

République Algérienne Démocratique Et Populaire  
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



Université Saad Dahlab De Blida 1  
Faculté De Technologie  
Département De Génie Mécanique



Laboratoire D'études Et De Recherche En Technologie Industrielle LERTI

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Génie Des Matériaux

# Thème

*Traitement Thermochimique et Etude Tribologique  
d'un Acier à Outil pour Travail à froid*

**BÖHLER-K110**

Encadrée par :

- *Dr. HADDAD Adel*

Co-promoteur :

- *Mr. AKHMOUM Ahmed*

Présenté par :

- *HASSAN Adib*
- *MECHKOUR Racim*

*Promotion Juin 2021*



## ***Remercîments***

*Nous remercions tout d'abord **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné le courage, la confiance en soi, et la patience pour terminer ce travail.*

*On remercie nos parents de leurs soutiens durant nos études.*

*On tient à remercier en premier lieu, et avec toute notre gratitude, notre encadreur l'honorable **Dr. HADDAD Adel**, qui nous a fait l'honneur de diriger ce modeste travail, pour son soutien, pour le temps consacré avec nous, et pour son aimable encouragement.*

*On tient à exprimer toute notre gratitude et reconnaissance a notre Co-encadreur **AKHMOUM Ahmed Kouceila** pour son aide et ses conseils et tout le soutien qui nous a apporté.*

*On remercie les membres de jury qui nous ont honorés par leurs présences.*

*Finalement merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*



## **Résumé :**

*Un durcissement superficiel d'un acier à outil pour travail à froid BÖHLER-K110 a été réalisé par un traitement thermochimique de boruration et cémentation en phase solide à l'aide d'une poudre à base de carbure de bore ( $B_4C$ ) et une autre poudre contenant du ( $BaCO$ ), à une température de 950 °C pendant 4h et 8h.*

*Le durcissement consiste à former des borures et du ciment sur notre acier lors du traitement thermochimique où les borures formés sont de types : **FeB** et **Fe<sub>2</sub>B**.*

*Les caractérisations microstructurales ont permis de voir la morphologie des couches des deux traitements formées à l'interface avec le substrat, et d'identifier la nature des éléments qui composent ces couches. Les caractérisations mécaniques sont réalisées à l'aide des profils de micro dureté depuis la surface de l'échantillon, accompagné d'un essai tribologique de type pion sur disque.*

*Les résultats de ces caractérisations nous montrent que la couche borurée est plus dure que la couche cémentée*

## **Mots Clés :**

*Acier, Traitement thermochimique, Boruration, Cémentation, Diffusion, Tribologie, Usure.*

***Abstract :***

*Surface hardening of a BÖHLER-K110 cold work steel was carried out by a thermochemical boronizing and carburizing treatment in solid phase using a powder based on boron carbide ( $B_4C$ ) and another powder of carbon containing ( $BaCO$ ), at a temperature of  $950^\circ C$  for 4h and 8h.*

*The hardening consists in forming borides and cement on our steel during the thermochemical treatment where the borides formed is of the types: **FeB** and **Fe<sub>2</sub>B**.*

*The microstructural characterizations made it possible to see the morphology of the layers of the two treatments formed at the interface with the substrate, and to identify the nature of the elements that make up these layers. Mechanical characterizations are performed using microhardness profiles from the sample surface, accompanied by a pin-on-disk tribological test.*

*The results of these characteristics show us that the boride layer is harder than the cemented layer.*

***Keywords :***

*Steel, Thermochemical Treatment, Boronizing, Carburizing, Diffusion, Tribology, Wear.*



