	22
<b>Figure II.1 :</b> Exemple de revêtements métalliques par voie humide.....	25
<b>Figure II.2 :</b> Immersion en bain fondu métaux fondus .....	26
<b>Figure II.3:(a)</b> Principe du PVD le métal évaporé est déposé de la cible vers le substrat .....	27
<b>Figure II.3 : (b)</b> Couche d'un métal déposée par PVD .....	28
<b>Figure II.4 :</b> Dépôt physique ou chimique en phase vapeur.....	29
<b>Figure II.5 :</b> Principe fondamental de la projection thermique .....	30
<b>Figure II.6 :</b> Schéma des éléments essentiels d'un laser .....	34
<b>Figure II.7 :</b> Exemples de polissage mécanique.....	35
<b>FigureII.8 :</b> Classification des traitements thermiques.....	36
<b>Figure II.9 :</b> Classification des traitements thermochimiques.....	37
<b>Figure II.10 :</b> Principe de diffusion à travers la surface dans les traitements thermochimique	
<b>Figure II.11 :</b> de diffusions associées aux traitements thermochimiques .....	38
<b>Figure II.12 :</b> Différentes morphologies des couches borurées .....	42

<b>Figure II.13</b> : Représentation schématique montrant la détermination de l'épaisseur moyenne des couches borurées .....	43
<b>Figure III.1</b> : Structure de la fonte blanche alliée au chrome (à l'état brut de coulée échantillon non boruré), (Attaque au nital, grossissement 10 X).....	48
<b>Figure III.2</b> : Tronçonneuse utilisée pour le découpage des échantillons Figure .....	49
<b>Figure III.3</b> : Echantillons destinés à la boruration.....	49
<b>Figure III.4</b> : Polisseuse à double disque .....	50
<b>Figure III.5</b> : Poudre de boruration .....	50
<b>Figure III.6</b> : Spectre DRX de la Poudre de boruration .....	51
<b>Figure III.7</b> : (a) Disposition des échantillons à l'intérieur du creuset (b) creuset préparé pour être introduits dans le four .....	52
<b>Figure III.8</b> : Four à moufle (Laboratoire de génie mécanique / Université de Laghouat) ....	52
<b>Figure III.9</b> : Echantillons enrobés pour les examens métallographiques (a) Non boruré, (b) Boruration pendant 8 heures, (c) Boruration pendant 4 heures .....	53
<b>Figure III.10</b> : Microscope optique de type Hand WETZLAR .....	54
<b>Figure III.11</b> : Microscope électronique à balayage .....	54
<b>Figure III.12</b> : Appareil de mesure de la microdureté.....	55
<b>Figure III.13</b> : Exemple typique d'une empreinte Vickers .....	55
<b>Figure III.14</b> : D'uroomètre pour mesurer la dureté HRC.....	56
<b>Figure III.15</b> : Echantillon boruré à 950°C, pendant une durée de 4 heures .....	56
<b>Figure III.16</b> : Echantillon boruré à 950°C, pendant une durée de 8 heures .....	58
<b>Figure III.17</b> : Echantillon boruré à 950°C pendant 4 heures (Photo MEB) .....	59
<b>Figure III.18</b> : Echantillon boruré à 950°C pendant 8 heures (Photo MEB).....	61
<b>Figure III.19</b> : (a) Boruration, 4 heures, (b) Spectre EDS, point 1, (c) Spectre EDS, point 2	61
<b>Figure III.20</b> : (a) Boruration, 8 heures, (b) Spectre EDS, point 1, (c) Spectre EDS, point 2	61
<b>Figure III.21</b> : Epaisseur des couches borurées ( $\mu\text{m}$ ) en fonction de la durée de boruration en heures.....	62
<b>Figure III.22</b> : Empreinte Vickers prélevée dans les différentes zones considérées.....	63
<b>Figure III.23</b> : Microdureté $\text{HV}_{0,1}$ dans le substrat et les zones borurées .....	64
<b>Figure III.24</b> : Dureté HRC de l'échantillon non boruré et des échantillons borurés pendant une durée de 4 et 8 Heures.....	65

# *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1:</b> Caractéristiques chimique et mécanique d'une fonte blanche.....	6
<b>Tableau I.2 :</b> Composition typique de la fonte blanche Ni-Hard.....	8
<b>Tableau I.3 :</b> Composition chimique d'une fonte grise lamellaire.....	9
<b>Tableau I.4 :</b> Composition chimique d'une fonte grise sphéroïdale.....	10
<b>Tableau I.5 :</b> Les propriétés mécaniques de la fonte.....	11
<b>Tableau I.6 :</b> Compositions chimiques des fontes blanches au chrome-molybdène.....	12
<b>Tableau I.7 :</b> Dureté Vickers des constituants de la microstructure des fontes blanches au chrome-molybdène.....	17
<b>Tableau II.1 :</b> Classification des procédés de traitements de surface.....	24
<b>Tableau II.2 :</b> Caractéristiques des principaux lasers de puissance.....	31
<b>Tableau II.3 :</b> Films de conversion chimique.....	32
<b>Tableau II.4 :</b> Principaux films de conversion électrochimique chimique.....	33
<b>Tableau II.5 :</b> Quelques compositions chimiques des sels fondus utilisés dans les procédés électrochimiques de boruration.....	40
<b>Tableau II.6 :</b> Compositions chimiques des mélanges et paramètres de boruration utilisés dans la technique des pâtes.....	41
<b>Tableau III.1 :</b> Composition chimique du substrat utilisé (fonte blanche au chrome).....	48
<b>Tableau III.2 :</b> Compositions des poudres utilisées et les conditions du traitement de boruration.....	51
<b>Tableau III.3 :</b> Epaisseur des couches borurées.....	62
<b>Tableau III.4 :</b> Résultats de la dureté HV <sub>0,1</sub> prélevés dans les différentes zones.....	64

# Sommaire

<i>Remerciements</i> .....	i
<i>Nomenclatures</i> .....	ii
<i>Listedes figures</i> .....	iii
<i>Listedes tableaux</i> .....	v

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## *Chapitre I : Synthèse bibliographique sur les fontes à haute teneur en chrome*

I.1. Classification des fontes .....	3
I.1.1. Fontes blanches .....	5
I.1.1.1. Fontes blanches alliées .....	6
I.1.1.2. Fontes blanche à haute teneur au chrome .....	7
I.1.2. Fontes grises .....	8
I.1.2.1. Fontes à graphite lamellaire .....	9
I.1.2.2. Fontes à graphite sphéroïdal .....	10
I.1.2.3. Fonte GV (Graphite Vermiculaire) ou fonte GC (graphite compact) .....	11
I.1.3. Diverses nuances de fontes blanches au chrome .....	12
I.2. Microstructure des fontes à haute teneur en chrome .....	12
I.2.1. Microstructures austénitiques et perlitiques brutes de coulée .....	13
I.2.2. Microstructures martensitiques brutes de coulée .....	14
I.2.3 - Microstructure des fontes à haute teneur en chrome après traitements thermiques .....	14
I.2.3.1. Les carbure .....	14
I.2.3.2. La matrice .....	15
I.3. Caractéristiques mécaniques des fontes à haute teneur en chrome .....	18
I.3.1. Résistance à l'usure abrasive .....	19
I.3.2. Dureté .....	19
I.3.3. Ténacité .....	19
I.3.4. Résistance à la corrosion .....	20
I.4. Domaines d'utilisation des fontes à haute teneur en chrome (HCWCI) .....	20
I.4.1. Industrie minière .....	20
I.4.2. Industrie sidérurgique .....	21
I.4.3. D'autres domaines d'utilisation .....	22

## *Chapitre II : Aperçu sur le traitement et les techniques de boruration*

II.1. Classification des procédés de traitements et de revêtements de surfaces .....	23
II.1.1. Revêtements métalliques .....	24

II.1.1.1. Procédés par voie humide .....	24
II.1.1.2. Procédés par voie sèche .....	26
II.1.2. Traitements de conversion .....	30
II.1.2.1. Conversions chimiques .....	30
II.1.2.2. Conversions électrochimiques .....	31
II.1.3. Traitements par transformation structurale .....	32
II.1.3.1. Traitements mécaniques.....	32
II.1.3.2. Traitements thermiques.....	33
II.1.3. Traitements par diffusion (ou Traitements Thermochimiques) .....	34
II.2. Techniques de boruration.....	38
II.2.1. Définition Boruration.....	38
II.2.2. Boruration en milieu gazeux .....	38
II.2.3. Boruration en milieu liquide .....	38
II.2.3.1. Boruration électrochimique dans des sels fondus.....	39
II.2.3.2. Boruration thermochimique dans des sels fondus .....	39
II.2.4. Boruration en milieu solide.....	40
II.2.4.1. Technique des pâtes .....	40
II.2.4.2. Technique des poudres.....	41
II.3. Nature des couches borurées (Aspects métallographiques des couches obtenues) .....	41
II.4. Mesure de l'épaisseur des couches borurées .....	42
II.5. Influence des éléments d'alliage sur la boruration .....	43
II.6. Matériaux traités par boruration.....	44
II.6.1. Les métaux ferreux .....	44
II.6.2. Les métaux non ferreux .....	44
II.6.3. Les cermets .....	45

### ***Chapitre III : Procédure expérimentale et caractérisation des couches borurées***

III.1. Procédure expérimentale .....	46
III.1.1. Composition chimique et structure du matériau de base (substrat).....	46
III.1.2. Préparation des échantillons pour la boruration .....	47
III.1.2.1. Découpage .....	47
III.1.2.2. Polissage des échantillons .....	47
III.1.2.3. Poudre utilisée pour la boruration (solide) .....	48
III.1.2.4. Procédure de boruration des échantillons.....	49
III.2. Techniques expérimentales.....	51
III.2.1. Examens métallographiques .....	51
III.2.2. Microscope métallographique .....	51
III.2.3. Microscope Electronique à Balayage .....	52



III.2.4. Mesure de l'épaisseur des couches borurées .....	53
III.2.5. Microdureté .....	53
III.2.6. Essais de dureté .....	54
III.3. Caractérisation des couches borurées .....	55
III.3.1. Résultats de l'analyse par le microscope optique .....	55
III.3.2. Résultats de l'analyse par le MEB .....	56
III.3.3. Mesure de l'épaisseur des couches borurées .....	60
III.3.4. Microdureté des couches borurées .....	61
III.3.5. Résultats de la dureté HRC des couches borurées .....	63
<b>Conclusion générale</b> .....	64
<b>Perspectives</b> .....	65
<b>Références Bibliographiques</b> .....	66
<b>Webographie</b> .....	70



***Introduction  
générale***

## **Introduction générale**

Les traitements thermochimiques sont des techniques utilisées pour modifier les propriétés des matériaux en les soumettant à des températures élevées en présence de produits chimiques spécifiques, appelés céments. Ces traitements permettent d'améliorer les caractéristiques des matériaux, tels que leur dureté, leur résistance à l'usure et leur résistance à la corrosion. Parmi les différents traitements thermochimiques, la boruration est une technique largement utilisée dans de nombreux domaines industriels, tels que l'automobile, l'aérospatiale, l'outillage et la fabrication de machines.

Elle consiste à exposer un matériau métallique, généralement un acier, à une atmosphère contenant du bore à des températures élevées. Le bore pénètre dans la surface du matériau, formant une couche solide de borures métalliques. Cette couche de borures augmente considérablement la dureté de la surface du matériau, offrant ainsi une meilleure résistance à l'usure, à la corrosion et à l'abrasion.

Le processus de boruration peut être réalisé de différentes manières, telles que la boruration en phase gazeuse, la boruration en phase liquide ou la boruration en phase solide. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients en termes de coût, de complexité et de performances obtenues.

Peu d'études se sont penchées sur la boruration des fontes blanches alliées, bien que la boruration soit couramment utilisée pour traiter des aciers, y compris les aciers au carbone, les aciers alliés et les aciers inoxydables, ainsi que les fontes grises. Pour cette raison le travail présenté s'intéresse spécifiquement à la boruration d'une fonte blanche alliée au chrome, utilisée pour la fabrication des boulets de broyage et dans le but d'améliorer la dureté, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et prolonger la durée de vie de ces boulets.

Le traitement de boruration a été effectué à une température stable de 950°C et pour des périodes de temps variables de 4 et 8 heures.

Afin d'analyser les caractéristiques, la constitution chimique, la structure, l'épaisseur et la qualité des couches de boruration obtenues dans cette étude, différentes méthodes ont été employées, incluant la microscopie optique (MO), la microscopie électronique à balayage (MEB) en conjonction avec la spectroscopie de dispersion d'énergie (EDX), ainsi que les tests de microdureté HV et les tests de dureté HRC.

Les résultats obtenus révèlent la présence d'une double couche de borures composée de FeB et Fe<sub>2</sub>B, dont l'épaisseur et la dureté variaient en fonction de la durée de boruration.

Le travail présenté est scindé en trois chapitres, une introduction générale, une conclusion générale et des perspectives visant à élargir les horizons de ce travail.

Le chapitre 1, intitulé "Synthèse bibliographique sur les fontes à haute teneur en chrome", propose une classification des fontes à haute teneur en chrome en examinant les diverses nuances existantes. Cette classification permet de comprendre les variations dans la composition chimique et les propriétés de ces fontes. La microstructure des fontes à haute teneur en chrome est également étudiée, en mettant l'accent sur les phases présentes et leur distribution. De plus, les caractéristiques mécaniques de ces fontes sont analysées, notamment leur résistance à la traction, leur dureté et leur ténacité. Enfin, les domaines d'utilisation des fontes à haute teneur en chrome sont discutés pour mettre en évidence leurs avantages et leurs applications dans divers secteurs industriels.

Dans le deuxième chapitre, nous fournirons un aperçu des techniques de traitement et de boruration utilisées pour améliorer les propriétés de surface des fontes à haute teneur en chrome. Nous exposerons une catégorisation des méthodes utilisées pour le traitement et le revêtement des surfaces, en mettant particulièrement l'accent sur celles qui sont adaptées aux fontes contenant une quantité élevée de chrome.

Ensuite, nous nous concentrerons sur les techniques spécifiques de boruration, en expliquant les principes de fonctionnement et les paramètres influençant le processus. De plus, nous discuterons de la nature des couches borurées formées, en examinant les aspects métallographiques et les propriétés des couches obtenues. Enfin, nous explorerons les matériaux compatibles avec la boruration, en mettant en évidence les avantages de ce traitement pour les fontes à haute teneur en chrome.

Le chapitre 3, intitulé "Procédure expérimentale et caractérisation des couches borurées", détaille la procédure expérimentale mise en place pour la réalisation des couches borurées sur la fonte à haute teneur en chrome. La composition chimique du substrat utilisé est examinée afin de comprendre son influence sur les résultats obtenus. Les échantillons sont découpés et numérotés pour faciliter les analyses ultérieures. La procédure de boruration est décrite en détails, en mettant en évidence les étapes clés. Les techniques expérimentales utilisées pour caractériser les couches borurées comprennent la mesure de l'épaisseur, la microdureté, la microscopie électronique à balayage et la diffraction des rayons X du ciment utilisé.

La conclusion générale rassemble les résultats obtenus et propose des perspectives futures afin de fournir de nouvelles orientations aux étudiants à venir pour poursuivre ce travail de recherche.

## ***CHAPITRE I***

***Synthèse bibliographique sur  
les fontes à haute teneur en  
chrome***

## **Introduction**

Les fontes blanches se distinguent par l'absence totale de graphite en raison de la présence excessive de carbone par rapport à sa solubilité maximale dans l'austénite. Le carbone se combine avec le fer sous forme de carbures métastables. Les carbures à base de fer présentent des propriétés physiques très différentes de celles du graphite, en particulier une dureté élevée qui contribue considérablement à la dureté de la fonte, représentant une fraction volumique significative.

Les fontes blanches, bien qu'elles soient dures, présentent malheureusement une certaine fragilité variable. Elles sont particulièrement adaptées pour résister à l'usure abrasive. Par conséquent, il est très difficile, voire impossible, de les usiner à l'aide d'outils de coupe conventionnels.

Les fontes blanches alliées au chrome sont largement utilisées dans des industries lourdes telles que les machines-outils, l'industrie chimique et pétrolière.

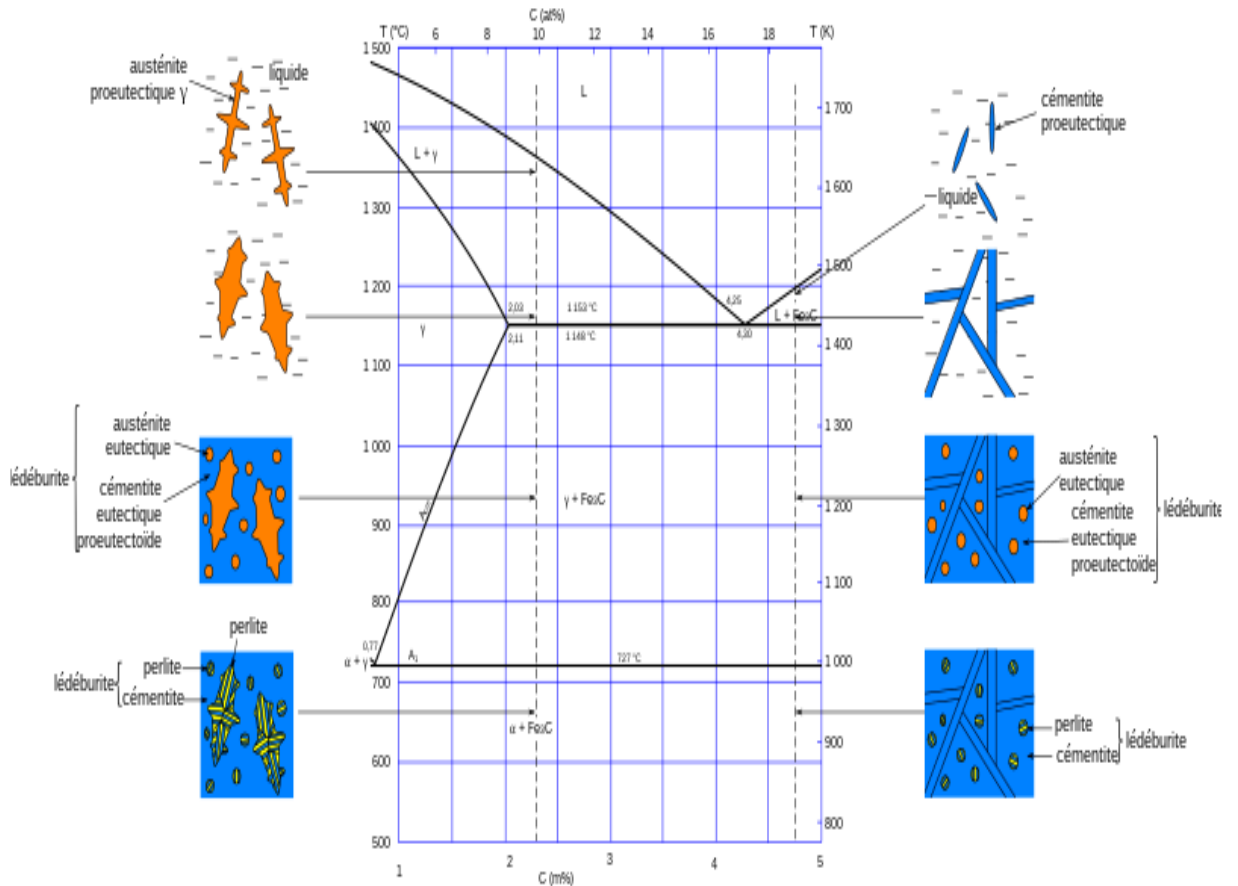
Nous allons voir dans ce chapitre une classification des fontes et en particulier les fontes blanches alliées au chrome et utilisés comme substrats dans ce travail. Leurs microstructures, Leurs propriétés, ainsi que leurs domaines d'utilisation sont considérées dans ce chapitre.

### **I.1. Classification des fontes**

Différentes classifications des fontes existent, mais la plus couramment utilisée se base sur le faciès de rupture d'un échantillon et distingue deux catégories principales. D'une part, les fontes blanches présentent une cassure de couleur blanche et sont composées de fer et de cémentite. D'autre part, les fontes grises ont une cassure de couleur grise et sont constituées de fer et de graphite. Les fontes sont des alliages qui se distinguent des autres par leur excellente fluidité lors de la coulée. Leur température de fusion varie généralement entre 1 135 °C et 1 350 °C, principalement en fonction des proportions de carbone et de silicium qu'elles contiennent. Pendant la fusion, la teneur maximale en carbone dépend de la température. Lors de la solidification, la quantité de carbone précipitant sous forme de graphite dans la matrice métallique dépend des autres éléments présents, en particulier le silicium, ainsi que des vitesses de refroidissement.

La fonte peut servir de matière première dans la production d'acier à partir de minerai de fer. Elle est obtenue à la sortie du haut fourneau et sera ensuite affinée en acier par un processus de décarburation. On la désigne alors sous le nom de "fonte brute" pour la distinguer de la "fonte de fonderie", qui est généralement obtenue par fusion au cubilot, possède une composition spécifique et est destinée à la production de pièces moulées [1].

Dans le cas d'une fonte blanche (sans graphite), la solidification et le refroidissement s'opèrent suivant le diagramme métastable : fer-cémentite. Les structures des fontes peuvent être décrites à partir de diagramme d'équilibre fer-carbone (figure I.1)



**Figure I.1.** Germination des phases de la fonte blanche à partir du liquide au cours du refroidissement ; fonte hypo- et hyper eutectique [2].

En plus du fer et du carbone, les fontes non alliées sont principalement composées de quatre autres éléments :

- Le silicium (1 à 3 %) (Si)
- Le manganèse (0,1 à 1 %) (Mn)
- Le soufre (jusqu'à 0,15 %) (S)
- Le phosphore (jusqu'à 1,3 %) (P)

Le silicium, en particulier, est un élément essentiel pour le fondeur car il permet de réguler le comportement métallurgique et la structure des fontes.

Toutes les fontes industrielles contiennent également, parfois intentionnellement ajoutés, des éléments présents à l'état de traces, qui peuvent être utiles, nocifs ou négligeables en fonction de la qualité recherchée.

De plus, les propriétés des fontes peuvent être améliorées ou ajustées pour des applications spécifiques grâce à l'ajout d'éléments d'alliage, qui présentent des similitudes profondes avec les aciers malgré la présence abondante de carbone. Les principaux éléments d'alliage utilisés sont :

- Le nickel (jusqu'à 35 %) (Ni)
- Le chrome (jusqu'à 30 %) (Cr)
- Le molybdène (jusqu'à 3 %) (Mo)
- Le cuivre, l'étain, le vanadium, l'aluminium, ... (Cu, Sn, Va, Al)

Ces mêmes éléments sont souvent présents à l'état de traces en tant qu'impuretés, parfois utiles, dans les fontes non alliées [3]

### I.1.1. Fontes blanches

Les fontes blanches sont ainsi désignées lorsque leur cassure présente une teinte très claire, avec un aspect métallique. Cette couleur claire indique l'absence totale de graphite à proximité de la zone de rupture. Les fontes blanches (figure I.2) sont composées de cémentite et de perlite, avec des proportions variables en fonction de la teneur en carbone. C'est la présence de cémentite qui confère aux fontes blanches leurs caractéristiques (tableaux I.1) essentielles, à savoir :

- Une très grande dureté, avec une valeur de dureté Brinell (HB) comprise entre 250 et 500.
- Une grande rigidité, mesurée par le module de Young qui se situe entre 160 et 200 GPa.
- Une fragilité prononcée.
- Une densité relativement élevée, variant de 7,5 à 7,8. En conséquence :
- Les fontes blanches sont très difficiles à usiner avec des outils coupants.
- Elles présentent une résistance élevée à l'usure par abrasion et par érosion [4,5].

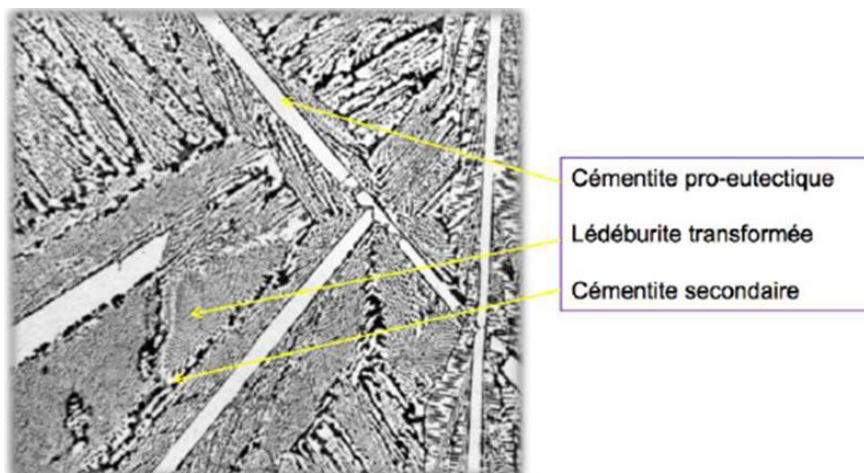


Figure I.2. Microstructure des fontes blanches [6].



%	Fonte blanche
Ct %	2.8 à3.6
Si %	0.5 à1.3
Mn %	0.4 à0.9
HB	300 à575
Rm(N/mm)	140 à350

**Tableau I.1.** Caractéristiques chimique et mécanique d'une fonte blanche [7].

### I.1.1.1. Fontes blanches alliées

Les fontes blanches alliées sont généralement classées en fonction de leur composition chimique et de leurs propriétés spécifiques. Voici quelques-unes des classes courantes de fontes blanches alliées :

1. **Fonte blanche alliée au chrome** : Ces fontes contiennent une teneur élevée en chrome, ce qui leur confère une excellente résistance à l'usure, à la corrosion et à l'abrasion. Elles sont souvent utilisées dans des applications telles que les broyeurs, les plaques d'usure, les cylindres de laminoir, etc.

2. **Fonte blanche alliée au nickel** : Les fontes blanches alliées au nickel sont connues pour leur résistance élevée à la corrosion et à l'oxydation, ainsi que pour leur bonne résistance à la chaleur. Elles sont utilisées dans des applications nécessitant une résistance à la corrosion, comme les valves, les pompes, les chemises de cylindres, etc.

3. **Fonte blanche alliée au molybdène** : Les fontes blanches alliées au molybdène offrent une combinaison de résistance à l'usure, de résistance à la corrosion et de résistance à la chaleur. Elles sont utilisées dans des applications telles que les marteaux de concasseur, les engrenages, les axes de rouleaux, etc.

4. **Fonte blanche alliée au vanadium** : Les fontes blanches alliées au vanadium ont une résistance à l'usure élevée et une bonne ténacité. Elles sont couramment utilisées dans les industries minières, les travaux publics et les applications nécessitant une résistance aux chocs, tels que les pièces d'excavatrices, les godets, 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.1.1.2. Fontes blanche à haute teneur au chrome

Les fontes blanches à haute teneur en chrome sont un type spécial de fonte blanche qui contient une quantité élevée de chrome dans sa composition chimique de 12 à 39%. Le chrome confère à ces fontes une excellente résistance à l'usure, à la corrosion et à la chaleur. Elles sont couramment utilisées dans des applications où une résistance supérieure à l'usure est essentielle.

Parmi les effets du chrome, c'est qu'il empêche la graphitisation et il est particulièrement efficace pour retarder le gonflement ainsi que l'oxydation aux températures élevées. Lorsque la teneur en carbone est inférieure à 1.5%, la plus part des fontes à haute teneur en chrome peuvent être usinées. Par contre lorsque la teneur en carbone est plus élevée, elles cessent d'être usinables et leur emploi se trouve limité aux pièces qui peuvent être utilisées sans usinage ou qui peuvent être usinées par rectification.

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

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

De ce fait, le choix de fonte blanche à forte teneur en chrome dépend du niveau de température de l'application considérée, de l'importance des contraintes auxquelles la pièce doit résister en cours de service, de la durée de vie exigée et du prix de revient [8].

### I.1.1.3. Fonte blanches spéciales

Par exemple, la fonte blanche martensitique Ni-Cr-HC (alliage nickel-chrome à haute teneur en carbone), ASTM A532 (tableau I.2) classe 1 type A, est de la fonte dans laquelle le nickel est le principal élément d'alliage car, à des niveaux de 3 à 5%, il est efficace pour supprimer la transformation de la matrice austénitique en perlite, garantissant ainsi qu'une structure martensitique dure se développera lors du refroidissement dans le moule. Ce matériau peut également être appelé Ni-Hard. Ni-Hard est un matériau résistant à l'abrasion utilisé dans les applications où l'impact est également un problème en tant que mécanisme d'usure [9]

Matériau	Balance	Carbone	Silicium	Chrome	Nickel	Manganèse
A532	86%	3.30%	<0.8%	2.5%	4%	<1.3%

Tableau I.2. Composition typique de la fonte blanche Ni-Hard [9]

La dureté Brinell de la fonte blanche martensitique (ASTM A532 Classe 1 Type A) est d'environ 600 MPa, son point de fusion est d'environ 1260 °C et sa conductivité thermique est de 15 à 30 (W/mK).

### I.1.2. Fontes grises

Les fontes grises sont ainsi désignées en raison de leur aspect gris caractéristique immédiatement après rupture [10]. La majeure partie du carbone présent dans ces fontes se trouve sous forme de graphite, qui est une phase de carbone pur. Le graphite présente une faible résistance mécanique, une faible densité et se fragmente en fines lamelles. La morphologie des grains de graphite permet de distinguer deux types principaux [5] :

- Les fontes grises à graphite lamellaire.
- Les fontes grises à graphite sphéroïdal

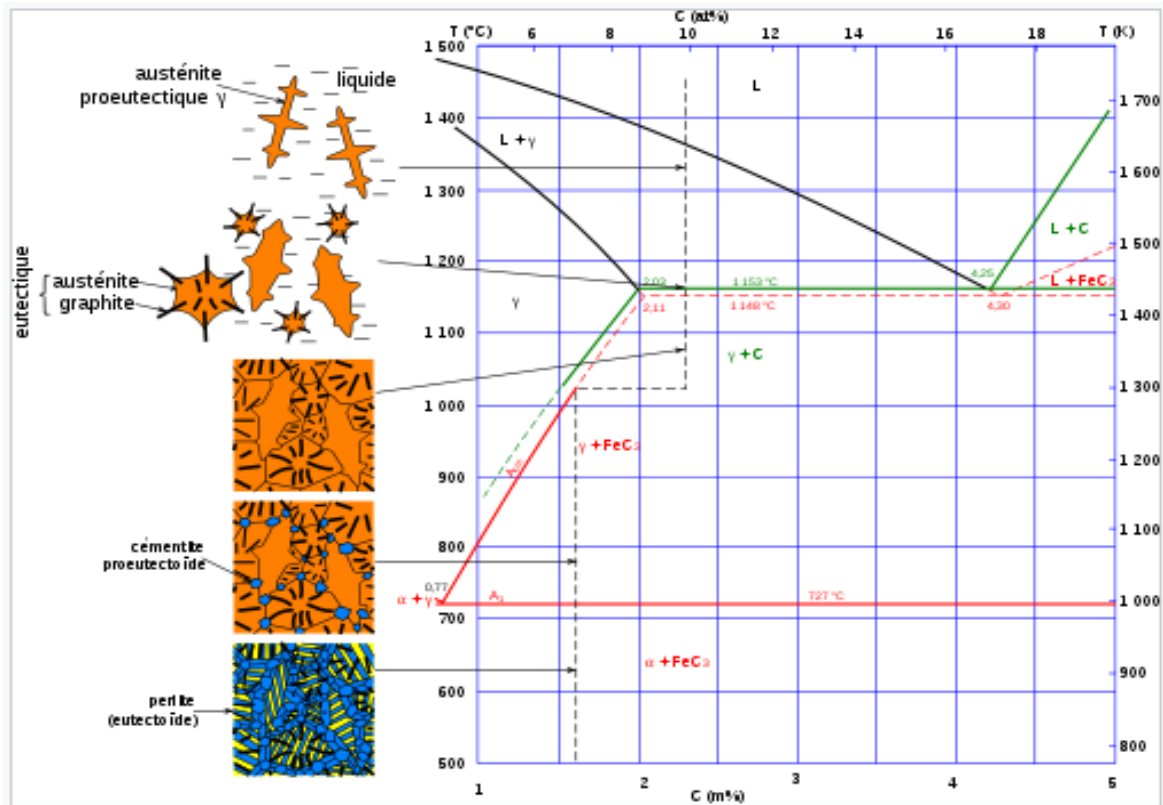


Figure I.3. Solidification d'une fonte grise hypoeutectique [11].

Prenons le cas de la solidification d'une fonte grise hypoeutectique (Figure I.3) .La solidification se fait d'abord sur le diagramme d'équilibre (trait vert) :

- germination et croissance de grains d'austénite dendritiques dans le liquide arrivé à 1 153 °C, germination et croissance de l'eutectique formé de graphite lamellaire et d'austénite à 2,03 % ;
- une fois la solidification finie, croissance des lamelles de graphite par appauvrissement en carbone de l'austénite.

À partir d'une certaine température dépendant de la vitesse de refroidissement et des éléments d'alliage, on passe sur le diagramme métastable (trait rouge) : les lamelles de graphite n'évoluent plus et restent telles quelles, et l'austénite se transforme comme un acier hypereutectoïde :

- germination et croissance de cémentite aux joints de grain de l'austénite
- à 727 °C, transformation de l'austénite en perlite (eutectoïde) [11].

### I.1.2.1. Fontes à graphite lamellaire

Il s'agit de la catégorie la plus courante parmi les fontes grises. Le (tableau I.3) présente la composition chimique moyenne des fontes grises à graphite lamellaire.

Elément	C	Si	Mn	S	P
Composition (%) poids	3.2 – 3.5	1.8 – 2.3	0.5	0.18	0.10

**Tableau I.3.** Composition chimique d'une fonte grise lamellaire [4,12]

Le graphite de morphologie lamellaire (figure I.4) dans ce cas, confère à ce type de fonte un certain nombre d'avantages dont les principaux se résument comme suit :

- Excellente usinabilité,
- Bonne résistance à l'usure,
- Capacité d'amortissement des vibrations



**Figure I.4 :** Microstructure d'une fonte grise à graphite lamellaire [13].

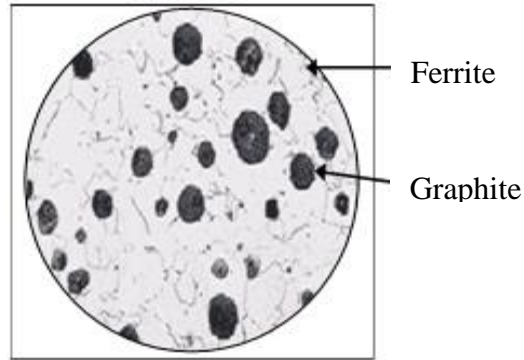
### I.1.2.2. Fontes à graphite sphéroïdal

Afin d'améliorer la résistance mécanique de la fonte grise, il est possible d'augmenter celle du métal de base en ajoutant des éléments d'addition tels que le nickel (Ni), le chrome (Cr) et le manganèse (Mn). De plus, il est également possible d'obtenir cette propriété en développant une structure de graphite sensiblement sphérique. La fonte à graphite sphéroïdal est obtenue en ajoutant du magnésium à la fonte liquide. La composition moyenne de cette catégorie de fonte est présentée dans le (tableau I.4) Dans ce cas, la morphologie du graphite, qui est de nature sphérique (figureI.5).

Eléments	C	Si	Mn	P
Composition(%poids)	3.2 -3.6	1.8 -3	0.3 – 0.4	0.05

**Tableau I.4.** Composition chimique d'une fonte grise sphéroïdale [4 ,12].

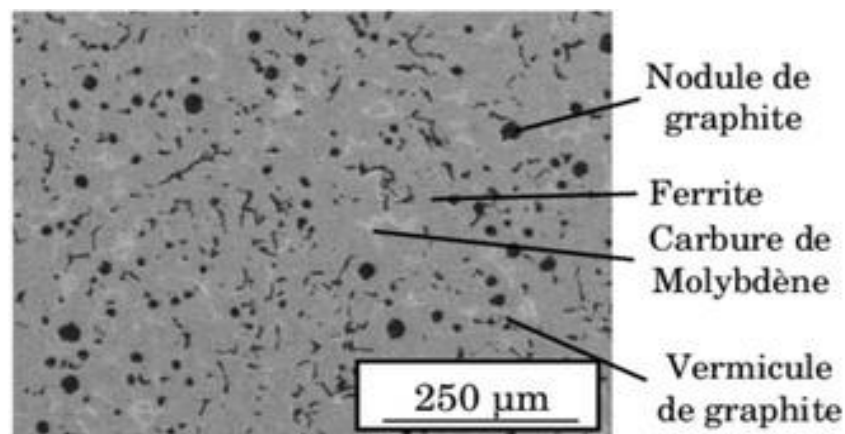
A l'état brut de coulée, la fonte grise à graphite sphéroïdal présente une structure perlitique, ferritique ou à cémentite libre. Elle est caractérisée par une résistance mécanique et une ductilité plus grande que celles des fontes grises.



**Figure I.5:** Micrographie de la fonte à graphite sphéroïdal avec une matrice ferritique [14]

### I.1.2.3. Fonte GV (Graphite Vermiculaire) ou fonte GC (graphite compact)

La fonte à graphite vermiculaire (figure I.6) tire son nom de la forme du graphite qu'elle contient. Dans ce cas précis, la microstructure de la fonte se situe entre celle de la fonte lamellaire et celle de la fonte sphéroïdale, à la fois au niveau de sa structure (tableau I.5) observée et de ses caractéristiques mécaniques [8].



**Figure I.6** Observations des microstructures des fontes GS [15]

Propriétés mécaniques	Fonte à graphite vermiculaire
Résistance Mécanique (Rm en MPa)	450
Module d'Elasticité (E en GPa)	145
Elongation (%)	1.5
Conductivité Thermique (W /mK)	37
Dureté (B H N 10/300)	217 - 241

**Tableau I.5 :** les propriétés mécaniques de la fonte GV[8].

### I.1.3. Diverses nuances de fontes blanches au chrome

Les fontes blanches au chrome - molybdène économiques, sont utilisées pour la fabrication de nombreuses pièces destinées à des applications exigeants une résistance à l'usure par abrasion élevée, comme par exemple, les blindages de forte épaisseur pour les broyeurs et les boulets de broyage.

Les compositions chimiques, telles qu'elles figurent dans la norme AFNOR NF A32-401 et ASTM A 532-75a, sont données a (tableau I.6.).

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

Tableau.I.6. Compositions chimiques des fontes blanches au chrome-molybdène [16]

### I.2. Microstructure des fontes à haute teneur en chrome

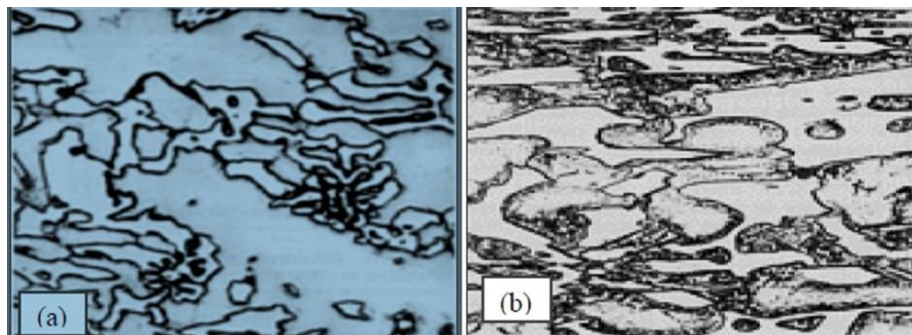
Les fontes blanches fortement alliées sont principalement utilisées pour des applications résistantes à l'abrasion et sont facilement coulées dans la forme requise dans les machines utilisées pour le concassage, le broyage et la manipulation générale des matériaux abrasifs. La présence de carbures eutectiques  $M_7C_3$  dans la microstructure offre une dureté élevée nécessaire pour les applications résistantes à l'abrasion. La matrice métallique supportant la phase carbure dans ces fontes peut être ajustée par la teneur en alliage et le traitement thermique pour développer le bon équilibre entre la résistance à l'abrasion et la ténacité. Toutes les fontes blanches fortement alliées contiennent du chrome pour empêcher la formation de graphite lors de la solidification, stabiliser les carbures et former des carbures de chrome plus durs que ceux du fer. La plupart d'entre elles contiennent également du nickel, du



molybdène, du cuivre ou des combinaisons de ces éléments d'alliage afin d'éviter la formation de perlite dans la microstructure [17,18]. Les fontes blanches au chrome-molybdène (classe II de la norme ASTM A532) contiennent de 11 à 23 % de Cr et jusqu'à 3 % de Mo et un peu de Ni et de Cu et peuvent être fournies ; soit brut de coulée avec une matrice austénitique ou austéno-martensitique, soit traité thermiquement avec une microstructure à matrice martensitique pour une résistance à l'abrasion et une ténacité maximales. Ces fontes offrent la meilleure combinaison de ténacité et de résistance à l'abrasion de tous les fontes blanches et sont utilisées dans les équipements miniers de roche dure, les pompes à boue, les broyeurs à charbon et les moules à briques [19].

### I.2.1. Microstructures austénitiques et perlitiques brutes de coulée

Les fontes blanches à haute teneur en Cr sont des alliages ferreux contenant du chrome entre 12 et 30 %. Il est bien documenté que la microstructure de tous les alliages hypoeutectiques des fontes blanches à haute teneur en Cr à l'état brut de coulée consiste en un réseau de carbures eutectiques  $M_7C_3$  dans une matrice de dendrites d'austénite ou de ses produits de transformation [20,21]. Le type, la quantité et la morphologie de ces carbures eutectiques contrôlent la résistance à l'usure et la ténacité [22]. Il existe quatre types de précipité de carbure de fer dans la fonte blanche fortement alliée en fonction des teneurs en carbone et en chrome [23,24];  $(Fe, C)_3C$ ,  $(Fe, Cr)_7C_3$ ,  $(Fe, Cr)_{23}C_6$  et  $(Fe, Cr)_3C_2$ . Autres éléments de formation de carbure, par exemple le molybdène, le vanadium et le manganèse sont solubles à la fois dans  $M_3C$  et  $M_7C_3$  et peuvent également donner naissance à d'autres carbures durs, par exemple  $M_2C$  et  $M_6C$  [19]. La (Figure I.7) montre la microstructure d'une fonte blanche alliée à haute teneur en Cr à l'état brut de coulée. Les structures matricielles peuvent être de la perlite, de l'austénite et de la martensite ou une combinaison de celles-ci [25]. La matrice des fontes blanches alliées à l'état brut de coulée est principalement de l'austénite [26,27].

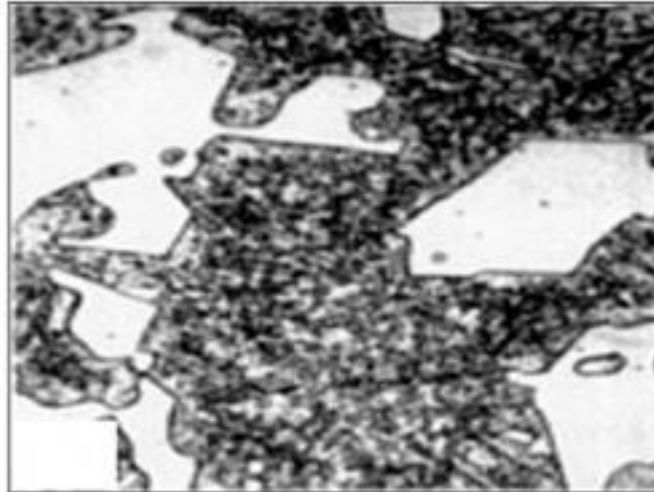


**Figure I.7.** Microstructures de la fonte à haute teneur en chrome dans la coulée ; (a) à microstructure à matrice austénitique, (b) à microstructure à matrice austénitique-martensitique. Les deux à 500X [25].



### I.2.2. Microstructures martensitiques brutes de coulée

Les structures martensitiques peuvent être obtenues en coulée, en particulier dans les pièces coulées à section lourde qui refroidissent lentement dans le moule. Avec des taux de refroidissement lents, la stabilisation de l'austénite est incomplète et une transformation partielle en martensite se produit. Toutefois, dans ces alliages, la martensite est mélangée à de grandes quantités d'austénite retenue, comme le montre la (figure. 1.8).



**Figure I.8.** Microstructure de la matrice martensitique brute de coulée [28]

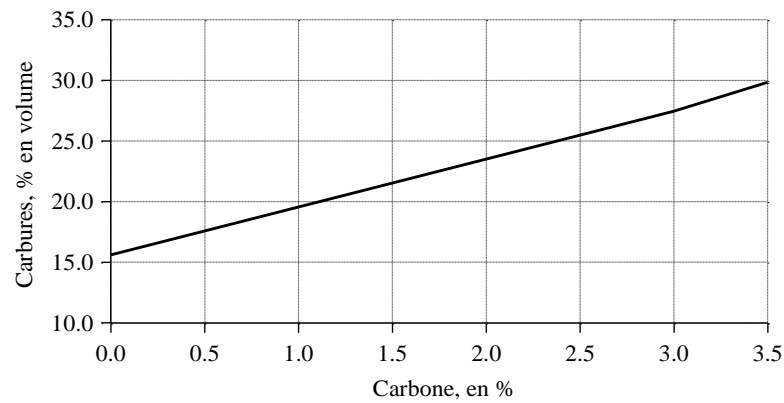
### I.2.3 - Microstructure des fontes à haute teneur en chrome après traitements thermiques

#### I.2.3.1. Les carbure

Les fontes blanches au chrome-molybdène s'identifient facilement par leur carbure primaire massif, dur et fragile du type  $M_7C_3$  ( $(Fe\ Cr)_7C_3$ ), soit en raison de la vitesse de refroidissement suffisamment rapide au cours de la solidification, soit par suite de la présence d'éléments stabilisant les carbures dans la composition (chrome). Ce composé est le constituant dominant de la microstructure de ce type de fontes, mais on trouve également un autre carbure de type  $Mo_2C$  (carbure de molybdène) au voisinage des carbures  $M_7C_3$ .

Le qualificatif de "massif" signifie que les grains de carbure  $M_7C_3$  sont relativement épais et l'adjectif "primaire" qualifie des carbures qui se sont formés lors de la solidification, directement à partir de la fonte liquide, et non au cours du refroidissement après solidification ou après traitement thermique.

Les carbures massifs réduisent l'usinabilité, mais augmentent la dureté et la résistance à l'usure nécessaire pour concasser ou broyer les autres matériaux. Leur volume est en fonction de la teneur en carbone, comme le montre le graphique ci-après, pour un alliage à 12% de chrome.



**Figure I.9** : Evolution du volume de carbure en fonction de la teneur en carbone

Les carbures  $M_7C_3$  sont extrêmement stables, et leur composition ne subit aucune modification lors d'un maintien entre  $1000^{\circ}\text{C}$  et  $1050^{\circ}\text{C}$ . À ces températures, les carbures  $M_7C_3$  ont tendance à coalescer sans changer leur composition, ce qui entraîne une réduction des hétérogénéités dans la structure. Lorsqu'ils sont soumis à un traitement entre  $1050^{\circ}\text{C}$  et  $1150^{\circ}\text{C}$ , les carbures primaires et eutectiques subissent une dissolution partielle. Au-delà de cette plage de température, la dissolution des carbures primaires et eutectiques devient plus prononcée (Figure I.9).

La vitesse de dissolution des carbures ne semble pas être liée à la composition chimique, mais plutôt à la finesse et au pourcentage de carbures présents à l'état brut de coulée. Plus la quantité de carbures à l'état brut de coulée est élevée, plus la quantité de carbures dissous est importante.

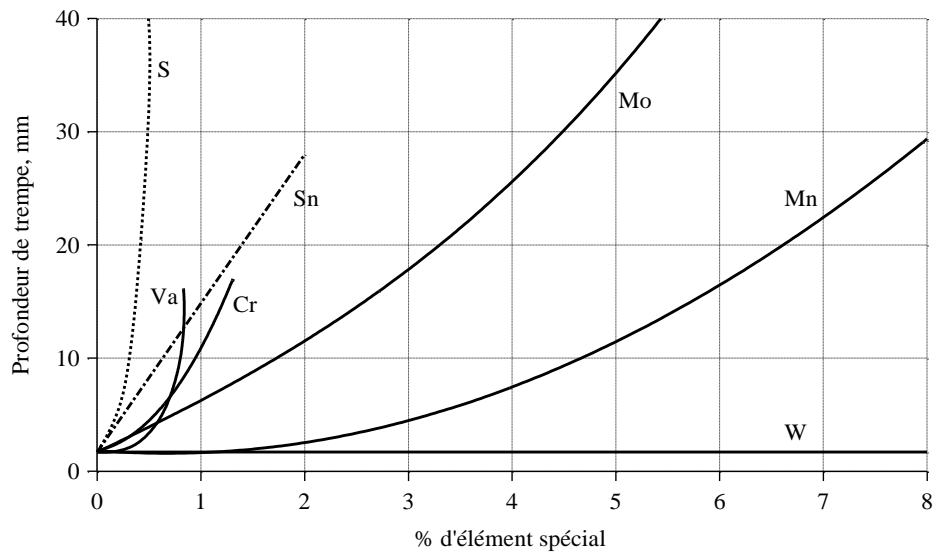
Le carbure de molybdène  $\text{Mo}_2\text{C}$  présente une apparence différente. Dans les alliages contenant une faible proportion de carbures de molybdène, il se présente sous la forme de fins globules à proximité des carbures  $M_7C_3$ . En revanche, dans les alliages industriels, il se présente sous la forme d'un eutectique. Le carbure de molybdène est très stable et n'est pas modifié lors des traitements thermiques.