## *Table des matières*

Introduction Générale .....	1
<b>CHAPITRE 01</b>	
1.1 Introduction .....	3
1.2 Composition chimique des aciers .....	4
1.3 Classification des aciers .....	4
1.4 Les aciers au carbone .....	4
1.4.1 Les aciers calmés .....	5
1.4.2 Les aciers effervescents .....	5
1.4.3 Les aciers semi-calmés .....	5
1.5 Les aciers inoxydables .....	5
1.5.1 Les aciers inoxydables austénitiques .....	6
1.5.2 Les aciers inoxydables Martensitique .....	7
1.5.3 Les aciers inoxydables ferritiques .....	7
1.5.4 Les aciers inoxydables austéno-ferritiques .....	8
1.6 Les aciers à outils .....	8
1.6.1 Les aciers au carbone pour travail à froid .....	9
1.6.2 Les aciers alliés pour travail à froid .....	10
1.6.2.1 Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium .....	11
1.6.2.2 Aciers au chrome .....	11
1.6.2.3 Aciers au chrome-molybdène .....	11
1.6.2.4 Aciers au chrome-tungstène .....	11
1.6.2.5 Aciers au nickel-chrome .....	12
1.6.3 Les aciers pour travail à chaud .....	12
1.6.4 Les aciers à coupe rapide .....	13
1.7 Diagramme d'équilibre fer-carbone .....	14
1.8 Les constituants micrographiques .....	15
1.8.1 La ferrite .....	15
1.8.2 L'austénite .....	15
1.8.3 La cémentite .....	15
1.8.4 La perlite .....	16
1.8.5 Martensite .....	16

## CHAPITRE 02

2.1 Introduction .....	17
2.2 Traitement thermochimique .....	17
2.3 La Cémentation.....	18
2.4 Les différents types de Cémentation .....	18
2.4.1 Cémentation solide .....	18
2.4.2 Cémentation gazeuse .....	19
2.4.3 Cémentation par des agents liquides.....	20
2.5 La boruration .....	20
2.6 Les différents types de boruration.....	21
2.6.1 Par voie liquide.....	21
2.6.1.1 La boruration chimique dans des sels fondus .....	21
2.6.1.2 La boruration électrochimique dans des sels fondus .....	21
2.6.2 Par voie gazeuse .....	21
2.6.3 Par plasma .....	22
2.6.4 Par voie solide .....	22
2.6.4.1 La technique des pâtes .....	23
2.6.4.2 La technique des poudres .....	24
2.7 Conclusion.....	24

## CHAPITRE 03

3.1 Introduction .....	25
3.3 Les surfaces .....	26
3.4 Le frottement .....	26
3.5 Le coefficient de frottement .....	27
3.6 Surface de contact tribologique .....	27
3.6.1 Paramètres intrinsèques .....	27
3.6.2 Paramètres extrinsèques.....	28
3.7 Mesure du frottement .....	28
3.8 L'usure .....	29
3.9 Les différents mécanismes d'usure .....	29
3.9.1 Usure par abrasion.....	29
3.9.2 Usure par adhésion .....	30

3.9.3 Usure par fatigue .....	30
3.9.4 Usure tribochimique .....	31
3.10 Conclusion .....	31

## **CHAPITRE 04**

4.1 Introduction .....	32
4.2 Matériau étudié : Acier BÖHLER-K110.....	32
4.2.1 Propriétés .....	33
4.2.2 Composition chimique.....	33
4.2.3 Applications industrielles.....	33
4.3 Préparation des échantillons .....	34
4.3.1 Découpage.....	34
4.3.2 Polissage .....	34
4.3.3 Attaque chimique .....	35
4.4 Observation microscopique .....	36
4.4.1 Principe .....	36
4.5 Traitement thermochimique .....	37
4.5.1 Préparation des poudres .....	37
4.5.2 Procédé de traitements thermochimiques.....	38
4.6 Test tribologique Pion-Sur-Disque .....	39
4.7 Test Micro dureté.....	40

## **CHAPITRE 05**

5.1 Introduction .....	42
5.2 Observation microscopique .....	42
5.3 Essai tribologique Pion-Sur-Disque.....	44
Conclusion Générale.....	54



## *Liste des figures*

### **CHAPITRE 01**

<b>Figure 1. 1 :</b> Diagramme de phase fer-carbone, permettant de visualiser les conditions d'existence des formes d'acier.....	14
--	----

### **CHAPITRE 03**

<b>Figure 3. 1 :</b> Schéma de fonctionnement d'un tribomètre Pion-on-disk.....	28
---	----