### **I.2.3.2. La matrice**

La microstructure de base des fontes blanches au chrome-molybdène est généralement constituée d'austénite. Cette austénite est stable à température ambiante en raison de sa teneur élevée en carbone. La composition et les traitements thermiques peuvent être ajustés pour obtenir un compromis économique entre la résistance à l'usure et la résilience nécessaire pour résister aux chocs mécaniques répétés.

Le chrome joue un rôle essentiel en empêchant la formation de graphite et en assurant la stabilité des carbures dans la microstructure. Le molybdène est également efficace pour prévenir la transformation de l'austénite en perlite lors du refroidissement dans le moule ou lors du traitement thermique, même à des teneurs élevées en carbone. Il améliore la trempabilité de la matrice, en particulier lorsque la teneur en carbone est élevée.

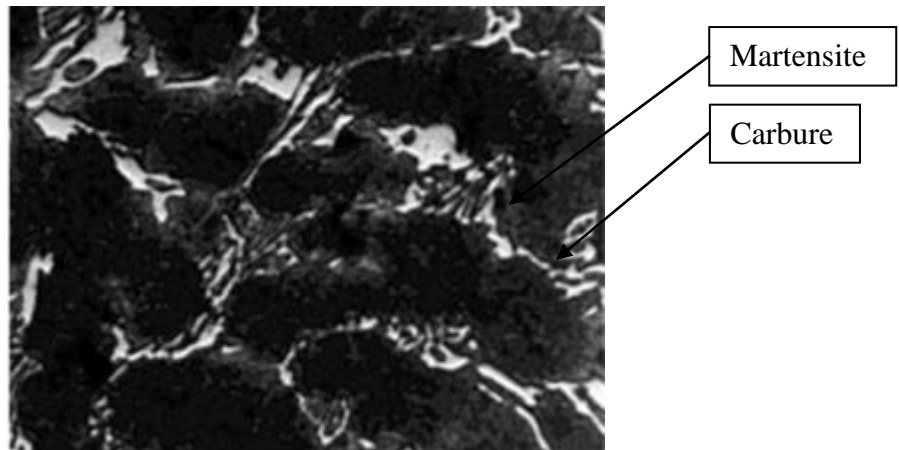
La (figure I.10) présente une comparaison des éléments d'alliage qui améliorent la profondeur de trempé, c'est-à-dire leur capacité à assurer une trempabilité plus importante dans la microstructure [16].



**Figure.I.10.**Influence des éléments trempant sur la profondeur de trempé [16].

Les pièces fabriquées à partir de fontes blanches au chrome-molybdène peuvent être utilisées à l'état brut de coulée, avec une matrice majoritairement austénitique. Cependant, il est recommandé d'effectuer un traitement de détente à une température comprise entre 200 et 260°C. Ce traitement permet d'améliorer la résistance aux chocs sans compromettre la dureté ou la résistance à l'usure.

Pour augmenter davantage la résistance aux chocs et à l'usure des fontes blanches au chrome-molybdène, un traitement thermique peut être réalisé pour transformer l'austénite en martensite voir (Figure I.11). Ce résultat est obtenu en utilisant une température élevée pour déstabiliser l'austénite sursaturée. Ce traitement de déstabilisation favorise la précipitation des carbures  $M_7C_3$  dans l'austénite. Ainsi, la trempabilité de l'austénite est améliorée en réduisant sa teneur en carbone, ce qui élargit la plage de transformation en martensite[16].



**Figure .I.11.**Structure de fonte blanche au chrome-molybdène [29]

Pour obtenir une résistance à l'usure maximale, les pièces doivent être refroidies le plus rapidement possible (trempées dans un liquide) à partir de la température de déstabilisation. Cependant, pour les pièces de forte épaisseur ou celles présentant des variations d'épaisseur, il est recommandé de limiter la vitesse de refroidissement rapide en utilisant de l'air calme ou de l'air pulsé (soufflé) afin d'éviter les contraintes résiduelles indésirables et les déformations. Après ce traitement, il est recommandé d'effectuer un traitement de détente pour améliorer la résistance aux chocs des pièces.

Le (tableau I.7) suivant présente la dureté des différents constituants de la microstructure des fontes au chrome-molybdène.

//	Constituants	Dureté Vickers HV 50
Carbures	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>M_7C_3</math></li> <li>• <math>Mo_2C</math></li> </ul>	1200-1800 1500
Matrice	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perlite</li> <li>• Austénite</li> <li>• Martensite</li> </ul>	300-460 300-600 500-1000

**Tableau.I.7.**Dureté Vickers des constituants de la microstructure des fontes blanches au chrome-molybdène [16]

### I.3. Caractéristiques mécaniques des fontes à haute teneur en chrome

Dans l'ingénierie des matériaux, en règle générale, les fontes contiennent de 2,14 % en poids à 4,0 % en poids de carbone et de 0,5 % en poids à 3 % en poids de silicium. Les fontes peuvent profiter de la solidification eutectique dans le système binaire fer-carbone. Le point eutectique représente la composition sur le diagramme de phase où la température de fusion la plus basse

est atteinte. Pour le système fer-carbone, le point eutectique produit à une composition de 4,26 % en poids C et à une température de 1148 °C (figure I.12).

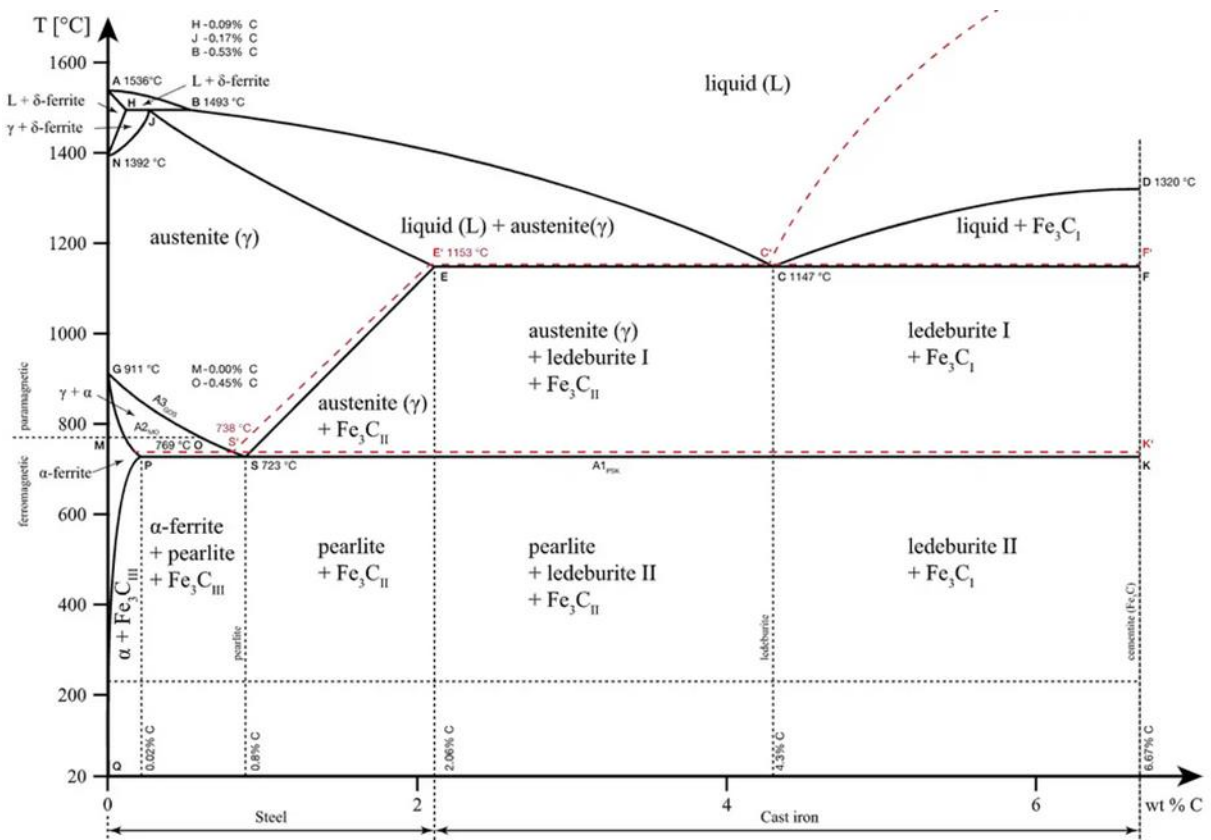


Figure I.12. Le diagramme de phase fer-carbone de fer (Fe-Fe<sub>3</sub>C) [9].

Le pourcentage de carbone présent et la température définissent la phase de l'alliage fer-carbone et donc ses caractéristiques physiques et ses propriétés mécaniques. Le pourcentage de carbone détermine le type d'alliage ferreux : fer, acier ou fonte.

Les caractéristiques mécaniques de ces fontes dépendent de plusieurs facteurs, tels que la teneur en chrome, la teneur en carbone, le traitement thermique et les conditions d'utilisation.

Voici quelques-unes des caractéristiques mécaniques courantes des fontes à haute teneur en chrome :

### **I.3.1. Résistance à l'usure abrasive**

Les fontes à haute teneur en chrome sont souvent utilisées dans des applications où une résistance à l'usure est importante, telles que les pièces de machines et les outils de coupe.

### **I.3.2. Dureté**

Les fontes à haute teneur en chrome ont une dureté élevée, qui peut être améliorée par un traitement thermique et qui leur confère une bonne résistance à l'usure.

L'hypothèse selon laquelle la dureté des matériaux métalliques était directement proportionnelle à leur résistance à l'usure a été vérifiée pour les métaux purs et les aciers recuits, en mesurant la perte de masse d'une pointe de matériau appliquée à un papier abrasif [30]. Cependant, pour les matériaux plus complexes tels que les fontes alliées et les aciers de compositions chimiques complexes, la relation entre dureté et usure peut être plus complexe, car la dureté est une moyenne des duretés des différentes phases de la microstructure et ne tient pas compte des mécanismes qui ont lieu à cette échelle [30].

### **I.3.3. Ténacité**

La ténacité des fontes à haute teneur en chrome peut varier en fonction de la composition et des traitements thermiques. Certaines fontes au chrome sont spécifiquement conçues pour offrir une combinaison optimale de résistance et de ténacité, ce qui les rend adaptées aux applications soumises à des contraintes élevées.

La ténacité est un paramètre essentiel pour réguler la gravité d'une abrasion combinée à des impacts plus ou moins importants en réduisant la tendance des matériaux à se détériorer prématurément par écaillage et par rupture. C'est notamment le cas pour les corps broyants des ciments et des minerais.

Ainsi, il est important de trouver un compromis entre la dureté et la ténacité lors du choix et de la mise au point d'un matériau, afin de garantir un rapport optimal de résistance à l'abrasion et de ténacité nécessaire à la fonction de la pièce. (figure I.13) illustre l'effet de ces deux paramètres contraires, montrant que la ténacité a un impact important pour les matériaux fragiles.

1. Si la charge appliquée sur un matériau ne dépasse pas un certain seuil de propagation des fissures, la dureté du matériau est le principal facteur déterminant sa résistance à l'abrasion, indépendamment de sa ténacité.
2. Si la charge appliquée dépasse ce seuil critique, il est préférable d'avoir un matériau plus tenace pour éviter la fragmentation, même si cela implique une diminution de sa dureté.

3. Si l'usure s'intensifie en raison d'une charge accrue, de l'utilisation de particules plus grosses ou plus angulaires, ou d'autres facteurs similaires, une ténacité plus élevée sera nécessaire pour maintenir la résistance à l'abrasion du matériau à un niveau optimal.

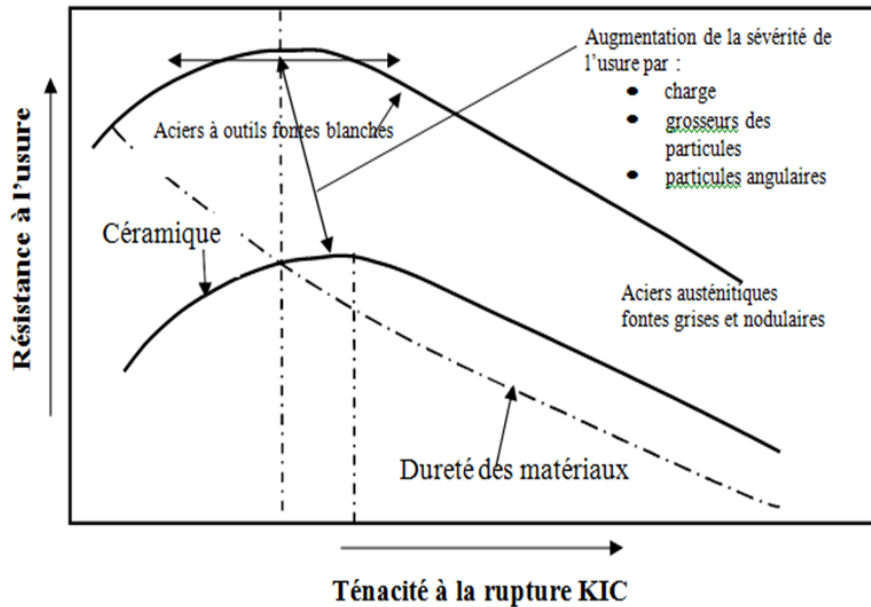


Figure I.13. Effet de la ténacité sur la résistance à l'abrasion des matériaux [31].

#### I.3.4. Résistance à la corrosion

Le chrome confère une excellente résistance à la corrosion aux fontes. Cela les rend adaptées à une large gamme d'applications, notamment dans les environnements agressifs où la corrosion est un problème majeur.

### I.4. Domaines d'utilisation des fontes à haute teneur en chrome (HCWCI)

#### I.4.1. Industrie minière

Depuis une cinquantaine d'année, les fontes blanches au chrome sont utilisées pour la coulée des corps broyeur destinés pour l'industrie minière. Cette industrie doit en effet disposer d'un matériau sûr, car les arrêts de production dus aux incidents de casse des boulets ou leur usure prématurée sont généralement plus graves que les pannes mécaniques et ont des conséquences économiques importantes.

La résistance exceptionnelle à l'usure de HCWCI est principalement due à la fraction de haute densité de Cr riche en carbure, bien que la ténacité de la matrice contribue également à la résistance à l'usure [32]. Ces alliages (HCWCI) sont largement utilisés pour les composants qui manipulent, traitent mécaniquement des agrégats et des matières premières (figure I.14) [33].



Ces composants comprennent les concasseurs de minerais (a) et (b), les rouleaux (c), les doublures de broyeur à boulets (d) e) et de l'équipement de pulvérisation (f) [5].

Les fontes blanches sont également utilisées pour d'autres applications (figure I.14) tel que :

- Palette d'usure pour machine de dessablage des pièces de fonderie.
- Pièce d'usure pour l'industrie de brique de construction.
- Cylindres de laminoir pour l'industrie métallurgique.
- Turbine pour le transport des boues [34].

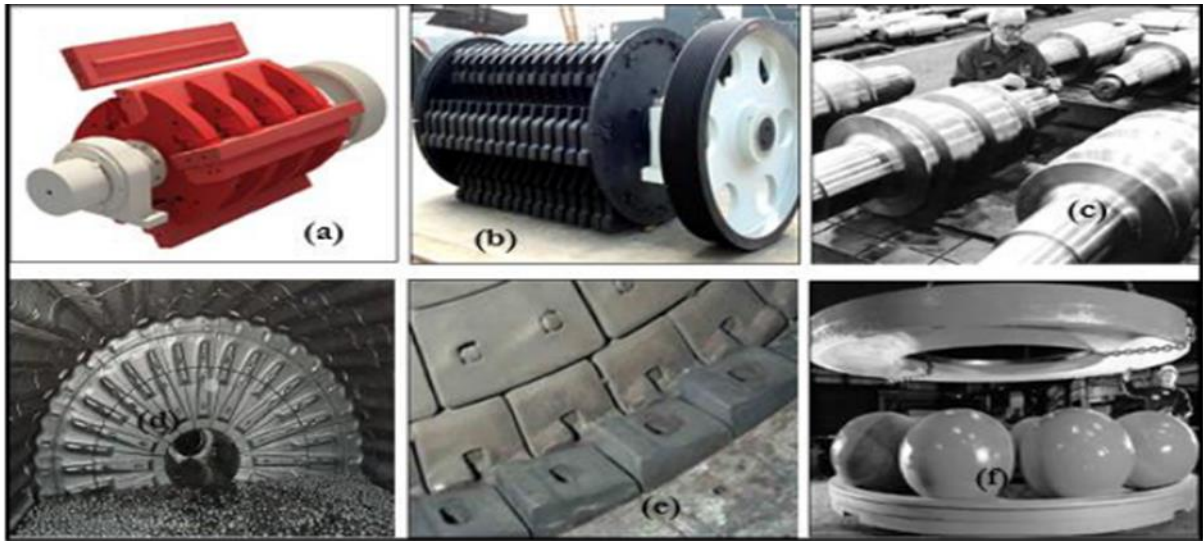


Figure I.14. Illustrations des composants moulés résistants à l'usure en alliages HCWCI [35]

#### I.4.2. Industrie sidérurgique

Les fontes blanches sont également utilisées pour d'autres applications (figure I.15) tel que :

- Palette d'usure pour machine de dessablage des pièces de fonderie.
- Cylindres de laminoir pour l'industrie métallurgique.
- Turbine pour le transport des boues.

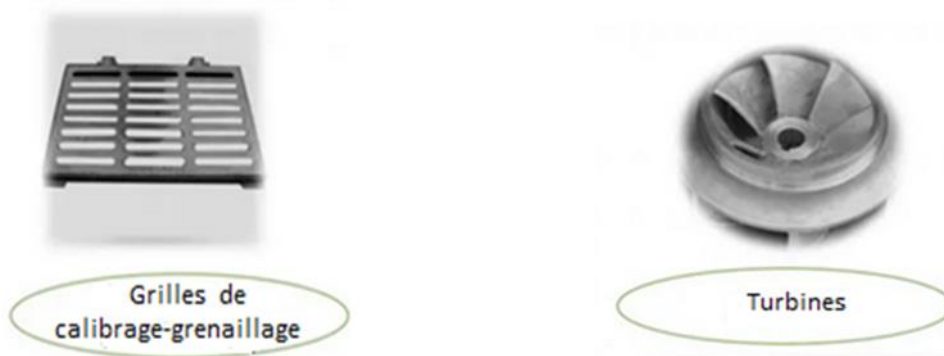


Figure I.15. d'autres applications pour l'industrie sidérurgique [35]



Dans les applications d'usure humide où une résistance combinée à l'abrasion et à la corrosion est nécessaire, dans les procédés d'extraction, par exemple les pièces de pompage des boues (figure I.16)



**Figure I.16.** Composants de pompage de lisier constitués d'alliages HCWCI [35]

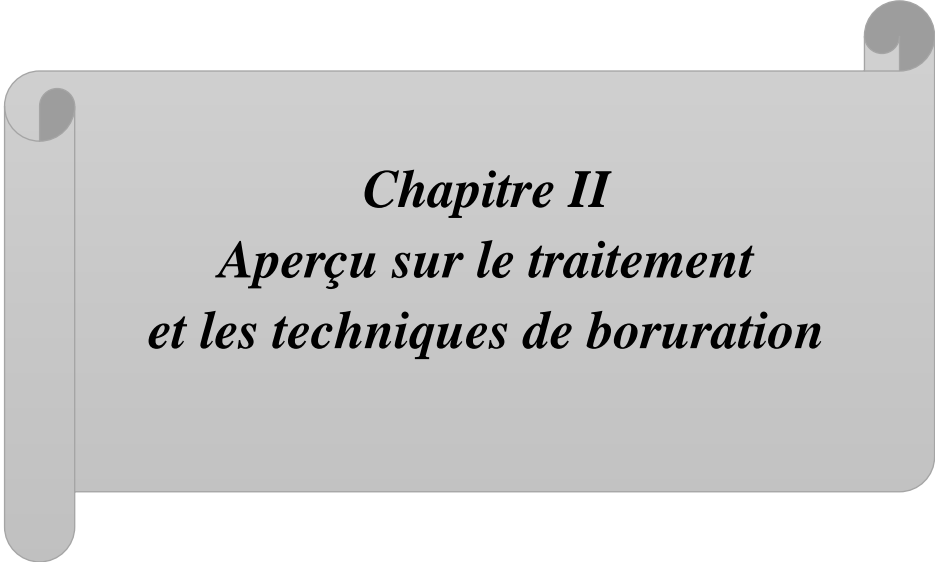
#### **I.4.3. D'autres domaines d'utilisation**

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

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

*B. Industrie chimique* : fabrication de vannes, de pompes, de tuyaux et d'autres équipements utilisés dans les procédés chimiques. Elles offrent une résistance élevée aux produits chimiques corrosifs, aux acides et aux bases, ce qui les rend adaptées à ces applications.

*C. Industrie de l'automobile* : Les fontes à haute teneur en chrome sont utilisées pour fabriquer des pièces automobiles soumises à des contraintes élevées, telles que les vilebrequins, les arbres à cames et les pistons. Leur résistance à l'usure et à la chaleur en fait un choix populaire dans cette industrie [1].



***Chapitre II***  
***Aperçu sur le traitement***  
***et les techniques de boruration***

## II.1. Classification des procédés de traitements et de revêtements de surfaces

Les traitements de surface, qu'ils consistent en un dépôt de revêtement ou une modification de la surface, ont pour objectif d'adapter les propriétés de celle-ci afin de répondre à une ou plusieurs fonctionnalités requises selon les spécifications techniques. Ces fonctionnalités comprennent notamment :

- Résistance aux sollicitations mécaniques telles que le frottement, l'usure, l'érosion, l'abrasion, les chocs, la fatigue mécanique et thermique, etc.
- Résistance aux sollicitations chimiques telles que la corrosion, l'oxydation, le ternissement, l'altération de l'aspect, etc.
- Adéquation pour l'assemblage par collage.
- Caractéristiques optiques telles que le pouvoir réflecteur, la couleur, l'aspect, particulièrement pour des applications architecturales.
- Propriétés physiques de surface telles que la conductibilité électrique ou l'isolation thermique (barrières thermiques) [36].

Ces revêtements et traitements de surface sont classés en différentes familles en fonction de leur type, du milieu utilisé et du procédé employé. Ce chapitre présentera ces différentes familles de revêtements et traitements de surface.

En effet, il existe divers procédés de revêtement et de traitement de surface (RTS). Pour simplifier leur classification, nous nous référerons au (tableau II.1) qui propose une classification succincte.

Revêtement métallique	Dépôt par voie humide	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dépôt électrolytique</li> <li>✓ Dépôt chimique</li> <li>✓ Immersion en métal Fondu</li> </ul>
	Dépôt par voie sèche	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Projection thermique</li> <li>✓ Phase vapeur</li> <li>✓ Faisceau énergétique</li> <li>✓ Rechargement Métallique</li> </ul>
Traitement de conversion	Electrolytique	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Anodisation</li> <li>✓ Sulfuration</li> </ul>
	Chimique	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Phosphatation</li> <li>✓ Chromatation</li> </ul>
Traitement thermochimique de diffusion	Diffusion d'éléments non métalliques	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cémentation</li> <li>✓ <b>Boruration</b></li> <li>✓ Nitration</li> <li>✓ Carbonitruration</li> </ul>
	Diffusion d'éléments métalliques	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Chromisation</li> <li>✓ Aluminisation</li> </ul>
	Voie mécanique	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Grenailage, galetage</li> </ul>

**Tableau II.1.** Classification des procédés de traitements de surface [37]

## II.1.1. Revêtements métalliques

### II.1.1.1. Procédés par voie humide

#### *Dépôts électrolytiques*

Représentant plus de 25% du chiffre d'affaires total des revêtements et traitements de surface (hors peintures). Ce procédé permet d'appliquer un revêtement sur n'importe quelle surface conductrice à partir d'une solution électrolytique contenant des ions du métal à déposer.

Les dépôts électrolytiques offrent la possibilité d'obtenir des caractéristiques spécifiques telles que l'adhérence, la pureté, la brillance, le nivellement, les contraintes contrôlées, la dureté, la finesse des grains, le taux de porosité, le rendement, etc.

De nombreux métaux peuvent être déposés par ce procédé, tels que le cadmium, le chrome, le cuivre, le nickel, l'étain, le zinc et les métaux nobles.

Le procédé électrolytique permet également des revêtements localisés (par tampon) pour les pièces de grande taille ou le rechargement des pièces usées. L'utilisation de dispositifs de circulation forcée (à débit élevé d'électrolyte) ou de courant pulsé permet d'augmenter considérablement la vitesse de dépôt et parfois la qualité du revêtement.

Il convient de noter que des variations d'épaisseur peuvent résulter d'une répartition irrégulière des lignes de courant dans le bain, posant parfois des difficultés pour les corps creux, par exemple (figure II.1)

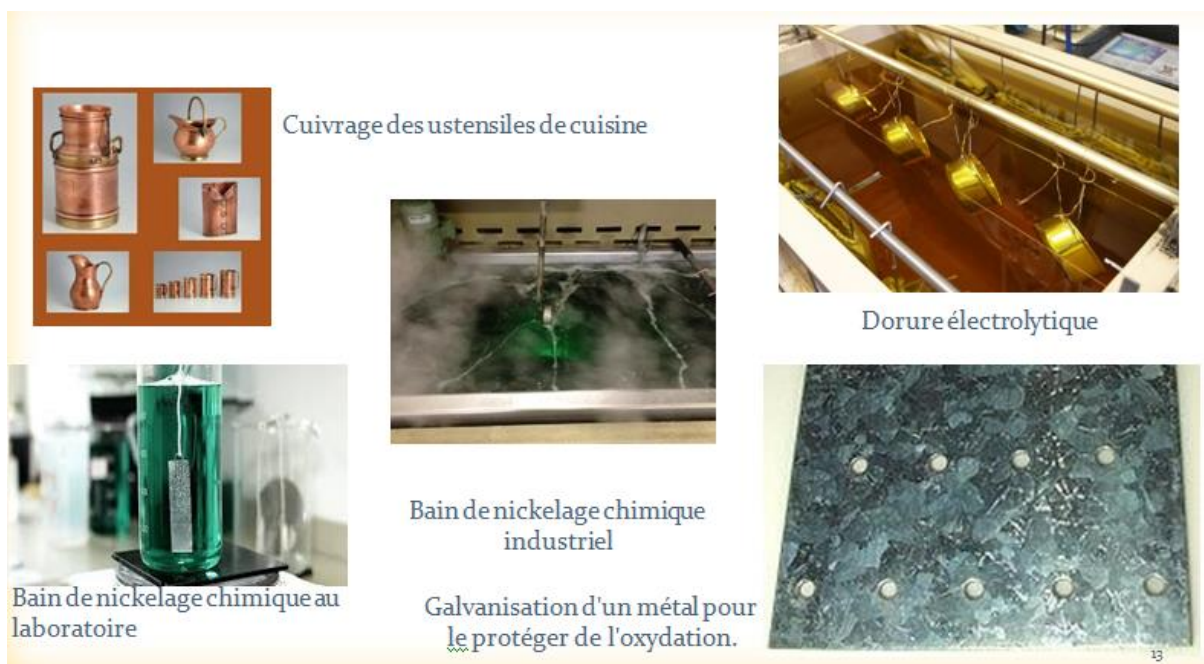


Figure II.1.Exemple de revêtements métalliques par voie humide [37]

### *Dépôts chimiques*

Dans le cas des dépôts chimiques, qui sont généralement effectués à partir d'une solution ionique, les revêtements sont obtenus sans l'utilisation d'une source de courant électrique. Cela facilite l'obtention d'une épaisseur de dépôt constante, même sur des pièces présentant une forme complexe.

### *Procédés par immersion en bain fondu*

C'est les principaux traitements pratiqués actuellement pour revêtir au trempé des objets métalliques par de l'aluminium, du zinc, de l'étain ou du plomb. Chacun de ces quatre métaux fondus est pur, ou allié à d'autres éléments métalliques [38].

#### **a) Pour les métaux fondus**

Le procédé de revêtement concerne spécifiquement l'application de métaux à bas point de fusion sur de petites pièces, des grandes séries ou des procédés continus tels que la galvanisation à chaud, le plombage, l'aluminiage et l'étamage (figure II.2). Lors de la diffusion, cela conduit généralement à un revêtement de structure complexe avec la formation de divers composés conformément au diagramme d'équilibre Fe-Zn. Certains des phases intermédiaires peuvent présenter une fragilité dans les applications. L'épaisseur du revêtement est de plusieurs dizaines de micromètres, avec une bonne adhérence et une faible ou nulle porosité. L'utilisation d'alliages zinc-aluminium est de plus en plus répandue dans l'industrie automobile, tels que le Galfan et le Galvalume. Les tôles aluminées sont utilisées pour améliorer la résistance à l'oxydation jusqu'à 650 °C.



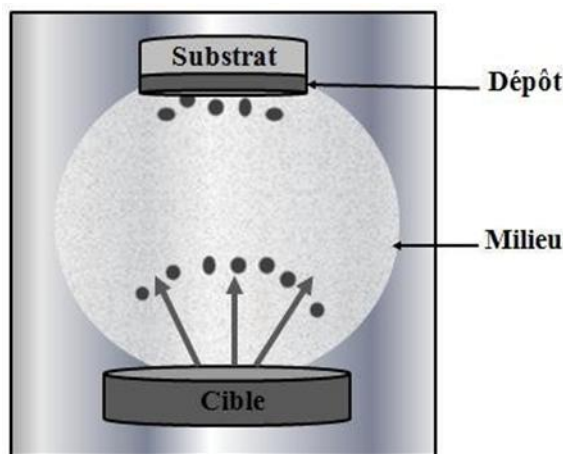
**Figure II.2.** Immersion en bain fondu métaux fondus [39]

### b) Pour les sels fondus

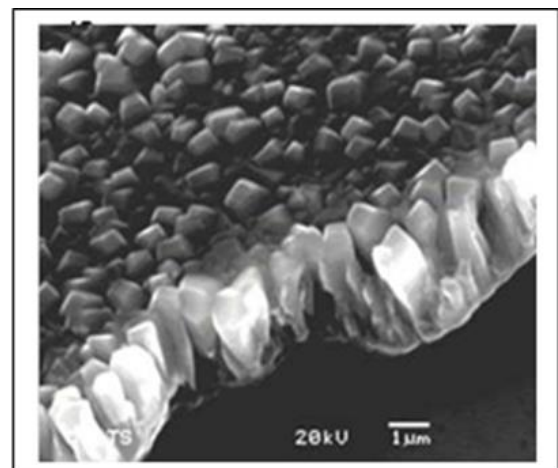
La réactivité élevée des bains de sels et l'activation thermique entraînent des modifications de la surface de la pièce traitée, impliquant des réactions et/ou des diffusions d'éléments non métalliques tels que le carbone, l'azote, le soufre, l'oxygène, le bore, etc. Par conséquent, ces procédés sont également classés parmi les techniques de traitement thermique avec diffusion [36].

#### II.1.1.2. Procédés par voie sèche

Les techniques de traitement de surfaces par voie sèche sont des alternatives aux méthodes de traitement de surfaces par voie humide, permettant d'éviter les procédés chimiques conventionnels qui génèrent des effluents contenant des substances toxiques lors du rinçage. Parmi ces techniques, on trouve le dépôt physique en phase vapeur (PVD) et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) voir (figure II.3). Ces deux approches sont basées sur la formation de couches à partir d'une phase gazeuse, notamment la vapeur métallique [40].



**Figure II.3.(a)** Principe du PVD ;le métal évaporé est déposé de la cible vers le substrat [37]



**Figure II.3. (b)** Couche d'un métal déposée par PVD [37]

#### A. Dépôt Physique en phase Vapeur (PVD : Physique Vapeur Déposition)

Le dépôt physique en phase vapeur est réalisé sous une basse pression, généralement entre ( $10^{-2}$  à  $10^{-4}$ ) mbar. La production de la phase vapeur repose sur deux mécanismes basés sur des phénomènes physiques : la pulvérisation cathodique et la vaporisation.

✓ La pulvérisation cathodique est une technique qui implique le bombardement d'une surface cible par des particules énergétiques, souvent des ions positifs tels que l'argon ou le néon, qui sont accélérés à partir d'un plasma gazeux. La cible est maintenue à un potentiel négatif (cathode), d'où le terme de pulvérisation cathodique.



✓ La vaporisation, elle permet d'obtenir la vaporisation des substances à déposer en chauffant un matériau. Cela peut être réalisé par effet Joule, induction, faisceau laser, arc électrique, faisceau d'électrons, plasma, électrodes, rayonnement, résistance ou décharge dans un gaz.

*B. Dépôt Chimique en phase Vapeur (CVD : Chemical Vapeur Déposition)*

La vapeur produite, composée des différents constituants, forme un plasma métallique. Une fois cette phase vapeur générée, il est essentiel de la transférer de la source d'atomisation jusqu'au substrat à revêtir tout en préservant au maximum ses caractéristiques physiques d'origine. Pour ce faire, le transfert de la phase vapeur est réalisé à l'aide d'un champ électrique. Cela permet de guider et de diriger la vapeur métallique (figure II.4) vers le substrat de manière contrôlée et précise [40].

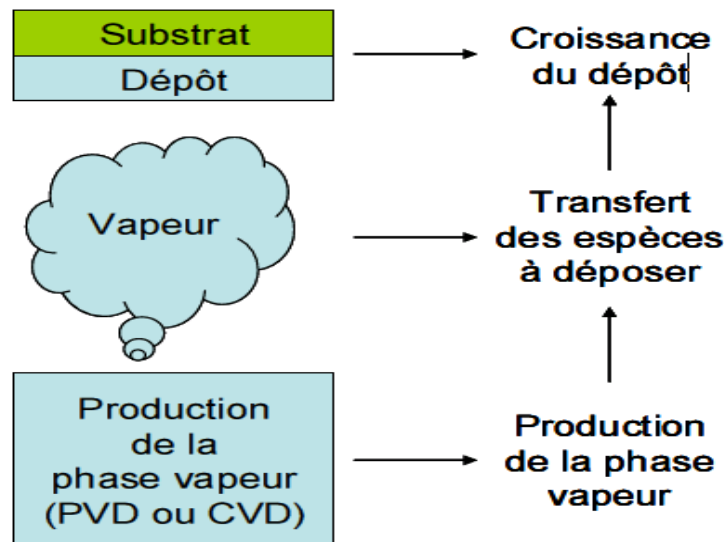


Figure II.4 Dépôt physique ou chimique en phase vapeur [40]

*C. Procédés par projection thermique*

L'apparition des revêtements par projection thermique remonte à 1909, avec l'invention de Schoop qui consistait à projeter du plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de la poudre de plomb à travers une flamme. Les premières applications industrielles ont émergé en 1914, notamment dans le domaine militaire (projection d'étain à l'arrière des obus), dans l'anticorrosion (dépôts d'aluminium) et dans la décoration (dépôts de bronze). À partir de 1914, des essais de projection par arc électrique ont également été réalisés.

Aujourd'hui, les objectifs techniques et économiques des industriels de tous les secteurs visent à réduire les coûts tout en améliorant les performances. Les pièces constitutives des machines

ou équipements, qui sont de plus en plus petites, doivent résister à diverses sollicitations, qu'elles soient internes (contraintes mécaniques, fatigue, fluage), externes (frottement, abrasion, température, érosion) ou environnementales (corrosion, oxydation, attaque chimique, chaleur). La projection thermique permet de conférer à chaque zone de la pièce les propriétés de surface nécessaires à son fonctionnement, tout en permettant le choix de matériaux de base compatibles avec les propriétés recherchées au cœur de la pièce.

Le principe général de la projection thermique est illustré à la (figure II.5) La matière à déposer, sous forme de poudre, de fil, de cordon ou de baguette, est fondue totalement ou partiellement dans une source de chaleur telle qu'une flamme, un arc électrique ou un plasma. Un gaz vecteur est utilisé pour pulvériser la matière et transporter les gouttelettes ainsi formées jusqu'à la surface à revêtir [38].

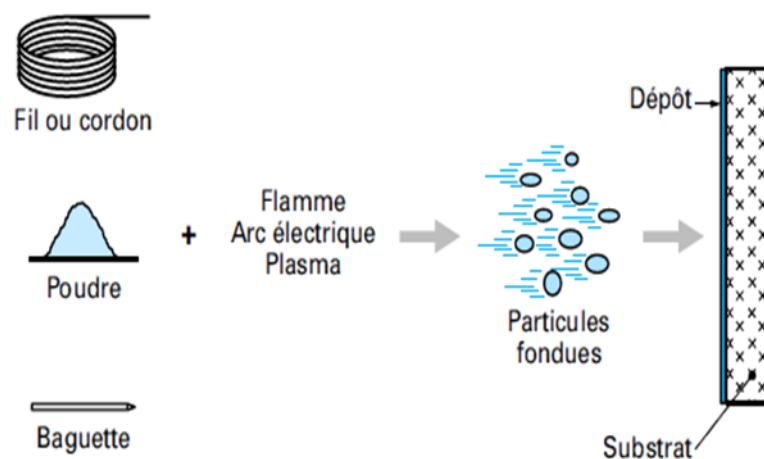


Figure II.5.Principe fondamental de la projection thermique [41]

#### D. Procédés par faisceau à haute énergie

Les procédés tels que le bombardement électronique, le faisceau laser, l'implantation ionique et les méthodes dérivées sont relativement récents et, pour certains, encore en phase de développement. Néanmoins, ils présentent des possibilités d'application prometteuses.

##### a) Le faisceau laser

Le laser est essentiellement constitué de trois éléments principaux (Figure II.6) :

1) Un milieu actif ou un milieu amplificateur permet l'interaction entre les atomes et la lumière. Lorsqu'un atome est exposé à une radiation électromagnétique, l'énergie des photons de la radiation affecte périodiquement sa distribution de charge électrique, ce qui entraîne un



transfert d'énergie entre les photons et l'atome. Trois processus d'interaction peuvent se produire : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission induite ou stimulée.

2) Pour obtenir l'émission laser, il est essentiel d'exciter les atomes vers des niveaux d'énergie supérieurs, conformément à la théorie des états d'énergie. Cette excitation peut être réalisée en utilisant une source externe d'énergie, appelée source de pompage. Il existe actuellement de nombreuses méthodes de pompage disponibles, telles que le pompage optique, électronique, thermique, chimique, par particules lourdes ou par rayonnement ionisant. Chacune de ces méthodes permet d'apporter l'énergie nécessaire pour exciter les atomes et favoriser l'émission laser.

3) L'amplification de la lumière peut être obtenue non seulement grâce à la puissance de la source d'excitation extérieure, mais aussi en augmentant la longueur du milieu actif. Cependant, le milieu actif a une longueur limitée, ce qui nécessite l'utilisation d'un procédé permettant d'exploiter plusieurs traversées du rayonnement stimulé à travers ce milieu amplificateur. Pour cela, on utilise une cavité résonante constituée de deux miroirs, dont l'un est semi-réfléchissant. Ce miroir permet à une partie de l'émission laser de s'échapper, tandis que l'autre partie est renvoyée dans le milieu actif, où les atomes excités produisent à nouveau de l'émission stimulée. Cette configuration de cavité optique est appelée résonateur optique, car elle permet de travailler principalement dans le domaine des fréquences des rayonnements infrarouge, visible ou ultra-violet.

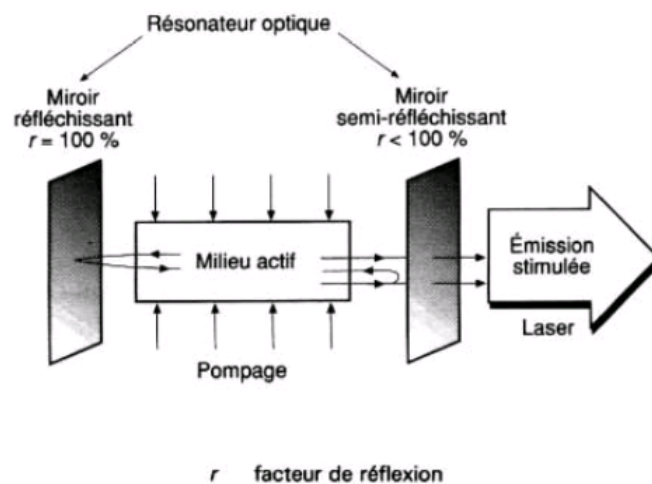


Figure II.6 Schéma des éléments essentiels d'un laser [42]

Les caractéristiques principales des lasers les plus utilisés dans l'industrie sont résumées dans le tableau II.2.

Caractéristique	Laser		
	CO <sub>2</sub>	YAG·Nd <sup>3+</sup>	Excimères
Longueur d'onde (µm)	10,6 IR lointain	1,06 proche IR	0,193 0,351 proche UV
Milieu actif.	gaz : CO 2	solide : Nd·YAG	gaz : dimères
Mode	Impulsionnel (continu)	impulsionnel (continu)	Impulsionnel
Puissance Moyenne (W)	100 à 25 000	10 à 1 200	30 à 750
IR : infrarouge		UV : ultra-violet	

Tableau II .2.Caractéristiques des principaux lasers de puissance [36]

### b) L'implantation ionique et ses méthodes dérivées

Les techniques d'implantation ionique, telles que l'implantation par recul ou par mixage ionique, offrent la possibilité d'enrichir la surface extrême d'un matériau (sur une épaisseur d'un à quelques micromètres) et ainsi de modifier ses propriétés. L'implantation d'azote est particulièrement utilisée dans l'industrie pour améliorer la résistance à l'usure des pièces mécaniques. Grâce à ce procédé, la surface du matériau est renforcée, ce qui permet d'accroître sa durabilité et sa performance dans des conditions d'utilisation difficiles.

#### II.1.2. Traitements de conversion

Ces traitements ont pour objectif de former un film de faible épaisseur à la surface des composants afin de les protéger. Ce film est créé par une réaction chimique ou électrochimique entre un composé contenant l'élément d'apport et le substrat, donnant ainsi une couche de sel complexe en surface.

En général, ces films sont appliqués pour protéger la surface contre la corrosion, mais ils apportent également des avantages sur le plan tribologique. Leur présence réduit les risques d'adhésion en évitant un contact direct métal/métal, et leur structure microporeuse favorise l'adhérence des films lubrifiants par capillarité.

##### II.1.2.1. Conversions chimiques

La réaction se produit naturellement dans un milieu aqueux contenant des sels d'éléments réactifs, sans nécessiter des températures élevées. Le (Tableau II.3) résume les principales caractéristiques des traitements de conversion chimique les plus couramment utilisés.

Traitements	Substrats	Conditions de traitement	Propriétés	Applications	Températures maximales d'emploi
Chromatation (Cr)	Alliages d'aluminium Zinc Cadmium Cuivre Argent Magnésium Étain	Phase aqueuse contenant du chrome hexavalent	Abaisse le frottement Tenue à la corrosion Épaisseur $\approx 1 \mu\text{m}$	Accrochage peinture ou vernis	100°C à sec 250°C avec peinture
Phosphatation (P + Mn)	Alliages ferreux non alliés ou faiblement alliés (Ni+Cr+Mo < 5 %) Fonte Alliages de zinc ou aluminium (phosphatation au chrome)	Phase aqueuse 80 à 100°C	Phosphate de manganèse Épaisseur < 1 $\mu\text{m}$ ( $\approx 12 \text{ g/m}^2$ )	Protection contre la corrosion Isolation électrique Abaissement du frottement Amélioration de la résistance à l'usure Accrochage : lubrifiant solide, liquide, vernis de glissement	150°C à sec 230°C
Phosphatation (P + Zn)	Aciers au carbone faiblement alliés	Phase aqueuse 80 à 100°C	Phosphate de zinc	Accrochage lubrifiant pour la mise en forme par déformation Accrochage de peinture	150°C à sec 200°C

**Tableau II.3.**Films de conversion chimique [43]

### **II.1.2.2. Conversions électrochimiques**

Ces traitements sont effectués en immergeant le composant, après dégraissage et décapage, dans une solution aqueuse acide, tout en le maintenant à un potentiel anodique. La réaction d'oxydation du métal avec l'oxygène qui se dégage à l'anode forme une couche d'oxyde d'une épaisseur allant de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. Cette couche est très adhérente et possède une dureté élevée. Le Tableau II.4 résume les principales caractéristiques des traitements les plus couramment utilisés dans les applications tribologiques. [43,44]

Traitements	Substrats	Conditions de traitement	Propriétés	Applications
Oxydation anodique (anodisation chromique)	Aluminium et alliages Magnésium et alliages	Solution aqueuse acide	Bonne adhérence Épaisseur : 2 à 8 µm Possibilité de colmatage des pores Baisse de 13 % de la limite d'endurance	Amélioration de la résistance à la corrosion Base d'accrochage pour peintures et vernis Réduction des risques d'adhésion métal / métal Imprégnation de lubrifiants solides
Oxydation anodique (anodisation phosphorique)	Aluminium et alliages Magnésium et alliages	Solution aqueuse acide	Bonne adhérence Possibilité de colmatage des pores	Idem
Oxydation anodique (anodisation dure)	Oxydation anodique (anodisation dure)	Solution aqueuse sulfurique à 0°C	Dureté HV (0,05 N) 300 à 450 Bonne adhérence Épaisseur 25 à 250 µm (couramment 25 à 100) Possibilité de colmatage des pores pour abaisser la dureté des couches Abaissement de 30 à 60 % de la limite d'endurance sur les alliages série 2000	Amélioration de la tenue en frottement Réduction des risques d'adhésion métal/métal Imprégnation de lubrifiants solides Bonne résistance à l'abrasion
Oxydation anodique sulfurique du titane	Titane et ses alliages	Solution aqueuse Sulfurique	Couche barrière : mince, compacte, isolante Couleur variable en fonction de l'épaisseur Épaisseur : 2,5 à 60µm	Accrochage de revêtements : MoS2, PTFE Réduit les risques d'adhésion et de grippage
Sulfuration anodique	Aciers à hautes caractéristiques (cémentés, trempés) Fontes Inapplicable aux aciers inoxydables	Bain de sel fondu à 190°C Thio cyanates alcalins	Couche de sulfure de fer Épaisseur : 6 à 7 µm Dureté Bonne adhérence	Réduction du frottement et de l'usure

**Tableau II.4.**Principaux films de conversion électrochimique chimique [43]

### **II.1.3. Traitements par transformation structurale**

Dans les procédés de traitement par transformation structurale, il n'est généralement pas utilisé de matériau d'apport. Seule la structure métallurgique de la surface de la pièce est modifiée, soit par des moyens mécaniques, soit par des traitements thermiques. Ces traitements sont principalement utilisés pour des applications mécaniques et ont une application limitée dans le domaine de la protection contre la corrosion.

#### **II.1.3.1. Traitements mécaniques**

Les procédés mécaniques comprennent des méthodes de préparation de surface telles que le polissage mécanique (Figure II.7), le décapage au jet d'abrasif et l'utilisation des ultrasons. Le décapage ionique est souvent utilisé avant l'application de procédés tels que le dépôt physique en phase vapeur (PVD), mais il peut être coûteux à mettre en œuvre.

Le grenailage est utilisé pour introduire des contraintes résiduelles de compression en surface, ce qui améliore le comportement en termes de fatigue et de corrosion sous contrainte. L'utilisation d'ondes de choc générées par un faisceau laser est actuellement en développement, avec des objectifs similaires. Ce type de traitement est intéressant pour les aciers inoxydables, car il augmente leur résistance à la corrosion par piqûres et sous contrainte [36].



Figure II.7 Exemples de polissage mécanique [37]

### II.1.3.2. Traitements thermiques

Le traitement thermique est une combinaison d'opérations de chauffage et de refroidissement appliquées aux métaux et alliages à l'état solide afin d'obtenir les conditions ou les propriétés désirées. Il implique généralement l'élévation de la température d'un acier ou d'un alliage selon un profil thermique spécifique. Le matériau est ensuite maintenu à cette température pendant un certain temps, avant d'être refroidi à une vitesse contrôlée ou par un processus de trempage à une température prédéfinie ou à température ambiante.

Les traitements thermiques sont réalisés dans des fours, souvent en utilisant des gaz pour contrôler l'atmosphère du processus. Les atmosphères contrôlées sont utilisées pour réduire les effets de l'oxydation sur la pièce pendant le traitement ou pour créer une atmosphère enrichie en éléments spécifiques pour obtenir des effets chimiques superficiels.