### **CHAPITRE 04**

<b>Figure 4. 1:</b> Matériau étudié (Acier BÖHLER-K110) à outil pour le travail à froid, de forme (40x10). .....	32
<b>Figure 4. 2 :</b> Les échantillons polisse, (A) avant polissage, (B) après polissage. ....	34
<b>Figure 4. 3 :</b> Polisseuse utilisé de type PRESI Minitch 233. ....	35
<b>Figure 4. 4 :</b> Microscope optique utilisé de type Eclipse LV150N .....	36
<b>Figure 4. 5 :</b> Creuset cylindrique en acier utilisée pour le traitement thermochimique de boruration par la méthode des poudres. (1) couvert, (2) récipient .....	38
<b>Figure 4. 6 :</b> Le four à moufle utilisé pour le traitement thermochimique, four de type Nabertherm, notre creuset est encadré en rouge.....	39
<b>Figure 4. 7 :</b> Le tribomètre TRB3 utilise. (1) Tribomètre, (2) Unité de contrôle.....	40

### **CHAPITRE 05**

<b>Figure 5. 1 :</b> Observation au MO la morphologie des borures formés sur l'acier K110 après un traitement de boruration a 950 °C à un temps de maintien de 4h .....	42
<b>Figure 5. 2 :</b> Observation au MO la morphologie des borures formés sur l'acier K110 après un traitement de boruration a 950°C à un temps de maintien de 8h.....	43
<b>Figure 5. 3 :</b> Image représentant une couche tribo film de l'échantillon témoin vue a l'aide microscope optique. ....	44
<b>Figure 5. 4 :</b> Images représentant une couche tribo film des échantillons après traitements de boruration a une température de 950°C pour un temps de maintien de (a) 4h et b(b) 8h. .....	45
<b>Figure 5. 5 :</b> Image représentant une couche tribo film des échantillons après traitements de cémentation a une température de 950°C pour un temps de maintien de 8h. ....	46
<b>Figure 5. 6 :</b> Le graphe représente les résultats des l'échantillon témoin. ....	47
<b>Figure 5. 7 :</b> Graphe représentant les résultats de l'échantillon borure 4h. ....	48
<b>Figure 5. 8 :</b> Graphe représentant les résultats de l'échantillon Borure 8h.....	49
<b>Figure 5. 9 :</b> Graphe représentant les résultats de l'échantillon cémenté de 8h. ....	50
<b>Figure 5. 10 :</b> Profile de micro dureté obtenues sur acier K110 après traitement de boruration pour 950 °C pendant 4h.....	51
<b>Figure 5. 11 :</b> Profile de micro dureté obtenues sur acier k110 après traitement de boruration pour 950°C pendant 8h.....	52
<b>Figure 5. 12 :</b> Profile de micro dureté obtenues sur acier k110 après traitement de cémentation pour 950 °C pendant 8h.....	53

## *Liste des tableaux*

### **CHAPITRE 01**

<b>Tableau 1. 1 :</b> Différentes nuances d'aciers inoxydables austénitiques ainsi que leurs domaines d'applications [6].....	6
<b>Tableau 1. 2 :</b> Différentes nuances d'aciers inoxydables martensitiques ainsi que leurs domaines d'applications [8].....	7
<b>Tableau 1. 3 :</b> Différentes nuances d'aciers inoxydables ferritiques ainsi que leurs domaines d'applications [10].....	8
<b>Tableau 1. 4 :</b> Quelques nuances d'aciers à outils au carbone pour travail à froid, avec des exemples d'applications, sont exposées dans le tableau ci-après [16] .....	10
<b>Tableau 1. 5 :</b> Quelques nuances d'aciers à outils pour travail à chaud sont mentionnées [16].....	12

### **CHAPITRE 02**

<b>Tableau 2. 1 :</b> Quelques types de traitement thermo-chimique selon l'élément diffusé .....	17
<b>Tableau 2. 2 :</b> Borures présents dans certains métaux de transition [19] .....	20
<b>Tableau 2. 3 :</b> Composition chimique des mélanges de poudres utilisés [19].....	24

### **CHAPITRE 04**

<b>Tableau 4. 1 :</b> Composition chimique (% masse) d'acier BÖHLER-K110 [43] .....	33
---	----

# **INTRODUCTION GENERALE**

## *Introduction Générale :*

La pièce mécanique peut subir lors de la mise en service des sollicitations différentes (frottements, usures, oxydations) qui causent des défaillances à son fonctionnement. La surface de la pièce est la première à être sollicitée et endommagée, ce qui a incité au développement des traitements des surfaces.