Les traitements thermiques peuvent être appliqués pour homogénéiser les alliages après la coulée du métal ou pour améliorer leur formabilité à chaud. Ils peuvent également être utilisés pour ramollir les métaux avant et pendant les opérations de traitement à chaud et à froid, ou pour modifier leur microstructure afin d'obtenir les propriétés mécaniques requises.

Les traitements thermiques des alliages métalliques sont également utilisés pour modifier la chimie de surface d'un matériau. Cela implique la diffusion de carbone, d'azote ou d'autres substances gazeuses ou solides à travers la couche superficielle de la pièce.

Ces procédés visent à durcir la couche superficielle de la pièce et à améliorer sa résistance à l'usure, à la corrosion et à la fatigue [45]. Les procédés thermiques par induction, faisceau d'énergie (laser) ou plasma sont largement utilisés pour augmenter les caractéristiques mécaniques de la surface des pièces en acier, soit par trempe superficielle, soit par traitement thermique localisé. Le choix de la source d'énergie dépend de la taille et de la géométrie des pièces à traiter (figure II.8).

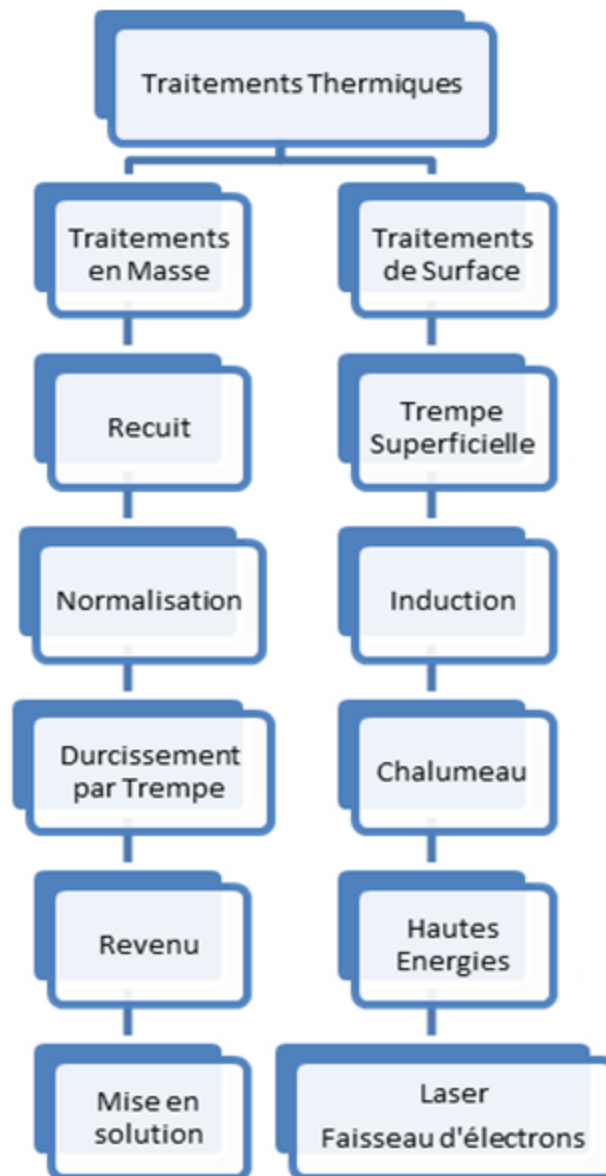


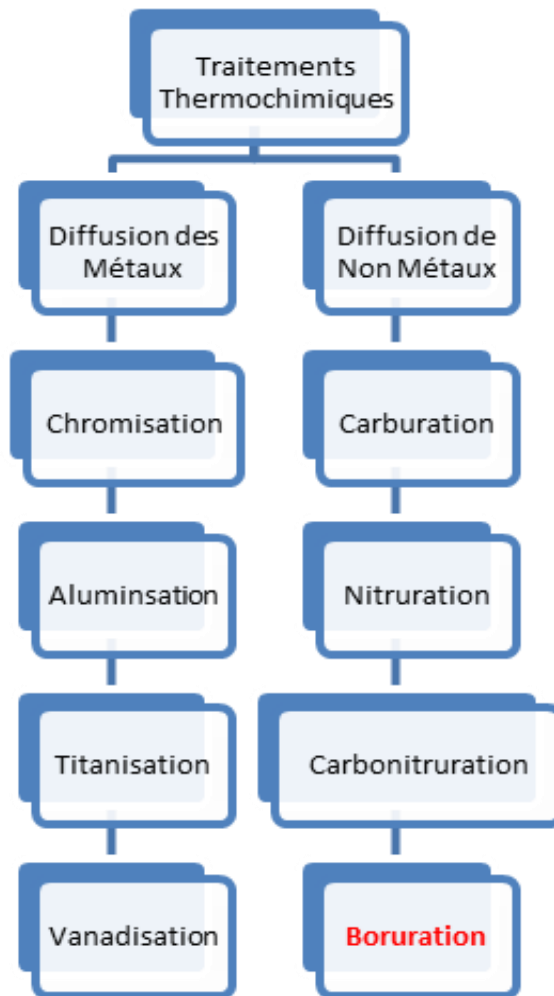
Figure II.8 Classification des traitements thermiques [46]

### II.1.3. Traitements par diffusion (ou Traitements Thermochimiques)

Les traitements thermochimiques, également appelés traitements de diffusion, consistent à enrichir la surface d'un acier ou d'un alliage en un élément spécifique. Différents traitements peuvent être utilisés, tels que la cémentation pour l'introduction de carbone, la nitruration pour

l'introduction d'azote, la chromisation pour l'introduction de chrome, la boruration pour l'introduction de bore, etc.

Parmi ces traitements, la boruration sera davantage détaillée, car c'est celui qui sera utilisé dans la partie expérimentale de ce travail (figure II.9).



**Figure II.9.** Classification des traitements thermochimiques [47]

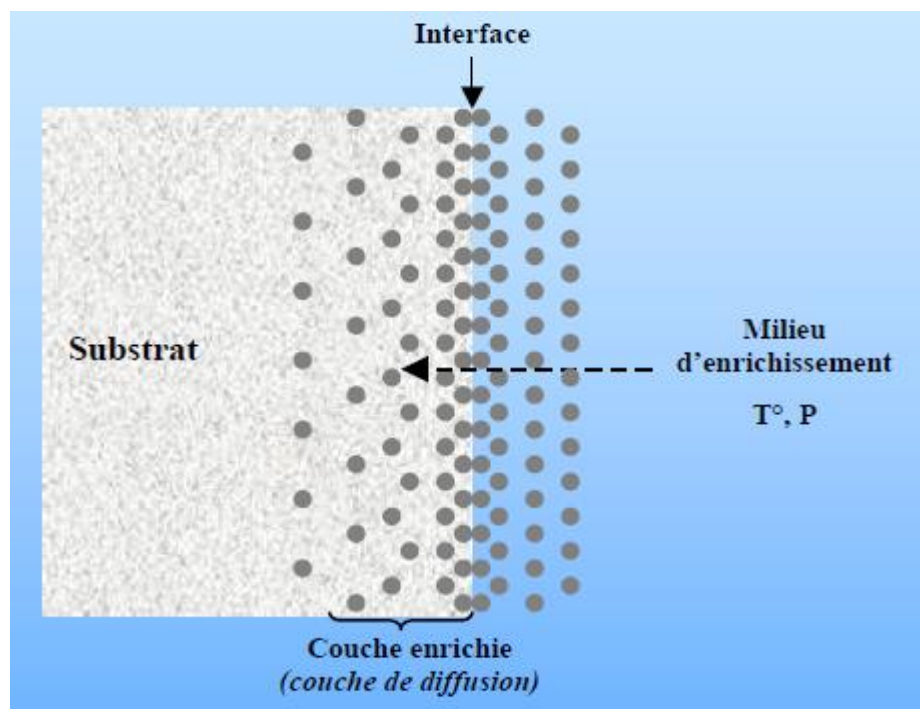
Les traitements thermochimiques sont généralement réalisés en favorisant la diffusion atomique à partir d'un milieu extérieur, qui est souvent porté à une température élevée. Cela permet d'enrichir la couche superficielle d'un métal avec des atomes d'un autre élément, qu'il soit métallique ou non. Pour assurer un transport efficace de ces atomes vers ou depuis la surface du métal, il est nécessaire de créer des conditions favorables à la surface.

Pour que l'enrichissement de la couche superficielle d'un métal A par un autre métal B soit possible, certaines conditions doivent être remplies. En particulier, le métal B doit être soluble dans le métal A à l'état solide.

Le traitement thermochimique implique de chauffer la pièce à une température spécifique dans un milieu gazeux, liquide ou solide qui libère facilement les atomes de diffusion à l'état atomique. La pièce est maintenue à cette température pendant un certain temps, puis refroidie. Contrairement à un traitement thermique classique, un traitement thermochimique modifie non seulement la structure de l'acier ou de l'alliage, mais également la composition chimique des couches superficielles, ce qui permet de modifier ses propriétés dans une plus large mesure. Le traitement thermochimique compte trois stades élémentaires [48] :

1. Le milieu extérieur (gaz, liquide ou solide) est utilisé pour fournir l'élément diffusant à l'état atomique.
2. Les atomes d'élément diffusant entrent en contact avec la surface de la pièce en acier et forment des liaisons chimiques avec les atomes de fer, ce qui est appelé absorption.
3. L'élément diffusant pénètre en profondeur dans le métal de base par diffusion, modifiant ainsi la composition chimique de la surface traitée.

La (figure II.10) illustre le principe des traitements thermochimiques, montrant la diffusion des atomes à travers la surface de la pièce pour modifier sa composition chimique.



**Figure II.10.** Principe de diffusion à travers la surface dans les traitements thermochimique [48]

Les traitements thermochimiques peuvent être classés en fonction de la taille de l'élément de diffusion. Ils sont considérés comme interstitiels lorsque l'atome diffusant est de petite taille et



occupe les interstices de la structure cristalline. En revanche, ils sont dits de substitution lorsque l'atome diffusant est de taille similaire à celle des atomes de la structure cristalline et se substitue à ces derniers.

Les traitements thermochimiques interstitiels comprennent la carburation, la carbonituration, la boruration, la nitruration et la nitrocarburation. Ces procédés impliquent la diffusion d'éléments tels que le carbone, l'azote et le bore à travers la surface de la pièce.

D'autre part, les traitements thermochimiques de substitution comprennent l'aluminisation, la chromisation et la titanisation. Ils impliquent la diffusion d'éléments tels que l'aluminium, le chrome et le titane pour remplacer les atomes de la structure cristalline de la pièce.

Ces traitements améliorent non seulement la résistance à l'usure, mais également la résistance à la corrosion. (figure II.11) fournit des informations sur les milieux et les techniques typiques utilisés dans les traitements de diffusion interstitiels et substitutionnels [49].

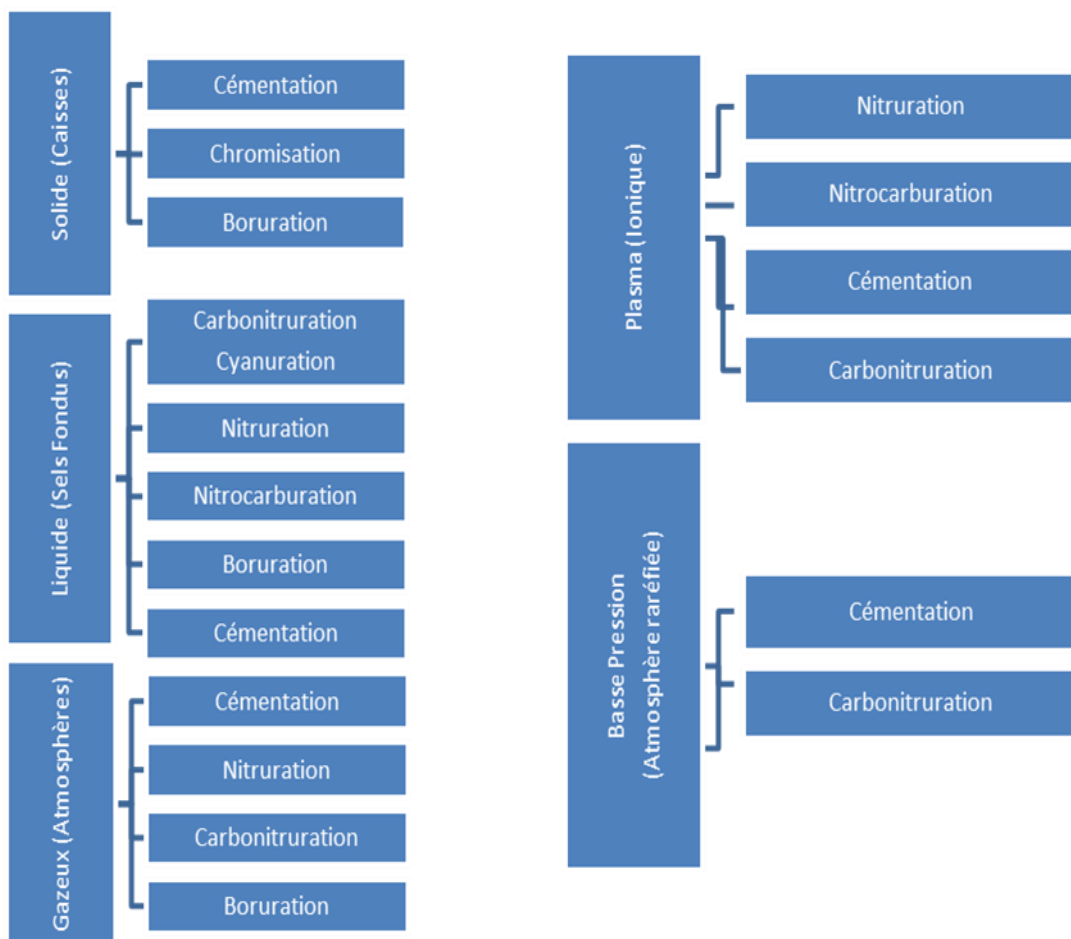


Figure II.11. Milieux de diffusion associée aux traitements thermochimiques [49]

## II.2. Techniques de boruration

### II.2.1. Définition Boruration

La boruration est un traitement de durcissement superficiel pouvant être appliqué aux métaux ferreux et non ferreux [50]. Le procédé implique l'élévation de la température des pièces à borurer entre 700 et 1000°C, suivie d'une période de maintien entre 1 et 12 heures en contact avec du bore. Le bore diffusé sur une épaisseur de 20 à 400 microns réagit pour former du borure de fer.

### II.2.2. Boruration en milieu gazeux

La technique de boruration en milieu gazeux consiste à réaliser la décomposition ou la dissociation thermique de composés volatils contenant du bore. Les composés les plus couramment employés sont le diborane ( $B_2H_6$ ), les halogénures de bore ( $BF_3$ ,  $BCl_3$ ,  $BBr_3$ ,...) ainsi que les composés organiques du bore ( $(CH_3)_3B$ ,  $(C_2H_5)_3B$ ,...).

**a) Le diborane :** En général, le diborane est utilisé sous forme d'un mélange « diborane-hydrogène » afin d'obtenir des couches borurées de qualité satisfaisante [51]. L'efficacité du transfert de bore du milieu gazeux vers le substrat peut être améliorée en incorporant un dispositif de bombardement ionique dans l'enceinte de boruration [52]. Cependant, en raison de sa toxicité et de son inflammabilité, le diborane est peu utilisé.

**b) Les halogénures de bore :** L'utilisation du trichlorure de bore ( $BCl_3$ ) ou du tribromure de bore ( $BBr_3$ ) dans le processus de boruration est souvent accompagnée d'une corrosion importante de l'acier traité, ce qui conduit généralement à la formation de couches non compactes [53].

**c) Les composés organiques du bore :** Les composés organiques les plus couramment utilisés sont le triméthylborane  $(CH_3)_3B$  et le triéthylborane  $(C_2H_5)_3B$ . En raison de leur teneur en carbone, l'utilisation de ces composés entraîne également une cémentation des aciers traités, ce qui réduit la qualité des couches de surface obtenues [54].

En général, les couches borurées produites en milieu gazeux sont uniformes et présentent une excellente qualité de surface, ce qui rend le nettoyage des pièces traitées inutile. Malgré ces avantages, la boruration en milieu gazeux n'a pas connu un grand succès à l'échelle industrielle en raison des problèmes mentionnés précédemment.

### II.2.3. Boruration en milieu liquide

Pour la boruration en milieu liquide, la libération de bore à la surface de la pièce traitée nécessite une réduction chimique du composé contenant du bore. Cette réduction peut être

réalisée soit par voie électrochimique en appliquant une tension, soit par voie chimique en ajoutant un agent

réducteur au bain de boruration. Les bains de sels fondus, utilisés dans les traitements de boruration avec ou sans électrolyse, ont été étudiés par plusieurs chercheurs [55,56].

### **II.2.3.1. Boruration électrochimique dans des sels fondus**

Les électrolytes les plus couramment utilisés dans ce procédé sont généralement à base de tétraborate de sodium (connu sous le nom de borax :  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) ou de tétrafluoroborate de potassium ( $\text{KBF}_4$ ). Le borax pur et le tétrafluoroborate de potassium pur ont été utilisés avec succès. Cependant, des fluorures et des chlorures alcalins sont généralement ajoutés aux composés de base afin d'améliorer les propriétés physico-chimiques des bains de boruration, tels que la température du point de fusion, la viscosité, la conductivité électrique, etc.

Dans tous les cas répertoriés, la boruration électrolytique a abouti à la formation de couches borurées biphasées voir (tableau II.5).

Milieu de boruration	Température de boruration (°C)	Temps de boruration (h)	Densité de courant (A/cm <sup>2</sup> )	Épaisseur de la couche borurée (µm)
100% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	800-1000	2-6	0,1 - 0,3	60-450
(100-60)% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + (0 - 40)% $\text{B}_2\text{O}_3$	950	4	0,20	320
80% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + 20% NaCl	800-950	2-4	0,20	50-300
90% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + 10% NaOH	600-700	2-6	0,20	15-50
100% $\text{KBF}_4$	600-850	0,5-2	0,05 - 0,70	5-75
90% (75 % KF + 25% LiF) + 10% $\text{KBF}_4$	700-850	0,5-4	0,02 - 0,03	10-70

**Tableau II.5.** Quelques compositions chimiques des sels fondus utilisés dans les procédés électrochimiques de boruration [57]

### **II.2.3.2. Boruration thermochimique dans des sels fondus**

Implique la création d'une cellule galvanique dans laquelle le substrat agit en tant que cathode, tandis que de fines particules de l'agent réducteur en suspension dans le bain fondu agissent comme des micro-anodes. Selon cette théorie, étudiée en détail par Lyakhovich [58], la boruration se produit uniquement lorsque le potentiel de la surface de la pièce traitée est supérieur à celui de l'agent réducteur. En se basant sur cette théorie, divers métaux et substances chimiques peuvent jouer le rôle d'agent réducteur nécessaire pour obtenir du bore atomique lors de traitements de boruration. Les agents réducteurs les plus couramment utilisés comprennent l'aluminium, le carbure de bore et le carbure de silicium. D'autres agents réducteurs tels que les ferro-alliages ou les carbures (tels que le silicium, le calcium-silicium,

le ferro-silicium, le ferro-manganèse, le carbure de calcium et la poudre de bore) sont également utilisés pour obtenir du bore atomique. En particulier, le carbure de calcium a donné des résultats satisfaisants, mais son utilisation est limitée en raison de son explosivité.

#### **II.2.4. Boruration en milieu solide**

Peut être réalisée selon deux techniques différentes : la technique des pâtes et la technique des poudres.

##### **II.2.4.1. Technique des pâtes**

Elle est principalement utilisée pour la boruration partielle ou pour le traitement de pièces de grande taille qui sont difficiles à traiter avec d'autres techniques. Dans ce procédé, les pièces ou les parties de pièces à borurer sont recouvertes d'une pâte de boruration, puis chauffées par induction, par effet Joule ou placées dans des fours conventionnels [59]. Le chauffage par induction est souvent préféré dans ce procédé en raison de ses avantages. Certains de ces avantages sont les suivants :

- Il permet un chauffage superficiel qui a peu d'impact sur le cœur de la pièce, évitant ainsi les traitements supplémentaires.
- Il permet un temps de traitement très court grâce à la température élevée atteinte par l'induction.

Les pâtes de boruration sont généralement composées de deux constituants essentiels :

1- Un constituant solide contenant une source riche en bore (carbure de bore, ferrobore, bore amorphe,.....), un activateur (cryolite, fluoroborates,....) et un diluant inerte (alumine ou carbure de silicium).

2- Un liant liquide et qui est généralement de nature organique (méthyle cellulose ou nitrocellulose dissoute dans l'acétate de butyle). Les principales pâtes utilisées pour la boruration des aciers sont rassemblées dans le (tableau II.6.)

Milieu de boruration	Température de boruration (°C)	Temps de boruration (h)	Epaisseur (µm)	Borures obtenus
50% B <sub>4</sub> C + 50% Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> + liant	1200	2-3 mn	35-125	FeB + Fe <sub>2</sub> B
45% B <sub>4</sub> C + 55% Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> + liant	950	4	120	FeB + Fe <sub>2</sub> B
80% B <sub>4</sub> C + 20% Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	800-1050	2-4	30-250	FeB + Fe <sub>2</sub> B
(40-60)% B <sub>4</sub> C + (60-40)% NaF	1100	0.15	90-120	FeB + Fe <sub>2</sub> B
95% B + 5% MgF	950	1.5	85	Fe <sub>2</sub> B
60% B + 40% Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> + liant	750-950	0.5-2	15-200	FeB + Fe <sub>2</sub> B
30 % B + 70% Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> + liant		3-7	10-40	FeB + Fe <sub>2</sub> B

**Tableau II.6.** Compositions chimiques des mélanges et paramètres de boruration utilisés dans la technique des pâtes [58].

### II.2.4.2. Technique des poudres

La technique des poudres consiste à placer les pièces à traiter dans des boîtes en acier remplies de poudre [60] de boruration, puis à chauffer ces boîtes dans des fours à moufles pendant une durée suffisante pour assurer une température homogène dans l'ensemble du volume de la poudre.

Cette technique a connu un développement important et est devenue la méthode la plus couramment utilisée à l'échelle industrielle. Les avantages qui justifient la préférence industrielle pour cette technique sont les suivants :

- Utilisation d'équipements simples et production de pièces propres à un coût acceptable.
- Facilité de manipulation pour les opérateurs et possibilité de changer la composition chimique des poudres utilisées.

### II.3. Nature des couches borurées (Aspects métallographiques des couches obtenues)

La morphologie de la couche borurée, qu'elle soit monophasée ou biphasée, est influencée par plusieurs facteurs, notamment la composition chimique du substrat, l'agent de boruration utilisé et les paramètres de contrôle du procédé. Ces éléments combinés déterminent la structure et la morphologie spécifiques de la couche borurée formée.

La (figure II.12) donne une classification des couches borurées en fonction de leur morphologie et de leur microstructure [60].

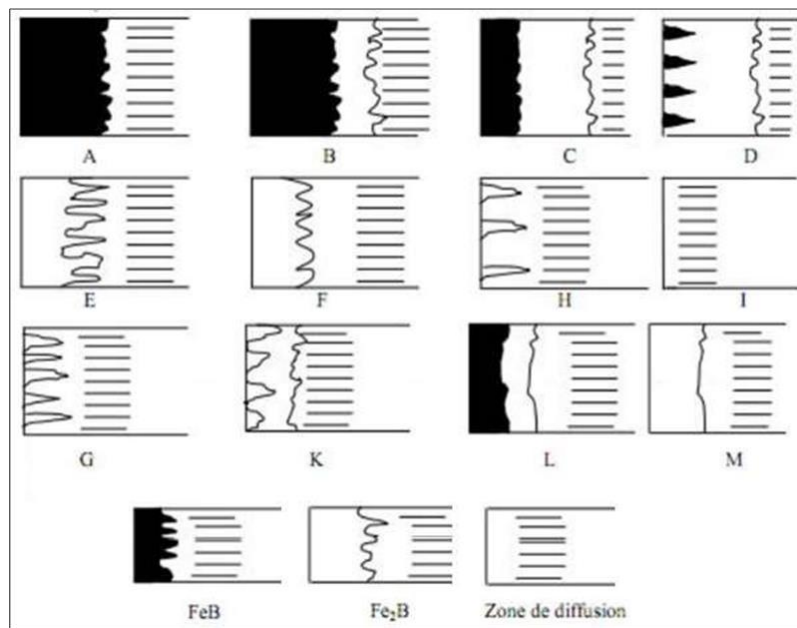


Figure II.12. Différentes morphologies des couches borurées [60]

Les différents types des couches borurées sont caractérisés comme suit:

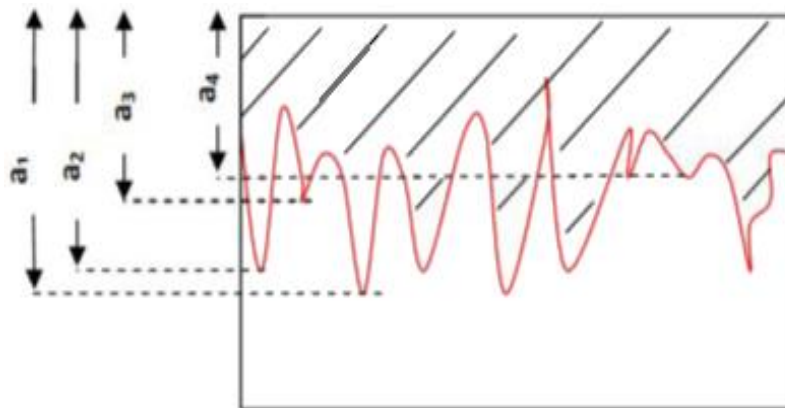
- A : couche monophasée, exclusivement FeB.
- B : couche biphasée formée de Fe<sub>2</sub>B et FeB.
- C : couche biphasée, où l'épaisseur de la couche FeB est petite par rapport à celle de Fe<sub>2</sub>B.
- D : couche biphasée, la couche FeB se présente se forme d'aiguilles isolées.
- E : couche monophasée, formée de Fe<sub>2</sub>B dont la morphologie est en dents de scie.
- F : couche monophasée, exclusivement Fe<sub>2</sub>B, moins dentée.
- G : couche Fe<sub>2</sub>B, avec des aiguilles ayant des épaisseurs variables.
- H : couche Fe<sub>2</sub>B, ayant des aiguilles isolées.
- I : zone de diffusion (exempte de borures).
- K : couche d'générée.
- L : couche biphasée de FeB et de Fe<sub>2</sub>B, avec une morphologie plane.
- M : couche monophasée formée de Fe<sub>2</sub>B, avec une morphologie plane.

#### II.4. Mesure de l'épaisseur des couches borurées

La méthode consiste à mesurer les longueurs des aiguilles sur un microscope optique ou un microscope électronique à balayage (MEB) et à prendre la longueur moyenne de ces aiguilles comme valeur de l'épaisseur moyenne de la couche borurée à l'emplacement sélectionné (figure II.13).

Ces mesures sont effectuées à trois, quatre ou cinq endroits différents, et la valeur moyenne est considérée comme l'épaisseur de la couche borurée.

$$\text{Epaisseur moyenne} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$$



**Figure II.13.** Représentation schématique montrant la détermination de l'épaisseur moyenne des couches borurées [61]

Il est important de noter que la formation des couches borurées entraîne une augmentation du volume de la pièce traitée, correspondant à environ 25 à 30% de l'épaisseur de la couche obtenue. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en compte ce changement dimensionnel lors de l'utilisation industrielle de ces pièces borurées [61].

## II.5. Influence des éléments d'alliage sur la boruration

La présence d'éléments d'alliage tels que le carbone, le chrome, le vanadium, le molybdène, le manganèse et le nickel dans le substrat modifie la morphologie et les propriétés des couches borurées. Ces éléments entrent en compétition avec le bore et peuvent avoir une influence directe sur la cinétique de boruration [61].

- **Carbone :**

Étant donné que la solubilité du carbone dans les borures est négligeable, le carbone est rejeté vers le cœur du substrat lors de la croissance de la couche borurée, ce qui entraîne la formation d'une sous-couche riche en carbone et en borocarbure, tels que  $\text{Fe}_3(\text{B,C})$  et  $\text{Fe}_{23}(\text{B,C})_6$ . L'augmentation de la teneur en carbone réduit donc l'épaisseur de la couche borurée.

- **Chrome :**

Le chrome a une grande affinité pour le bore, favorisant ainsi la formation de la phase FeB au détriment de la phase  $\text{Fe}_2\text{B}$  à mesure que la teneur en chrome augmente. Dans le cas d'aciers alliés au chrome, en plus des borures de fer, il est possible d'observer la formation de deux types de borures de chrome ( $\text{CrB}$  et  $\text{Cr}_2\text{B}$ ). Le chrome réduit l'épaisseur des couches borurées, aplanit l'interface entre la couche borurée et le substrat, et modifie ses propriétés.

- **Manganèse:**

L'incorporation de manganèse n'a aucun impact sur les couches borurées, car il se dissout préférentiellement dans le borure  $\text{Fe}_2\text{B}$  plutôt que dans le borure FeB.

- **Nickel:**

En raison de sa faible solubilité dans les borures, le nickel présente une ségrégation au sein des couches situées en dessous du  $\text{Fe}_2\text{B}$ . Les aciers contenant du nickel ont des couches borurées présentant une réduction de dureté. Cependant, cette diminution de dureté n'est pas observée dans les aciers au nickel-chrome, en raison de la formation de borures complexes tels que  $(\text{Fe, Ni, Cr})\text{B}$  et  $(\text{Fe, Ni, Cr})_2\text{B}$ .

- **Molybdène:**

La substitution partielle du fer par du molybdène dans les borures FeB et  $\text{Fe}_2\text{B}$  conduit à la formation de complexes de type  $(\text{Fe, Mo})\text{B}$  et  $(\text{Fe, Mo})_2\text{B}$ .

Ces composés entravent la croissance des couches borurées formées, et leur dureté est proportionnelle à la teneur en molybdène.

## **II.6. Matériaux traités par boruration**

Selon la littérature, il a été démontré qu'une variété de matériaux peuvent être traités avec succès par le procédé de boruration. Parmi ces matériaux, on peut notamment mentionner les métaux ferreux, les métaux non ferreux et les cermets.

### **II.6.1. Les métaux ferreux**

Quels que soient leur mode d'obtention (aciers laminés, aciers de coulée, aciers frittés, etc.), plusieurs études ont démontré que les aciers au carbone, les aciers alliés et les fontes grises peuvent être soumis à des traitements de boruration. Cependant, il est important de noter que les teneurs en silicium (Si) et en aluminium (Al) doivent être inférieures à 1 % et 0,3 % respectivement. Cette limitation est due à l'insolubilité de ces deux éléments dans les couches borurées formées, ce qui entraîne la formation d'une sous-couche très riche en aluminium et en silicium en dessous de la couche borurée. Cette sous-couche riche en aluminium et en silicium est généralement très molle, ce qui ne constitue pas un support adéquat pour les couches borurées connues pour leur extrême dureté. Ce phénomène peut entraîner une détérioration des couches borurées lorsqu'elles sont soumises à des charges importantes.

Les aciers rapides, quant à eux, ne sont pas recommandés pour la boruration en raison des problèmes causés par les traitements de durcissement qui suivent la boruration. En effet, ces traitements sont effectués à des températures supérieures à la température de fusion des couches borurées.

De manière générale, plus la teneur en éléments d'alliage des aciers destinés à la boruration est élevée, moins l'épaisseur de la couche borurée formée est importante en raison de la présence d'atomes étrangers aux couches borurées qui entravent leur croissance.

Par conséquent, à moins d'avoir un impératif nécessitant l'utilisation d'un acier présentant des caractéristiques élevées dans la masse, il est doublement avantageux de choisir un acier au carbone ou peu allié (par exemple, l'acier 35CrMo4). De cette manière, on peut obtenir un acier moins coûteux tout en permettant la formation d'une couche borurée plus épaisse et moins fragile, sans oublier les avantages en termes d'usinage.

### **II.6.2. Les métaux non ferreux**

Les techniques et produits développés pour la boruration des métaux ferreux ne sont malheureusement pas applicables à la plupart des métaux non ferreux, en particulier le titane.



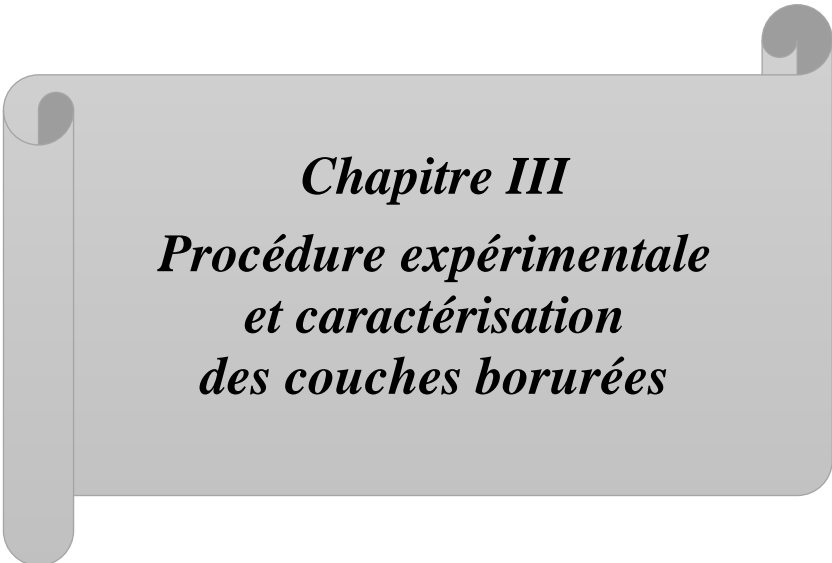
Cependant, grâce à des procédés réalisés sous protection d'argon et utilisant du bore amorphe très pur, il a été possible d'obtenir des couches borurées sans défauts sur le titane et ses alliages.

Dans le but de simplifier le processus et d'économiser l'argon, des chercheurs de la société allemande DEGUSSA [62] ont amélioré le procédé pour ces métaux et ont mis au point une technique spéciale.

Par exemple, la dureté obtenue sur les alliages de titane ou de tantale est d'environ 3000 HV.

### **II.6.3. Les cermets**

Outre les métaux ferreux et non ferreux, les cermets à matrice de cobalt ou de cobalt-nickel ont également été soumis à des traitements de boruration afin d'améliorer leurs propriétés d'usure et de coupe en tant qu'outils [63].



***Chapitre III***  
***Procédure expérimentale***  
***et caractérisation***  
***des couches borurées***

Dans ce chapitre, nous aborderons la présentation du matériau étudié ainsi que les différents dispositifs et techniques expérimentales utilisées pour créer une couche de borure sur des substrats en fonte blanche alliée au chrome. Ce chapitre aborde aussi la manière dont les échantillons sont préparés pour le traitement thermochimique de la boruration, ainsi que la caractérisation des couches borurées (mesure de l'épaisseur) obtenues à l'aide de la microscopie optique et du microscope électronique à balayage (MEB).

Finalement, nous avons examiné la différence de microdureté entre la couche borurée et le matériau de base pour les traitements de boruration d'une durée de quatre heures et huit heures.

### III.1. Procédure expérimentale

#### III.1.1. Composition chimique et structure du matériau de base (substrat)

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.

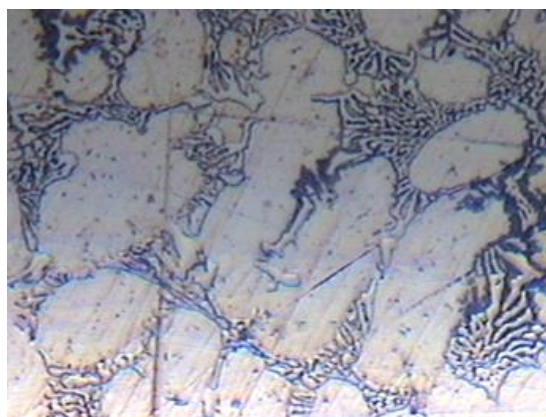
Les analyses au spectromètre ont été pratiquées sur des surfaces rendues planes après l'enlèvement de quelques millimètres par rectification sous arrosage.

La structure typique de ces fontes, avec des carbures de chrome de type  $M_7C_3$  ( $(Fe, Cr)_7C_3$ ) et une matrice austénitique obtenue après solidification (état brut de coulée) est représentée à la figure III.1.

Désignation	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Cu%
Pourcentage	2,82	0,57	0,40	0,03	0,03	12,87	0,09	0,30	0,17

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

Cette nuance appartient à la classe FBCr12MoNi selon la norme AFNORNFA32-401 ou à la classe II.A selon la norme ASTM A532-75 des fontes alliées au chrome – molybdène.



**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)

### III.1.2. Préparation des échantillons pour la boruration

#### III.1.2.1. Découpage

Les échantillons bruts de coulée utilisés pour la boruration ont été obtenus en découpant des barres cylindriques coulées chez ALFET (Algérienne des fonderies) de Tiaret.

Le découpage a été réalisé par une tronçonneuse (figure III.2) du laboratoire de génie mécanique de l'université de Laghouat. (Figure III.3) illustre les échantillons découpés en fonte blanche ayant des dimensions de 25x8 mm.



Figure III.2. Tronçonneuse utilisée pour le découpage des échantillons



Figure III.3. Échantillons destinés à la boruration

#### III.1.2.2. Polissage des échantillons

Toutes les pièces ont été polies à l'aide de la polisseuse représentée sur la figure III.4, 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 différentes granulométries, qui passait de 220 à 2500.

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 boruration.



Figure III.4. Polisseuse à double disque

### III.1.2.3. Poudre utilisée pour la boruration (solide)

La poudre (cément) de boruration de la figure III.5 utilisée pour l'enrichissement superficiel en bore des échantillons déjà préparés est une poudre équivalente à la poudre (kabor 2), constituée 5% de fluoroborate de sodium ( $\text{NaBF}_4$ ) comme activateur, de 5% carbure de bore ( $\text{B}_4\text{C}$ ) comme source de bore et de 90% carbure de silicium ( $\text{SiC}$ ) comme diluant. Le tableau III.2 résume les compositions de ces poudres et les paramètres de boruration (température et temps de boruration) pris en considération dans cette étude.

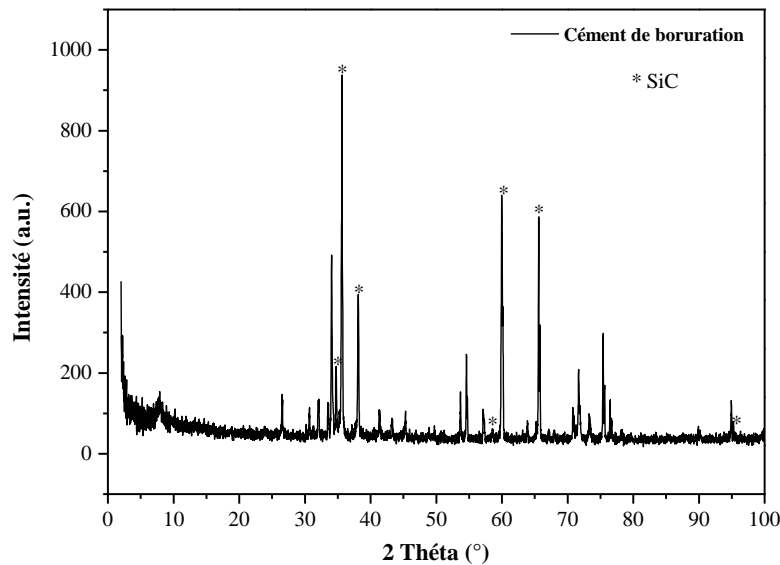


Figure III.5. Poudre de boruration

Boruration solide	Activateur	Source de bore	Diluant	Température	Temps
Traitement1	5% NaBF <sub>4</sub>	5% B <sub>4</sub> C	90% SiC	950C°	4 Heures
Traitement2	5% NaBF <sub>4</sub>	5% B <sub>4</sub> C	90% SiC	950C°	8 Heures

**Tableaux III.2 :** Compositions des poudres utilisées et les conditions du traitement de boruration

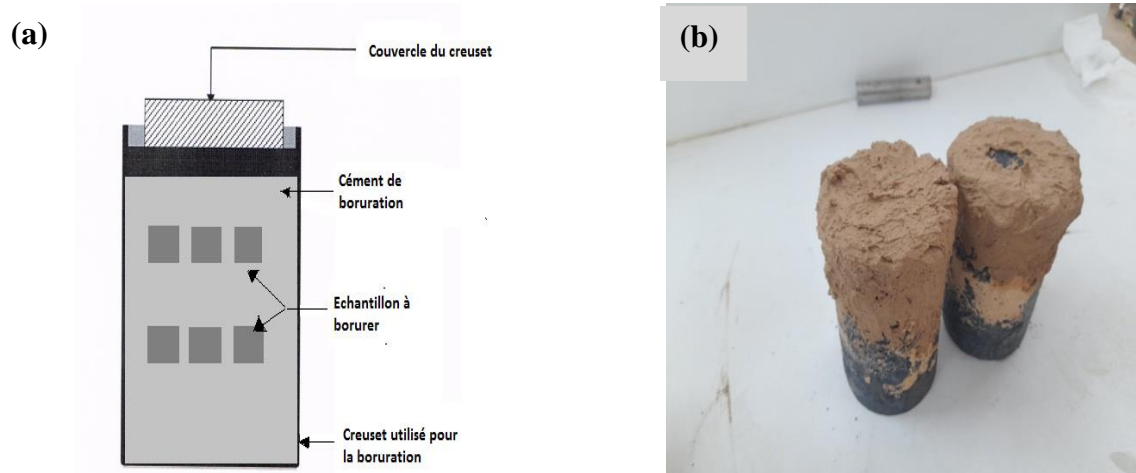
Une analyse par DRX de la poudre ou du ciment de boruration utilisé est représentée à la figure III.6. Ces analyses ont été réalisées au laboratoire synthèse et catalyse de l'université de Tiaret.



**Figure III.6.** Spectre DRX de la Poudre de boruration

#### III.1.2.4. Procédure de boruration des échantillons

Les échantillons sont placés dans un creuset cylindrique en acier inoxydable (figure III.7-a) de façon à permettre un contact intime entre les échantillons et la poudre de boruration pour assurer suffisamment d'élément diffusant autour de tous les échantillons, et d'obtenir une couche de boruration homogène ayant une épaisseur régulière à travers toutes les surfaces des échantillons traités. La figure III.7-b montre les creusets préparés pour être introduits dans le four.



**Figure III.7 (a) :** Disposition des échantillons à l'intérieur du creuset  
**(b)** creuset préparé pour être introduits dans le four

Les échantillons ont été borurés dans un four à moufle de la société Vecstar Ltd (figure III.8) pour une période de 4 heures et de 8 heures, avec une température constante de 950°C. A la fin de la boruration, les creusets sont retirés du four être refroidies à l'air.



**Figure III.8.** Four à moufle (Laboratoire de génie mécanique / Université de Laghouat)

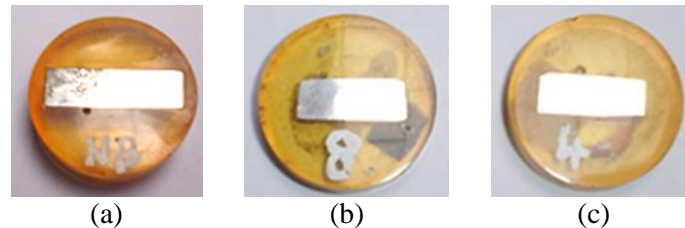


## III.2. Techniques expérimentales

### III.2.1. Examens métallographiques

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

Dans un premier temps les échantillons sont enrobés dans une résine comme le montre la figure III.9.



**Figure III.9.** Echantillons enrobés pour les examens métallographiques

(a) Non boruré, (b) Boruration pendant 8 heures, (c) Boruration pendant 4 heures

L'étape suivante consiste à polir (polissage) ces échantillons désormais enrobés 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 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.

### III.2.2. Microscope métallographique

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

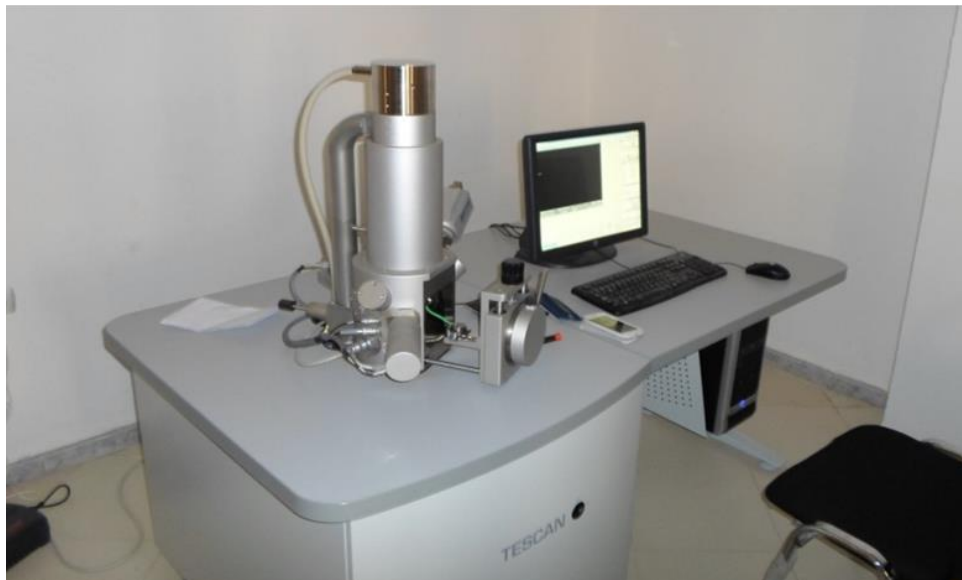




**Figure III.10.**Microscope optique de type Hand WETZLAR

### III.2.3. Microscope Electronique à Balayage

Le MEB de la figure III.11 était utilisé dans cette étude, il offre une résolution beaucoup plus élevée que le microscope optique, permettant de visualiser des détails extrêmement fins de l'échantillon. Il est associé à la Spectroscopie de Dispersion d'Énergie des Rayons XEDX ou (EDS), qui permet d'effectuer des analyses en profondeur de l'échantillon et d'identifier les éléments chimiques présents dans l'échantillon et de cartographier leur répartition spatiale.



**Figure III.11.**Microscope électronique à balayage

### III.2.4. Mesure de l'épaisseur des couches borurées

La mesure de l'épaisseur des couches borurées consiste à mesurer les longueurs des aiguilles (ou les dents) sur un microscope optique ou un microscope électronique à balayage (MEB) à trois, quatre ou cinq endroits différents et l'épaisseur moyenne de la couche borurée est calculée comme la moyenne arithmétique de ces mesures.

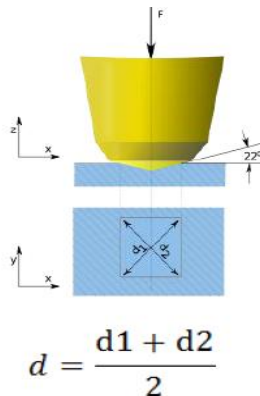
### III.2.5. Microdureté

Les mesures de la microdureté ont été faites à l'université de Laghouat aux niveaux du laboratoire de génie des procédés. L'appareil utilisé est de marque « INNOVATEST » comme dans la figure III.12.



Figure III.12. Appareil de mesure de la microdureté

Le pénétrateur est un diamant en forme de pyramide à base carrée dont l'angle des faces est de  $136^\circ$ . La pyramide en diamant est amenée en contact avec la surface à essayer, charger cette pyramide graduellement, sans choc et sans vibration, à la charge maximum fixé.



$$d = \frac{d1 + d2}{2}$$

Figure III.13. Exemple typique d'une empreinte Vickers

L'empreinte a la forme presque d'un carré ; on mesure les deux diagonales  $d_1$  et  $d_2$  de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur  $d$  en effectuant la moyenne de  $d_1$  et  $d_2$  (figure III.13). C'est  $d$  qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées.

La dureté HV est le rapport de la charge appliquée sur le pénétrateur à la surface de l'empreinte laissée par la pyramide. C'est-à-dire [64] :

$$HV \cong 0,1854 \cdot \frac{F}{d^2}$$

HV = Dureté Vickers  
F = Force appliquée [N]  
d = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]

### III.2.6. Essais de 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 au laboratoire des essais mécaniques d'ALFET de Tiaret. Ces essais étaient effectués à l'aide d'un d'uro-mètre du type HP250 (220 V / 50 HZ / 6 A) représenté sur la figure III.14. Il est doté d'un pénétrateur conique constitué par un diamant. Ce cône ayant un angle au sommet de  $120^\circ$  est arrondi à son sommet ( $R = 0.2$  mm). La charge d'essai est de 1500 N (150 kgf).