Les traitements des surfaces sont des opérations mécanique, physique, chimique qui ont pour but de modifier l'aspect et les propriétés de la surface de la pièce afin d'accomplir sa fonction dans des conditions données.

Il existe différents types de traitements de surface, on distingue les traitements thermiques superficiels, et les traitements thermochimiques tels que la boruration et la cémentation.

Tous ces traitements cités ont pour but de durcir la surface du métal pour une meilleure tenue à l'usure et au frottement.

Dans ce travail, on s'intéresse au traitement thermochimique qui est la boruration et la cémentation solide appliqué à l'acier à outil pour travail à froid BÖHLER - K110.

La boruration et la cémentation consiste donc à enrichir la surface du substrat par du bore et la cémentite à l'état atomique afin d'améliorer les propriétés tribologiques et la résistance à la corrosion et la dureté des surfaces des pièces mécaniques.

Le but de ce travail est d'évaluer et de comparer les traitements thermochimiques de boruration et de cémentation de l'acier BÖHLER - K110 à travers des études tribologiques et des études de micro dureté.

La structure de ce travail est divisée en cinq chapitres :

Introduit la recherche bibliographique sur l'acier et ses différentes classes et catégories.

## **CHAPITRE 01**

Généralité Sur Les Aciers

## **CHAPITRE 02**

Traitements Thermochimiques

Présente une recherche bibliographique sur les traitements thermochimiques de la boruration et de la cémentation et les connaissances de base précédentes et les différents types.

Une recherche bibliographique sur la tribologie et les différents mécanismes d'user.

## **CHAPITRE 03**

Généralité Sur La Tribologie

## **CHAPITRE 04**

Partie Expérimentale

Regroupe la méthode intégrale de l'étude tribologique et de micro dureté après traitement de l'acier à outil BÖHLER-K110.

Les différents résultats et interprétations des tests des échantillons.

## **CHAPITRE 05**

Résultats et interprétation

## **CONCLUSION**

Nous concluons ce travail par une conclusion générale qui rassemble les points de vue les plus importants et les points de vue de la recherche abordés.

# **CHAPITRE 01**

*Étude Bibliographique : Généralité Sur Les Aciers*

## 1.1 Introduction :

L'acier est un matériau largement utilisé dans l'industrie, ce sont des alliages de fer, de carbone et d'autres éléments tels que le silicium, le phosphore, le soufre et le manganèse, le carbone présent sous forme de carbure de fer ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) augmente la dureté et la résistance de l'acier.

Un acier est un alliage métallique à base de fer additionné d'un faible pourcentage de carbone, de 0,008% à environ 2,14% en masse, la teneur en carbone a une influence considérable sur les propriétés de l'acier, en dessous de 0,008%, l'alliage est plutôt malléable et on parle de fer, au-delà de 2,14%, les inclusions de carbone sous forme graphite fragilisent la microstructure et on parle de fonte, entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la résistance mécanique et la dureté de l'alliage.

On modifie également les propriétés des aciers en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle d'aciers alliés, de plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques notamment les trempes, on parle alors d'aciers traités, outre ces diverses potentialités, et comparativement aux autres alliages métalliques, l'intérêt majeur des aciers réside d'une part dans le cumul de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales : module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique, dureté, résistance aux chocs.

Malgré un développement considérable des matériaux dits nouveaux (polymères, composites, céramiques), les aciers restent le matériau le plus répandu et développé dont la production et la consommation augment constamment.

Dans ce chapitre, nous présentons la généralité sur les aciers et leurs classifications, les aciers à outil en particulier. Au final un rappel sur diagramme d'équilibre fer-carbone.

## **1.2 Composition chimique des aciers :**

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est de 0,008% à environ 2,14% outre le fer et le carbone qui en sont les éléments principaux rentrant dans sa composition, un acier ordinaire contient principalement du silicium, du manganèse, du soufre et du phosphore [1]. Pour la famille des aciers non alliés il contenant du, Mn, S, P en quantité faible, Des additions judicieuses d'éléments, comme le Si, Ni, Mo, Cr, au cours de l'élaboration ou du traitement de l'alliage liquide permettent de modifier le comportement à la solidification et aussi d'ouvrir [2].