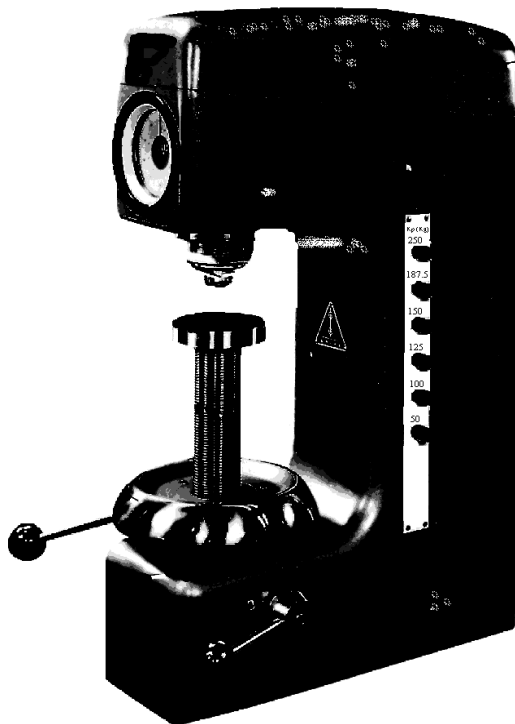


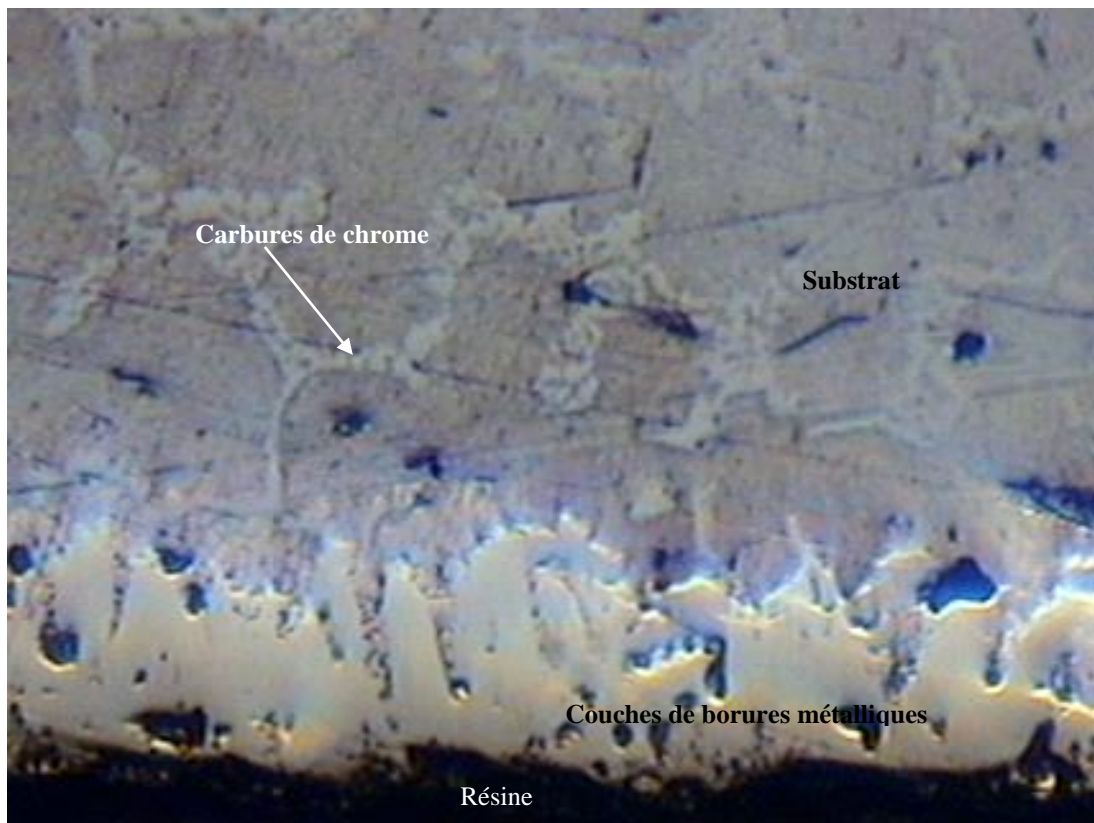
Figure III.14. D'uro-mètre pour mesurer la dureté HRC

### III.3. Caractérisation des couches borurées

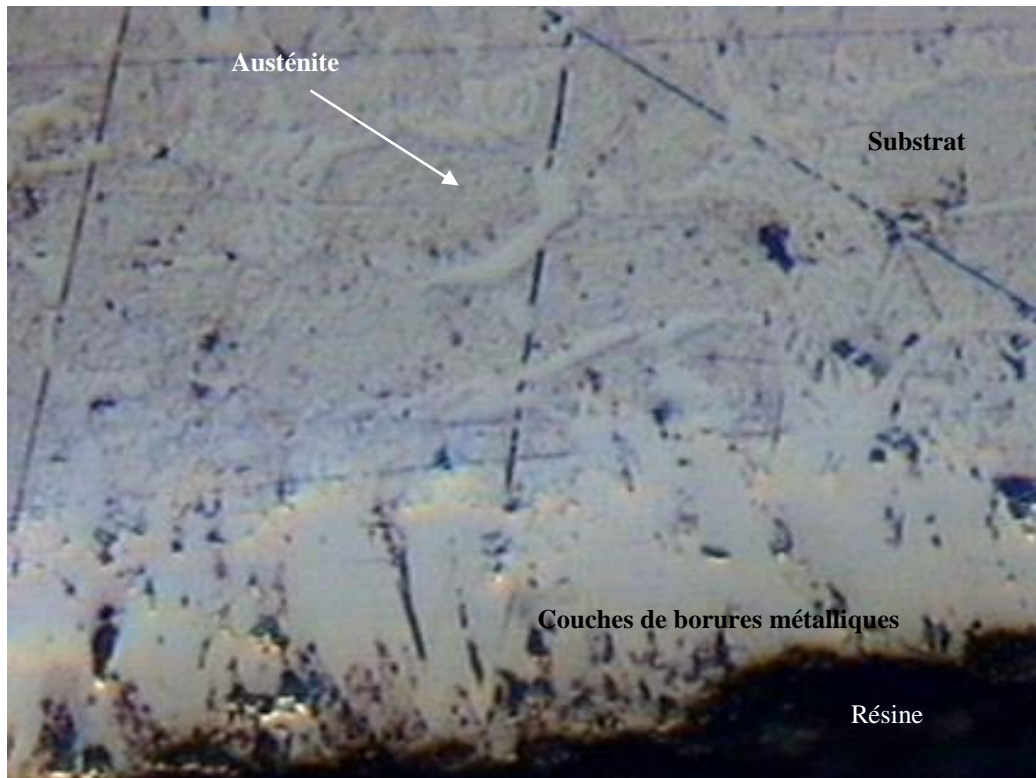
#### III.3.1. Résultats de l'analyse par le microscope optique

Les couches obtenues par boruration pendant une durée de 4 heures et 8 heures à 950°C sont représentées sur les figures III.15 et III.16 respectivement.

Les couches de borures métalliques sous forme d'une structure aciculaire sont clairement visibles au microscope optique avec une épaisseur plus importante pour les échantillons traités pendant 8 heures.



**Figure III.15.** Echantillon boruré à 950°C, pendant une durée de 4 heures



**Figure III.16.** Echantillon boruré à 950°C, pendant une durée de 8 heures

### III.3.2. Résultats de l'analyse par le MEB

Pour une caractérisation plus détaillée des couches de borure obtenues dans ce travail, la microscopie électronique à balayage (MEB) est utilisée pour examiner les couches déposées pendant une durée de 4 heures (figure III.17) et pendant une durée de 8 heures (figure III.18). Ces techniques permettent d'obtenir des images à plus haute résolution, offrant une meilleure visualisation des structures et des caractéristiques des couches de borure.

Dans ce cas on peut aussi distinguer facilement la couche borurée du reste du substrat par la différence de coloration et de contraste des différentes phases. La couche borurée obtenue a une forme aciculaire (dentelée) que se caractérise par des cristaux allongés en forme d'aiguilles ou de dents qui sont orientés perpendiculairement à la surface des échantillons traités.

Une bicouche de deux composés intermétalliques de fer et de bore avec, pour couche supérieure, du FeB, et une seconde couche de Fe<sub>2</sub>B se forment lors de la boruration à la température de 950°C, caractérisée par une dureté élevée et une résistance à l'usure. L'épaisseur des couches obtenues varie en fonction du temps et diffère pour les deux composés.



Le chrome présente une grande affinité pour le bore, il favorise la formation de la phase FeB au détriment de la phase Fe<sub>2</sub>B pour des teneurs croissantes en chrome. L'augmentation de la teneur en carbone réduit aussi l'épaisseur de la couche borurée.

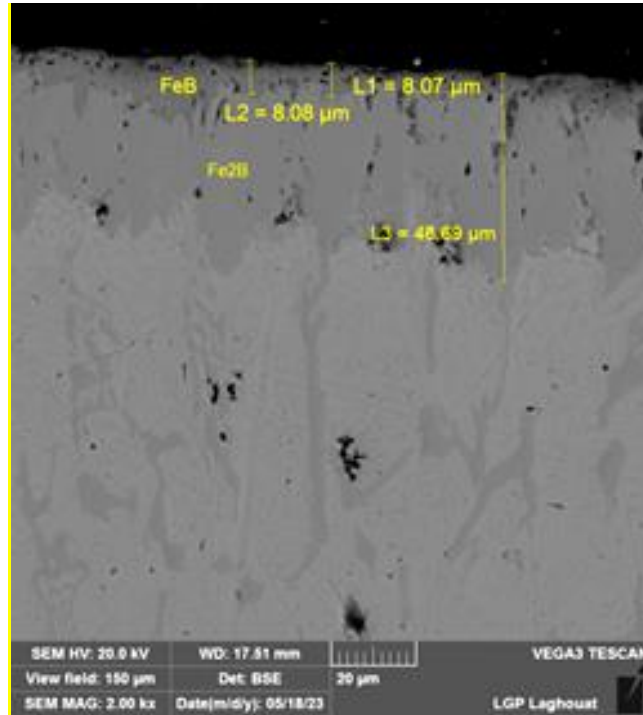


Figure III.17. Echantillon boruré à 950°C pendant 4 heures (Photo MEB)

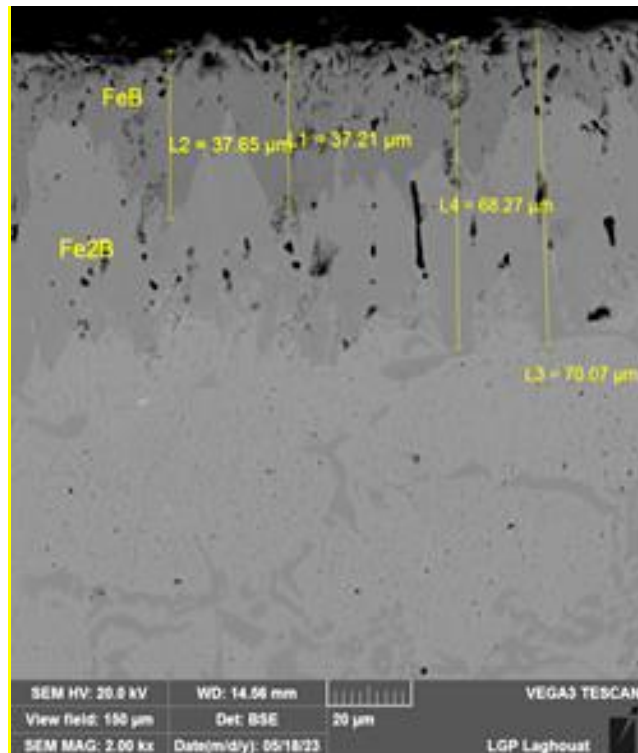


Figure III.18. Echantillon boruré à 950°C pendant 8 heures (Photo MEB)

L'EDS (ou EDX) permet d'identifier les éléments chimiques présents dans un échantillon, en mesurant les énergies des rayons X émis lorsqu'un échantillon est bombardé par un faisceau d'électrons. Elle permet de réaliser à la fois une analyse qualitative (quels éléments sont présents) et quantitative (combien de chaque élément est présent).

Les analyses EDS du substrat soulignent la présence d'un pourcentage élevé de chrome et de carbone (point 2, sur les spectres EDS) sur les échantillons borurés pendant 4 et 8 heures. La présence de ces deux éléments permet de confirmer la présence de carbures de chrome secondaires de type  $M_7C_3$  après coulée (tâches noires sur les figures).

Une autre raison, est que la solubilité du carbone est négligeable dans les borures, le carbone est rejeté au cœur du substrat lors de la croissance de la couche borurée entraînant la formation d'une sous-couche riche en carbone et en borocarbure  $Fe_3(B,C)$  et  $Fe_{23}(B,C)_6$ .

D'autre part, une analyse quantitative des éléments présents dans le substrat met en exergue la diminution de la quantité du chrome et du carbone (Point 1 sur les figures III.19 et III.20) et une augmentation du pourcentage du Fer, qui atteint les 80%. Cela nous permet de confirmer la présence de l'austénite qui a une structure cristalline spécifique du fer et de ses alliages après coulée.

Il convient de souligner que la détection de germanium (Ge) et de fluor (F) dans l'analyse EDX peut résulter d'une contamination accidentelle, pouvant provenir de sources externes telles que

des produits de nettoyage ou des gaz utilisés en laboratoire, etc. ou de la présence du fluor dans la poudre (cément) de boruration.

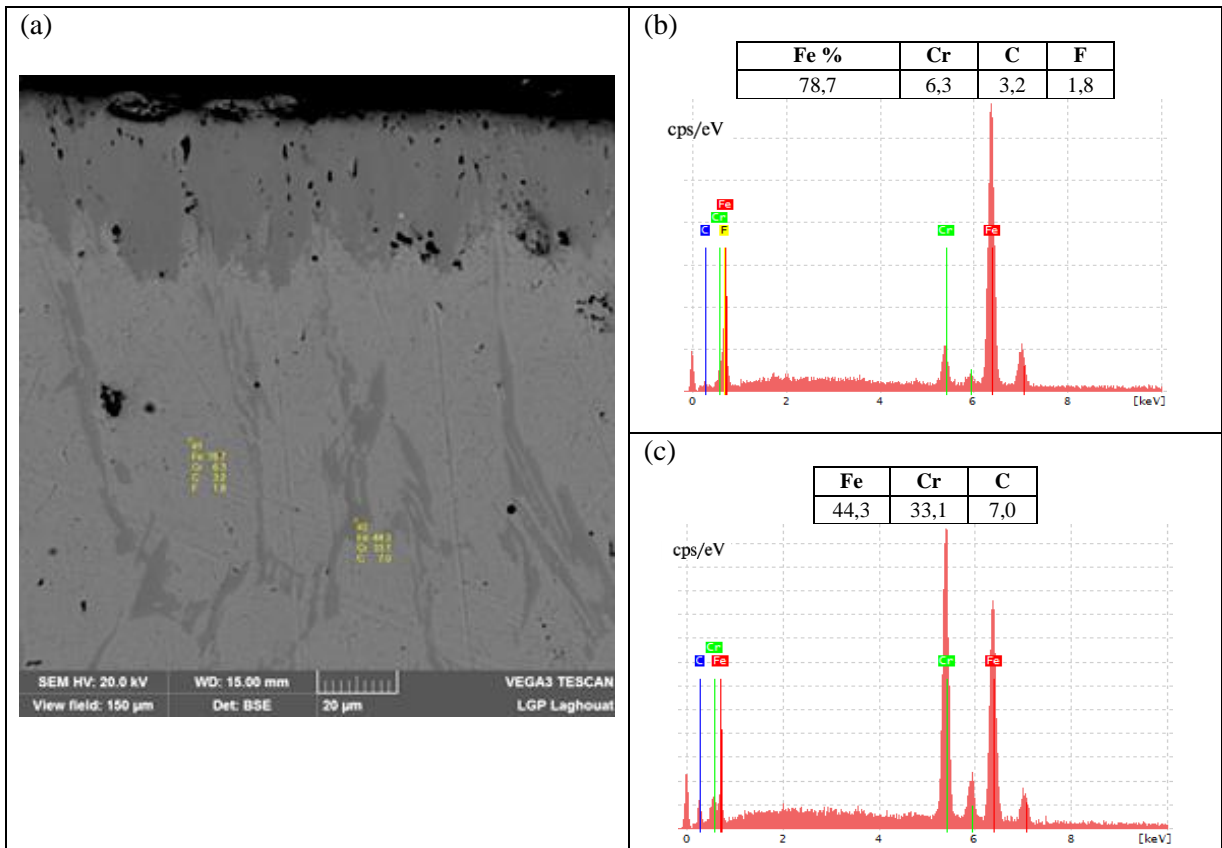


Figure III.19. (a) Boruration, 4 heures, (b) Spectre EDS, point 1, (c) Spectre EDS, point 2

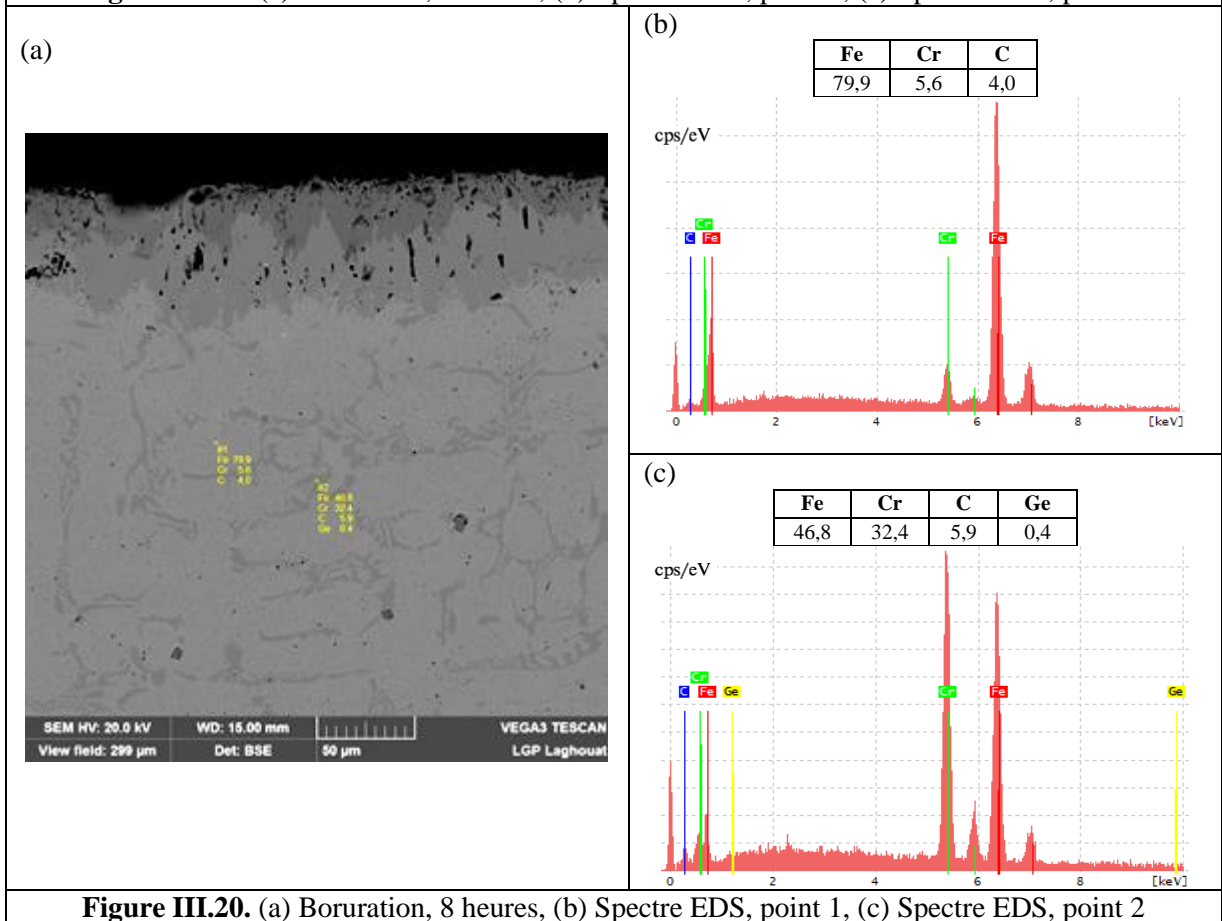


Figure III.20. (a) Boruration, 8 heures, (b) Spectre EDS, point 1, (c) Spectre EDS, point 2



### III.3.3. Mesure de l'épaisseur des couches borurées

L'épaisseur moyenne de la couche de borure formée sur la surface peut être déterminée à l'aide du microscope optique ou du microscope électronique à balayage (MEB) (figure III.17 et III.18). L'épaisseur est estimée en comparant les longueurs de deux aiguilles (plus profonde et le moins profonde) et de prendre la longueur moyenne de ces deux aiguilles comme une valeur moyenne de l'épaisseur de la couche borurée à cet endroit.

Dans la figure III.17, L3 correspond à la mesure de l'épaisseur totale de la couche borurée. Ce qui signifie que :  $E_{\text{totale}} = E_{\text{FeB}} + E_{\text{Fe}_2\text{B}} = L3 = 48,69 \mu\text{m}$  (boruration pendant 4 heures)

Donc, l'épaisseur de la couche Fe<sub>2</sub>B,  $E_{\text{Fe}_2\text{B}} = 48,69 - (L1+L2)/2 = 48,69 - 8,075 = 40,615 \mu\text{m}$ .

Pour la boruration pendant 8 heures (figure III.18),  $E_{\text{totale}} = E_{\text{FeB}} + E_{\text{Fe}_2\text{B}} = (L3+L4)/2 = 69,17 \mu\text{m}$ .

D'où, l'épaisseur de la couche Fe<sub>2</sub>B,  $E_{\text{Fe}_2\text{B}} = 69,17 - (L1+L2)/2 = 69,17 - 37,43 = 31,74 \mu\text{m}$ .

Ces valeurs sont résumées dans le tableau III.3 et représentées sur la figure III.21.

Temps de boruration en heures	Nature des couches obtenues	Epaisseur moyenne des couches borurées (μm)
4 heures	FeB	8,075
	Fe <sub>2</sub> B	40,615
8 heures	FeB	37,43
	Fe <sub>2</sub> B	31,74

Tableau III.3. Epaisseur des couches borurées

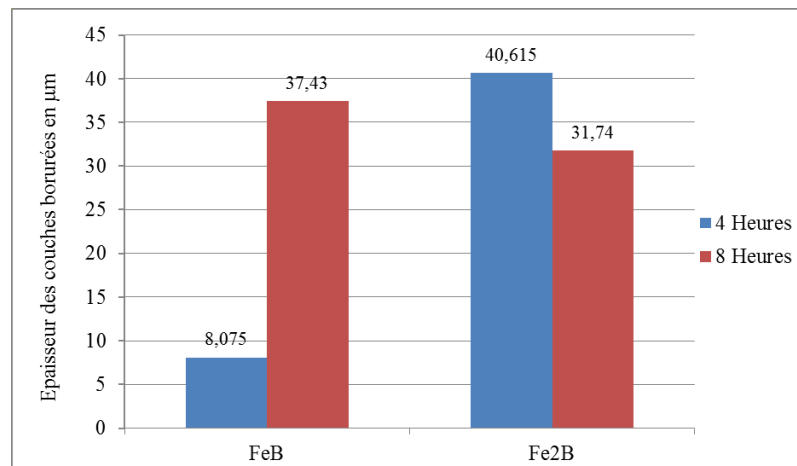


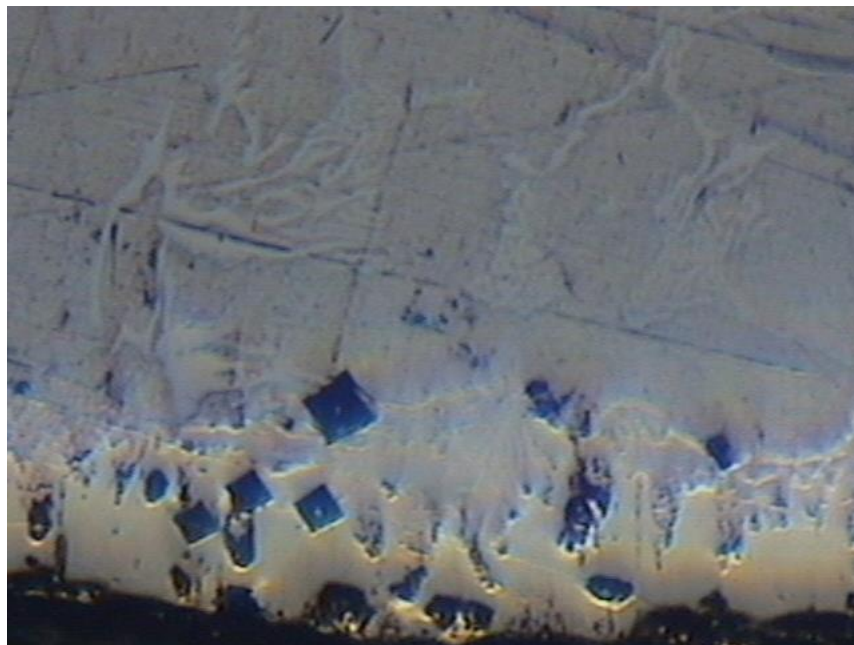
Figure III.21. Epaisseur des couches borurées (μm) en fonction de la durée de boruration en heures.