## **1.3 Classification des aciers :**

L'acier est classé selon une variété de systèmes différents, en fonction de divers paramètres, à savoir sa composition, comme l'acier au carbone, faiblement allié, fortement allié ou inoxydable, méthodes de fabrication, La classification par composition chimique est la méthode la plus courante [3].

Trois grands groupes d'aciers alliés sont identifiés et discutés :

- Les aciers au carbone.
- Les aciers inoxydables.
- Les aciers à outils.

## **1.4 Les aciers au carbone :**

Les aciers au carbone (Aciers de construction d'usage général) forment deux classes, celles des aciers courants (ordinaires) et de qualité. D'après les conditions et le degré de désoxydation on distingue trois types de nuances [4] :

- Les aciers calmés.
- Les aciers effervescents.
- Les aciers semi-calmés.



### **1.4.1 Les aciers calmés :**

Ils sont obtenus par désoxygénation complète du métal dans le four puis dans une poche de coulée. Ces aciers contiennent une quantité minimale de protoxyde de fer en assurant ainsi une solidification (calme) du métal dans la lingotière, qui s'accompagne de diminution de volume. A la partie supérieure du lingot solidifié, se forme une retassure et une porosité dues au retrait éliminées par chauffage lors du laminage [4].

### **1.4.2 Les aciers effervescents :**

Ce sont des aciers insuffisamment désoxygénés et qui contiennent une quantité non négligeable de FeO. Le métal est dit effervescent à cause des bulles de gaz CO qui se dégagent suite à la réaction de FeO avec le carbone du métal. Le grand nombre de bulles de gaz, empêche la formation d'une retassure. Les aciers effervescents sont moins coûteux car les rebuts de leur fabrication sont réduits au minimum. Ils possèdent une plasticité élevée et se prêtent bien à l'emboutissage à froid [4].

### **1.4.3 Les aciers semi-calmés :**

Ce sont des aciers intermédiaires entre les aciers calmés et effervescents et trouvent aujourd'hui un emploi toujours plus large [4].

## **1.5 Les aciers inoxydables :**

L'une des propriétés la plus importante des aciers inoxydables dit (inox) est sa résistance à la corrosion. La résistance de ces alliages métalliques aux attaques chimiques des produits corrosifs, provient de leur faculté à s'auto-protéger par la formation spontanée à leur surface d'un film complexe d'oxydes et d'hydroxydes de chrome, appelé (couche passive), qui protège le substrat métallique de la corrosion généralisée et des attaques localisées [5].

Cette couche extrêmement mince, d'une épaisseur de l'ordre de 1,0 à 2,0nm, rend négligeable la vitesse de corrosion.

L'élément le plus important dans les aciers inoxydables est le chrome, mais d'autres éléments tels que le molybdène, le nickel ont aussi une influence sur sa résistance à la corrosion.

Les aciers inoxydables peuvent être classés en quatre grandes familles possédant chacune leurs propres caractéristiques.

- Les aciers inoxydables austénitiques.
- Les aciers inoxydables martensitiques.
- Les aciers inoxydables ferritiques.
- Les aciers inoxydables austéno-ferritiques également appelés (duplex).

### 1.5.1 Les aciers inoxydables austénitiques :

Les aciers inoxydables austénitiques conservent à température ambiante une structure austénitique cubique à faces centrées. Il s'agit de solutions solides de fer, généralement à grains fins, obtenues par hypertrempe. En dehors du chrome, le nickel constitue le plus important des éléments d'alliage principalement en raison de son caractère gamma-gène qui permet de stabiliser la structure austénitique à température ambiante. Des éléments stabilisateurs tels que le titane et le niobium sont régulièrement ajoutés afin de piéger le carbone et l'azote [6].

**Tableau 1. 1 :** Différentes nuances d'aciers inoxydables austénitiques ainsi que leurs domaines d'applications [6].

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm <sup>2</sup> )	Applications
X12 CrNi18-8	175	50 à 70	Ustensiles de cuisines, ferrures de portes et fenêtres, instruments chirurgicaux.
X10 CrNiTi18-9	185	50 à 75	Ustensiles, appareils pour l'industrie alimentaire et chimique, pièces pour réacteurs nucléaires.
X8 CrNi12-12	175	50 à 65	Ustensiles de cuisines.

### 1.5.2 Les aciers inoxydables Martensitique :

Ces aciers contiennent en général 12 à 19% de chrome, leur teneur en carbone variant de 0,08 à 1,2%, ils peuvent contenir du nickel et du molybdène ainsi que certains éléments d'addition tels que le cuivre, le titane ou le vanadium. Ils sont le plus souvent livrés à l'état recuit, il est évidemment recommandé de les utiliser – au même titre que les aciers alliés pour la construction mécanique - à l'état trempé revenu - représentant le meilleur compromis entre les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion. Ils présentent un intérêt certain dans les applications à chaud lorsque la température de service n'excède pas 650°C [8].

**Tableau 1. 2 :** Différentes nuances d'aciers inoxydables martensitiques ainsi que leurs domaines d'applications [8].

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm <sup>2</sup> )	Applications
X10 Cr13	160	50 à 65	Insermentés médicaux, canons de fusils de chasse, rivets, ustensiles de cuisine.
X20 Cr13	240	60 à 70	Moulage : hélices de navires, roues, godet pour turbines Forgeage : arbres, boulons.
X40 Cr13	225	70 à 85	Instruments de chirurgie, couteaux de table, hachoir, pieds à coulisse.

### 1.5.3 Les aciers inoxydables ferritiques :

Les aciers ferritiques contiennent généralement 12 à 18% de chrome, une faible part de nickel et une faible part de carbone  $\leq 0,12\%$ . Les ferritiques présentent la même structure que l'acier au carbone, mais ne sont pas apte à la trempe du fait de leur faible teneur en carbone. L'aciers inoxydables ferritiques sont relativement doux, présentent une résistance mécanique moins élevée que l'inox austénitique. Ils peuvent être transformés à froid, mais pas dans la même mesure que l'acier inoxydable austénitique [10].

**Tableau 1. 3** : Différentes nuances d'aciers inoxydables ferritiques ainsi que leurs domaines d'applications [10].

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm <sup>2</sup> )	Applications
X8 Cr17	150	45 à 60	Ustensiles de cuisines, ferrures de portes et revêtements de comptoirs.
X8 CrTi17	150	45 à 60	Résistant à la corrosion inter cristalline : bacs, pales d'agitateurs.
X8 CrMoTi17	160	50 à 65	Résistant aux acides : citrique, sulfurique, boriquebouillant, acétique froid et bouillant, sulfate d'ammoniac bouillant.

#### 1.5.4 Les aciers inoxydables austéno-ferritiques :

Les aciers austéno-ferritiques ou Duplex ont des propriétés fonctionnelles très intéressantes tenue à la corrosion, caractéristiques mécaniques. Ces aciers nécessitent cependant des précautions particulières lors de leur élaboration, de leur moulage et traitement thermique pour révéler tout leur potentiel [4].

Les aciers duplex contiennent de 20 à 30% de chrome, de 2 à 10% de nickel et une teneur en azote comprise entre 0,1 et 0,3%. Ils peuvent en plus contenir d'autres éléments comme du molybdène jusqu'à 4,5% environ, du cuivre jusqu'à 2%, et du tungstène [13].

#### 1.6 Les aciers à outils :

Les aciers à outils sont des aciers fortement alliés contenant de grandes quantités d'éléments d'alliage tels que le chrome, le nickel, le vanadium, le tungstène ou le molybdène. Ces éléments d'alliage sont utilisés pour augmenter la résistance à l'usure, la ténacité, la résistance ou la dureté de l'acier, ou pour lui conférer des propriétés spécifiques, telles que la résistance à la corrosion et à la chaleur, la conservation de la dureté à haute température, la conservation de la résistance à basse température [14].

Ils sont caractérisés par :

- Une dureté élevée (60 à 65) HRC.
- Une grande résistance à l'usure.
- Une forte résistance mécanique.

On distingue actuellement quatre classes d'aciers à outils :

- Les aciers au carbone pour travail à froid.
- Les aciers alliés pour travail à froid.
- Les aciers pour travail à chaud.
  1. avec chocs : forgeage, estampage, matriçage.
  2. Sans chocs : moules, pièces de filage.
- Les aciers à coupe rapide.