Une augmentation de 78% de l'épaisseur de la phase de borures FeB est constatée lorsque la durée de la boruration est prolongée de 4 à 8 heures. Parallèlement, une diminution de 22% de l'épaisseur de la phase de borures Fe<sub>2</sub>B a été observée pour les mêmes périodes.

La présence élevée de chrome dans le substrat pourrait être responsable de cette diminution. En effet, le chrome a une forte affinité pour le bore et favorise la formation de la phase FeB plutôt que la phase Fe<sub>2</sub>B. Ainsi, lorsque la durée de boruration est prolongée, il est possible que davantage de chrome se lie au bore, conduisant à une augmentation de l'épaisseur de la phase FeB et à une diminution de la phase Fe<sub>2</sub>B. Il convient de noter que la durée de boruration influence également cette régression.

### **III.3.4. Microdureté des couches borurées**

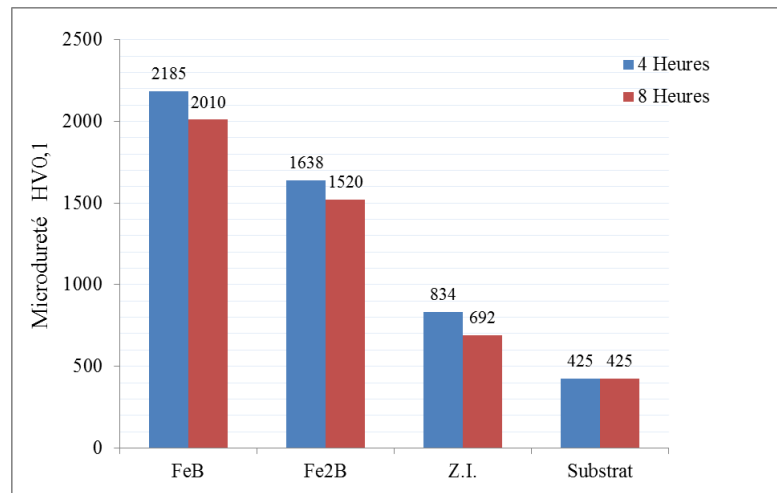
Vu que le traitement de boruration conduit à des zones différentes à partir de la surface vers le substrat traité, des mesures de microdureté ont été effectuées dans les couches borurées et dans le substrat. Les mesures de microdureté des phases ont été prises dans la section transversale des échantillons (figure III.22) et plus précisément dans la zone FeB, Fe<sub>2</sub>B, la zone intermédiaire (entre le substrat et les couches de borures) et dans le substrat. Les résultats de ces mesures sont assemblés dans le tableau III.4 et illustrés sur la figure III.23. Une charge de 0,1 kgf appliquée pendant 20 secondes est considérée pour tous les essais réalisés (c'est à dire on mesure la dureté HV<sub>0,1</sub>).



**Figure III.22.** Empreinte Vickers prélevée dans les différentes zones considérées

Temps de boruration en heures	Zones considérées	Dureté Vickers HV <sub>0,1</sub>
4 heures	FeB	2185
	Fe <sub>2</sub> B	1638
	Interface (substrat-couche borurée)	834
	Substrat	425 (44 HRC)
8 heures	FeB	2010
	Fe <sub>2</sub> B	1520
	Interface (substrat-couche borurée)	692
	Substrat	425

**Tableau III.4.** Résultats de la dureté HV<sub>0,1</sub> Prélevés dans les différentes zones



**Figure III.23.** Microdureté HV<sub>0,1</sub> dans le substrat et les zones borurées

Les résultats indiquent que la dureté du substrat a été considérablement améliorée à la suite du traitement de boruration réalisé pendant une durée de 4 heures et 8 heures. La dureté est presque multipliée par 3,5 à 5, passant de 425 HV<sub>0,1</sub> pour la fonte non traitée aux alentours de 1550 pour la phase Fe<sub>2</sub>B et de 2100 pour la phase FeB.

L'amélioration de la dureté est attribuée à la formation de deux composés intermétalliques de bore dans la couche superficielle du matériau, le FeB et Fe<sub>2</sub>B, observés et analysés par microscopie optique et par MEB. Ces composés sont généralement très durs, ce qui contribue à renforcer le substrat et à augmenter sa résistance à l'usure et à l'abrasion.

Nous remarquons que la phase FeB (très dure) présente des duretés supérieures que la phase Fe<sub>2</sub>B (plus mou ou plus élastique) pour les durées de 4 et 8 heures.

De plus, le pourcentage élevé de chrome, peut favoriser la formation d'espèces comme le CrB ou le Cr<sub>2</sub>B qui accroissent la dureté. Ces composés peuvent être décelés par DRX ; chose qui n'a pas été réalisé dans ce travail par manque de moyens.

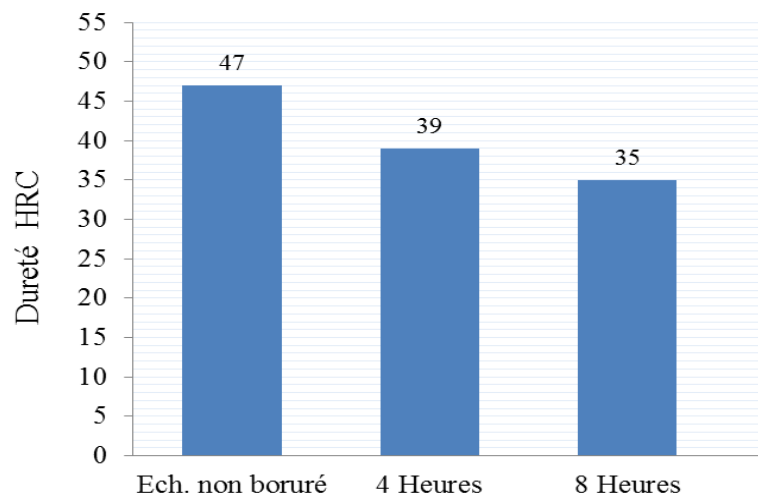
### III.3.5. Résultats de la dureté HRC des couches borurées

Les résultats de dureté HRC obtenus pour les échantillons borurés pendant 4 et 8 heures sont comparés à celles de l'échantillon non boruré (substrat à l'état brut de coulée) et ils sont illustrés sur la figure III.24.

L'augmentation de la période de boruration entraîne une réduction de la dureté HRC du matériau de base non boruré (substrat). Cette réduction représente une baisse de 17% lorsque la boruration dure 4 heures, mais elle devient plus significative et atteint 25% lorsque la boruration est prolongée à 8 heures.

Une durée prolongée de 8 heures a un effet plus important sur la diminution de la dureté HRC. Cette observation est également valable aux mesures de microdureté HV<sub>0,1</sub>.

La diminution de la dureté HRC du substrat non boruré peut résulter de la température élevée et de la durée prolongée du processus de boruration. Ces deux facteurs peuvent provoquer des altérations significatives dans la structure interne du matériau, ce qui affaiblit sa résistance globale et entraîne une réduction de sa dureté.



**Figure III.24.** Dureté HRC de l'échantillon non boruré et des échantillons borurés pendant une durée de 4 et 8 Heures.

## Conclusion générale

La boruration est un procédé thermochimique de diffusion, elle est réalisée dans ce travail grâce à la technique de "pack cementation" ou "cémentation en caisse" en utilisant un ciment en poudre constitué de 90% SiC (carbure de silicium), de 5% B<sub>4</sub>C (carbure de bore) et de 5% de NaBF<sub>4</sub>(Fluoroborate de Sodium).

Les traitements de boruration sont effectués à la température de 950C° pendant une durée de quatre heures et huit heures.

Dans cette étude, différentes techniques d'analyse métallographique ont été utilisées, notamment la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage (MEB), ainsi que des mesures de l'épaisseur et de la microdureté des phases formées. Les résultats obtenus à partir de ces analyses nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

↳ Les études métallographiques révèlent la présence d'une bicouche de borures (FeB et Fe<sub>2</sub>B) sous forme d'aiguilles dentelées après un traitement de 4 heures et 8 heures.

↳ L'épaisseur des couches FeB croît davantage avec le temps de boruration. La phase de borures Fe<sub>2</sub>B présente une régression de l'épaisseur en passant de la durée de traitement de 4 à 8 heures.

↳ L'épaisseur de la couche de borure FeB augmente de 78% en passant d'une boruration de 4 heures à une boruration de 8 heures. Elle diminue de 22% pour la phase Fe<sub>2</sub>B.

↳ La prolongation de la durée de boruration favorise la formation de la phase FeB et entraîne une diminution de la phase Fe<sub>2</sub>B, en particulier en présence de chrome.

↳ La dureté diminue graduellement de la surface au substrat, avec des valeurs plus de cinq fois supérieures à celles du substrat pour la phase FeB et environ 3,5 fois supérieures à celles du substrat pour le composé intermétallique Fe<sub>2</sub>B. Ces composés durs contribuent à renforcer le substrat et à augmenter sa résistance à l'usure et à l'abrasion.

## **Perspectives**

Ce travail a permis de mettre en évidence l'efficacité de la boruration au regard de l'amélioration de la dureté d'une fonte blanche alliée au chrome.

↳ Dans ce même contexte d'autres propriétés peuvent être étudiées : comme la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion de la fonte blanche borurée.

↳ Des analyses DRX (Diffraction par rayon X) et EDX des couches borurées peuvent nous fournir plus d'informations sur les différents composés intermétalliques présents (FeB, Fe<sub>2</sub>B, CrB, Cr<sub>2</sub>B, ...etc.).

↳ Des traitements thermiques peuvent être pratiqués après le traitement de boruration, ce qui va contribuer plus à améliorer les propriétés mécaniques évoquées au paravent.

↳ Un travail sur la composition de la poudre peut être envisagé en utilisant d'autres poudres comme source de bore.

↳ D'autres techniques telles que la boruration liquide et gazeuse peuvent être explorées, mais il est important de souligner qu'elles nécessitent une exécution minutieuse dans des conditions spécifiques pour obtenir les résultats souhaités. Ces méthodes doivent être effectuées avec précision et dans des environnements contrôlés afin d'optimiser les effets de durcissement de surface, d'amélioration de la résistance à l'usure et des propriétés chimiques (corrosion).

↳ Pour terminer, une comparaison avec d'autres matériaux borurés serait intéressante à réaliser et ce, avec les mêmes conditions opératoires que celles employées dans ce travail.

## **Références Bibliographiques**

- [1] Bakhouché Siham, Recherche bibliographique sur les propriétés mécaniques d'une fonte fortement alliée au chrome utilisée dans l'industrie minière), mémoire de master, université de Bejaia, 2020.
- [3] Michel colombe, matériaux métalliques, 2 ème édition Dunod, France, p. 309 2008.
- [4] R.B.Gundlach,D.V.Doane, Alloy cast irons, ASMHandbook,1,150(2005).
- [5] W. Zhou, H. Zhu, D. Zheng, H. Zheng, Q. Hua, Q. Zhai, Niobium alloying effect in high carbon equivalent grey cast iron, China Foundry 8(1), 36 (2011).
- [7] Beldjoudi badis , influence des traitement thermiques de revenus sur les propriétés mécaniques d'une fontes fortement alliée au chrome, université de Bejaia, 2017.
- [8] Elbied Noureddine, Développement de deux nuances de la fonte à haute teneur en chrome, mémoire d'ingénieur d'état, université FES, 2015.
- [10] Park Ik-Min, K.S. Shin, Microstructure and wear properties of low-alloy phosphoric gray cast irons, Met. Mater. Int, 1, 63 (1995).
- [12] A. Vadiraj, M. Kamaraj, V.S. Sreenivasan, Wear and friction behavior of alloyed gray cast iron with solid lubricants under boundary lubrication, Tribol. Int., 44, 1168 (2011).
- [14] Technique de l'ingénieur M 380 ; Jean-Claude MARGERIE ; Propriétés des fontes grises ordinaires.
- [16] S. AISSAT, Amélioration des caractéristiques mécaniques du boulet de broyage, Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Chlef, 2000.
- [17] Gundlach, R.B., High alloy white irons, ASM Hand Book, Casting, 4th Edition, ASM International, pp. 679-685, 1998.
- [18] Davis, J.R., Metallurgy and properties of high alloy white irons, ASM Specially Hand Book, Cast Irons, Materials Park, OH: ASM International, pp. 107-30, 1996.
- [19] Pearce, J.T.H., High-chromium cast irons to resist abrasive wear, Foundryman, 95, pp. 156, 2002.
- [20] Tabrett, C. P., Sare, I. R., Gomashchi, M. R., Microstructure-property relationships in high-chromium white iron alloys, Int. Mater. Rev.41, pp.59–82, 1996.
- [21] Karantzalis, A.E., Lekatou, A., Kapoglou, A., Mavros, H. and Dracopoulos, V., Phase transformations and microstructural observations during subcritical heat treatments of a high-chromium cast iron, ASM International, Journal of Materials Engineering and Performance, 21, pp.,1030–1039, 2012.

- [22] Rajagopal, V., and Iwasaki, I., Wear behaviors of chromium-bearing cast irons in wet grinding, *Wear*, 154, pp. 241-258, 1992.
- [23] Ohide, T. and Ohira, G., Solidification of high chromium alloyed cast iron, *British Foundryman*, 76, pp., 7-14, 1983.
- [24] Sasaguri, N., Matsubara, Y., Hashimoto, M. and Wu, H. Q., Solidification of multi-alloyed white cast iron: type and morphology of carbides, *AFS Transactions*, 104, pp. 103-108, 1996.
- [25] ASM Handbook, Heat Treating, ASM International Handbook, 4, 10th Edition Metals Handbook, pp. 1517-1544, 1991.
- [26] Tabrett, C. P. and Sare, I. R., The Effect of heat treatment on the abrasion resistance of alloy white irons, *Wear*, 203-204, pp., 206-219, 1997.
- [27] Sare, I. R. and Arnold, B. K., The effect of heat treatment on the gouging abrasion resistance of alloy white cast irons, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26A, pp., 357-370, 1995.
- [28] ZumGahr, K. H., Doane, D. V., Optimizing fracture toughness and abrasion resistance in white cast irons, *Metall. Trans. A*, 11, pp. 613–620, 1980.
- [29] Aissat S. Safa S., Effect of subcritical treatment (tempering), Research Laboratory of Industrial Technologies, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Applied Sciences, Ibn Khaldoun University, Tiaret, Algeria.
- [30] M. M. Khrushchov, «Principles of abrasive wear», *Wear* p 69-88, April 1974.
- [31] Marc. Grenier, «Microstructure et résistance à l'usure de revêtements créés par fusion laser avec gaz réactifs sur du titane», Mémoire MSc Faculté de Sciences et Génie, Université Laval Canada, Oct 1998.
- [32] Tang X. H., Variations in Microstructure of High Chromium Cast Irons and Resulted Changes in Resistance to Wear, Corrosion and Corrosive Wear, *Wear*, vol. 267, pp. 116-121, 2009.
- [33] A. L. a. H. B. Bedolla-Jacuinde A., Kinetics of Secondary Carbides Precipitation in a High-Chromium White Iron, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 12, no. 4, pp. 371-382, 2003
- [34] Abdelkrim Kehal, élaboration de fontes blanches a haute teneur en chrome et étude de leur résistance à l'usure, mémoire de magister, université de Blida, 2008.
- [35] R. K. Laird George, *Abrasion-Resistant Cast Iron Handbook*, Des Plaines: American Foundry Society, ISBN 0-87433-224-9., 2000. C. D. a. P. J. T. H. Carpenter S. D., XRD and Electron Microscope Study of an As-Cast 26.6%Cr .



- [36] B, Gérard. M, Henri. Revêtements et traitement de surface. Approche technologique Article Technique de l'ingénieur (2005).
- [37] Bouzeghaia N., Cours Traitements de surfaces, Université Batna 2.
- [38] A. Proner, Revêtements par projection thermique, technique de l'ingénieur.
- [40] Technologies propres de traitement de surfaces par voie sèche Note de veille technique (2004)
- [41] H. Danc, A, Motellabzadeh. H, Cimenoglu, Thermo chemical boriding of INCONEL 718 Super alloy, Academic Journal of Science (2013).
- [42] P, Dimitris. Traitement superficiels par faisceaux à haute densité d'énergie Article technique de l'ingénieur (1993).
- [43] G, René. Traitements et revêtement de surface à usage tribologique Article Technique de l'ingénieur (2011).
- [44] L. Louis. Revêtement métallique par voie électrolytique. Introduction Article Technique de l'ingénieur (1973)
- [45] Fiche Technique Glossaire appliqué au Traitement thermique (2006)
- [46] L, Claude. Traitement thermique superficiels – Présentation et classification Article Technique de l'ingénieur (2011)
- [47] G, Dominique. L, Claude. T Christian, Pratique du traitement thermochimique Article Technique de l'ingénieur
- [48] G, Dominique. L, Claude. T Christian. Pratique du traitement thermochimique Article Technique de l'ingénieur
- [49] I. Lakhtine, Métallographie et traitements thermiques des métaux, Editions MIR, MOSCOU, Deuxième édition revue et complétée (1978)
- [50] khaldi, L'effet de traitement de boruration d'un acier au carbone XC38 sur la résistance à la corrosion, mémoire de master, Université Ammar Thelidji – Laghouat, 2019.
- [51] N. Bouaouadja, Matériaux Tome1 matériaux métalliques, OPU, p278-279, (1992).
- [52] Casadesus P., Frantz C., Gantois M., Boriding with a thermally instable gas diborane, Metallurgical transactions A, 1979, 10A, 1739-1743.
- [53] Casadesus P., Frantz C., Gantois M., Etude structurale des couches borurées élaborées par bombardement ionique sur le fer et les aciers au carbone, Mémoires Scientifiques de la Revue de Métallurgie, 1979, 9-21.
- [54] Pchelkina M. A., Lakhtin Yu. M., Boronizing in a boron trichloride atmosphere, Metal Science and Heat Treatment of metals, 1960, Vol. 2, 397-398.

- [55] Zhigach A. F., Antonov I. S., Pchelkina M. A., Yukin G. I., Dobrodeev A. S., Mataeev V. N., Surface impregnation of steel with boron from the gas phase, *Metal Science and Heat treatment of Metals*, 1959, vol. 1, 51-56.
- [56] Ornig H., Schaaber O., Observation of surface boriding of steel, *Harterei-Technische Mittenlungen*, 1962,17, (3), 131-140.
- [57] Nogtev N. N., Ragozin Yu. N., Electrolytic boriding in boric anhydride, *Metal Science and Heat Treatment of metals*, 1962,4, 523.
- [58] Allaoui O., Boruration sans électrolyse des aciers dans des sels fondus et caractérisation des couches borurées obtenues, *Mémoire de Magister*, 1995, ENP d'Alger.
- [59] Lyakhovich L.S., *Traitement thermochimique des métaux et alliages*, Aide-mémoire, Ed. Metallurgia, 1981, 80-110 (enrusse).
- [60] Dearnly P.A., Bell T., Engineering the surface with boron based materials, *Surface Engineering*, Vol. 01, issue 3, 1985, Pages 303-317
- [61] Kunst H., Schaaber O., Observations on surface boronization of steel, *Harterei-TechnischeMittenlungen*, 1967, Vol. 22, 275-292.
- [62] Degussa, Boriding with durferrit products, 1982, *Documentation technique Degussa*
- [63] Goeuriot P., Thévenot F., Bouaoudja N., Fantozzi G, Boruration des cermets WC-Co et WC-Co-N, *Traitement thermique*, 1986, 205, 13-18.
- [64] H. Kunst , O. Schaaber, Observations on surface boronization of steel *Harterei-TechnischeMittenlungen*, Volume 22, 1967, pp. 275-292.

## Webographie

- [2] [https://fr.wikiversity.org/wiki/M%C3%A9tallurgie\\_g%C3%A9n%C3%A9rale/Les fontes](https://fr.wikiversity.org/wiki/M%C3%A9tallurgie_g%C3%A9n%C3%A9rale/Les_fontes) cité le 02/05/2023 à 23:15.
- [6] <http://thomas-eyraud.e-monsite.com/pages/les-fontes-blanches.html>.cité le 02/5/2023 à 00:03.
- [9]<https://material-properties.org/fr/quest-ce-que-la-fonte-blanche-fonte-blanchedefinition/>cité le 08/05/2023 à 13:00.
- [11][https://fr.wikiversity.org/wiki/M%C3%A9tallurgie\\_g%C3%A9n%C3%A9rale/Les fontes](https://fr.wikiversity.org/wiki/M%C3%A9tallurgie_g%C3%A9n%C3%A9rale/Les_fontes). cité le 10/05/2023 à 2 :30.
- [13]<https://metalblog.ctif.com/2021/03/01/les-fontes-a-graphite-lamellaire-et-spheroidal/>cité le 14/05/2023 à 10:30.
- [15] [https://www.researchgate.net/figure/Observations-des-microstructures-des-fontes-GS-a-et-GV-b-par-Microscopie\\_fig31\\_319469030](https://www.researchgate.net/figure/Observations-des-microstructures-des-fontes-GS-a-et-GV-b-par-Microscopie_fig31_319469030) cité le 20/05/2023. cité 06-05-2023 à 2:00
- [39] Document d'internet <http://blog.pacemetal.fr/> consulté le (16/05/2023) à 9:00

## Résumé

La boruration est un procédé thermochimique qui consiste à diffuser du bore à la surface d'un matériau. Ce traitement est largement utilisé dans divers secteurs industriels pour améliorer la dureté, la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion des matériaux.

Dans cette étude, la boruration a été utilisée pour enrichir la couche superficielle d'une fonte blanche alliée au chrome. Le traitement a été effectué à une température de 950°C pendant 4 et 8 heures.

Pour évaluer la qualité des couches borurées obtenues, une caractérisation a été réalisée à l'aide de techniques telles que la microscopie optique, le microscope électronique à balayage et la microdureté.

Les résultats de cette étude montrent la présence d'une bicouche de FeB et Fe<sub>2</sub>B à la surface du matériau. L'épaisseur et la dureté de ces couches varient en fonction de la durée de boruration.

**Mots clés :** Boruration, fonte blanche, FeB, Fe<sub>2</sub>B, microdureté.

## ملخص

الحشو (بالبور) هي عملية كيميائية حرارية تتكون من نشر البورون على سطح المادة. يستخدم هذا العلاج على نطاق واسع في مختلف القطاعات الصناعية لتحسين الصلابة ومقاومة التآكل ومقاومة التآكل للمواد. في هذه الدراسة، تم استخدام الحشو (بالبور) لإثراء الطبقة السطحية من الحديد الزهر الأبيض المخلوط بالكروم. تم إجراء المعالجة عند درجة حرارة 950 درجة مئوية لمدة 4 و 8 ساعات. لتقييم جودة طبقات البورون التي تم الحصول عليها، تم إجراء التوصيف باستخدام تقنيات مثل الفحص المجهرى البصري والميكروسكوب الإلكتروني والصلابة الدقيقة. تظهر نتائج هذه الدراسة وجود طبقة ثنائية من FeB و Fe<sub>2</sub>B على سطح المادة. تختلف سماكة وصلابة هذه الطبقات حسب مدة الحشو (بالبور).

**الكلمات الرئيسية:** الحشو (بالبور)، الحديد الزهر الأبيض، الصلابة الدقيقة، FeB، Fe<sub>2</sub>B.

## Abstract

Boruration is a thermochemical process that consists of diffusing boron on the surface of a material. This treatment is widely used in various industrial sectors to improve the hardness, wear resistance and corrosion resistance of materials.

In this study, boruration was used to enrich the surface layer with white cast iron and chromium. Treatment was performed at 950°C for 4 and 8 hours.

To assess the quality of the borate layers obtained, a characterization was carried out using techniques such as optical microscopy, scanning electron microscope and micro hardness.

The results of this study show the presence of two-layer FeB and Fe<sub>2</sub>B on the surface of the material. The thickness and hardness of these layers vary according to the duration of the boruration.

**Keywords:** Boruration, white cast iron, FeB, Fe<sub>2</sub>B, micro hardness.