### **1.6.1 Les aciers au carbone pour travail à froid :**

Ce sont des aciers au carbone destinés pour le travail à froid. Cette classe d'aciers est utilisée pour l'outillage à main. Les aciers au carbone doivent assurer, après trempe et revenu à basse température, une dureté élevée de l'arête tranchante des outils (60 à 65) HRC, nettement supérieure à celle du métal usiné, ainsi qu'une bonne tenue à l'usure pour conserver l'état de l'arête tranchante [15].

Dans le cas où les outils subissent en service des charges dynamiques, il est recommandé d'utiliser des aciers hypereutectoïdes et eutectoïdes traités thermiquement, de manière à obtenir une structure de type troostite.

Les aciers au carbone pour travail à froid présentent les avantages suivants :

- Prix modéré.
- Faible dureté et bon usinage à l'état recuit.
- Bonne aptitude à la transformation à l'état recuit.

**Tableau 1. 4 :** Quelques nuances d'aciers à outils au carbone pour travail à froid, avec des exemples d'applications, sont exposées dans le tableau ci-après [16]

Nuances AFNOR	Recuit	Trempe	Revenu	Dureté HRC	Applications
XC 50	750 à 780	830 E	150 à 300	54	Outils de forage, fourches, râpeaux.
XC 60	750 à 780	825 E 850 H	200 à 300	60 à 63 60 à 62	Petites matrices, outils de chocs, barres.
XC 70	750 à 780	800 E 850 H	150 à 250	61 à 63	Scie à bois, marteaux, fers de rabots.

Recuit : recuit d'adoucissement, E : eau, H : huile

### 1.6.2 Les aciers alliés pour travail à froid :

Ce sont les aciers à outils pour travail à froid. Les aciers à outils alliés pour travail à froid, de même que les aciers à outils au carbone ne sont pas très résistants, et de ce fait, sont employés pour la coupe des matériaux relativement doux et à de faibles vitesses de coupe, la température en service ne dépasse pas 235°C.

Les aciers à outils alliés au chrome, vanadium, molybdène, font preuve d'une grande stabilité de l'austénite sur fusionnée et par suite d'une grande pénétration de trempe. Le traitement thermique comporte une trempe à l'huile et un revenu à 200°C afin de réduire les déformations et les gauchissements des outils [4].

Les aciers à outils pour travail à froid sont de plusieurs sortes :

- Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium.
- Aciers au chrome.
- Aciers au chrome-molybdène.
- Aciers au chrome-tungstène.
- Aciers au nickel-chrome.

### **1.6.2.1 Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium :**

Les teneurs moyennes sont de l'ordre de 0.8% C, 2,1% Mn et de 0 à 0,25% V. Les aciers de cette classe sont appelés aciers indéformables. Ils ont pour principale Caractéristique, une bonne indéformabilité au traitement thermique due à une température de trempe relativement basse. On les trempe, soit à l'huile, soit au bain de sels par trempe étagée. Ils forment une solution commode pour les outils de précision et de mesure, ne demandant pas une résistance particulière à l'usure, par exemple (poinçons, matrices de découpage, calibre vérificateurs, instruments de mesure) [4].

### **1.6.2.2 Aciers au chrome :**

La composition moyenne comporte les additions suivantes : (1 à 2)% C, (0,2 à 1,3)% Cr, (0 à 0,25)% V. Les aciers à faible teneur en chrome présentent une faible trempabilité et sont employés pour de petits outils à fabriquer en grande série (mèches, tarauds), et pour des pièces demandant une bonne tenue au choc ou à la flexion (extracteurs, butées).

Les nuances, à plus forte teneur en chrome 13% et contenant du vanadium, sont très indéformables et très résistantes à la flexion et sont destinées à la fabrication, par exemple (filières, mandrins d'étirage, galets de formage, matrices d'extension à froid, molettes de coupes, fraises et outils à bois) [4].

### **1.6.2.3 Aciers au chrome-molybdène :**

La composition moyenne de ces aciers comporte : (1 à 1,5)% C, (5 à 12)% Cr, (0,9 à 1,1)% Mo, (0,1 à 0,4)% V. Les aciers de ce type se déforment très peu à la trempe et sont employés pour les mêmes catégories d'outils que précédemment [4].

### **1.6.2.4 Aciers au chrome-tungstène :**

Ces aciers contiennent en général, les teneurs suivantes : (0,4 à 1,1)% C, 0,9% Mn, (0,85 à 1,1)% Cr, (1 à 2)% W. Ces aciers sont d'un emploi très général, ils sont durs, tenaces et d'un assez grand pouvoir trempant. Leur application est très variée, outils coupants (forets, mèches, cisailles), autre outils (alésoirs, tarauds, filières, poinçons, matrices) [4].

### 1.6.2.5 Aciers au nickel-chrome :

Ces aciers contiennent 0,35% C, 1,7% Cr, 3,75% Ni. C'est une nuance particulière, réservée pour les outillages d'estampage à froid, comportant des gravures de grande finesse et d'un prix élevé [4].

### 1.6.3 Les aciers pour travail à chaud :

Ce sont des aciers à outils pour travail à chaud. Dans cette catégorie d'aciers, on peut distinguer deux classes principales :

- Les aciers au Cr-W-Mo-V.
- Les aciers au Ni-Cr-Mo.

**Tableau 1. 5** : Quelques nuances d'aciers à outils pour travail à chaud sont mentionnées [16].

N° d'ordre	% C	% Cr	% W	% Mo	% V	% Ni
1	0,6	0,9	1,85	0,2	0,15	/
2	0,4	5	1,3	1,4	0,4	/
3	0,3	2,5	9	0,3	0,4	/
4	0,55	0,85	/	0,45	/	1,75
5	0,4	1,5	/	0,5	/	4,3

La nuance au Cr-W, repérée sous le numéro 1 dans le (**Tableau 1. 5**) précédent, possède une grande résistance à l'état traité, une haute limite de fatigue notamment aux chocs répétés et une bonne stabilité au revenu jusqu'à 500°C. On l'emploie comme outillage travaillant aux chocs à des températures moyennes : (poinçons de perçage, lames de cisailles à chaud, petites matrices diverses).

La deuxième nuance qui contient 5% Cr, est un acier indéformable pour outillage travaillant à chaud. Il est réservé aux emplois demandant à la fois une haute résistance à la compression et une bonne tenue aux chocs thermiques entre 300 et 600°C.

La troisième nuance contenant une très forte teneur en tungstène 9%, est caractérisée par une grande dureté et une bonne tenue à l'usure. Cet acier peut être utilisé jusqu'à la température de 650°C.



Les deux autres nuances au nickel-chrome-molybdène ont une excellente pénétration de trempe et sont employés pour (les grosses matrices d'estampage à chaud) [4].

#### **1.6.4 Les aciers à coupe rapide :**

Les aciers à coupe rapide ou simplement les aciers rapides sont caractérisés par :

- Une bonne tenue à chaud.
- Une bonne dureté.
- Une résistance mécanique et une tenue à l'usure élevée.
- La propriété de garder la structure martensitique à chaud à 600°C.

L'utilisation des aciers de coupe par rapport aux aciers à outils ordinaires, permet d'augmenter sensiblement la vitesse de coupe de 2 à 4 fois et la tenue de l'outil de 10 à 30 fois. L'élément d'alliage principal est le tungstène. Plus la teneur en tungstène est élevée, plus les qualités de coupe de ces aciers sont meilleures et ceci jusqu'à environ 23%. Au delà de cette teneur, le tungstène semble n'avoir aucun effet.

Les teneurs en chrome sont en général, de l'ordre de 4 à 4,5%. Le molybdène peut remplacer le tungstène et la tenue à chaud de ces aciers s'améliore en présence de vanadium et de cobalt.

Les aciers rapides contiennent des carbures lédéburitiques. A l'état recuit, ils sont constitués de ferrite alliée et de carbures de type  $M_6C$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $MC$ ,  $M_3C$  dont le principal acier dans les aciers rapides est le  $M_6C$ , la ferrite comporte la plus grande partie dissoute de chrome.

La structure d'un acier moulé comporte un eutectique complexe qui ressemble à la lédéburite et qui se dépose aux joints de grains. Pour assurer une bonne tenue à chaud, les outils rapides sont soumis à une trempe de 1200 à 1300°C pour avoir une meilleure dissolution des carbures secondaires, et obtenir au chauffage, de l'austénite hautement alliée au Cr, W, Mo, et V. Ceci assure, après trempe, une structure martensitique à haute stabilité, donc une bonne tenue à chaud. La trempe est suivie d'un revenu multiple à haute température

[15].

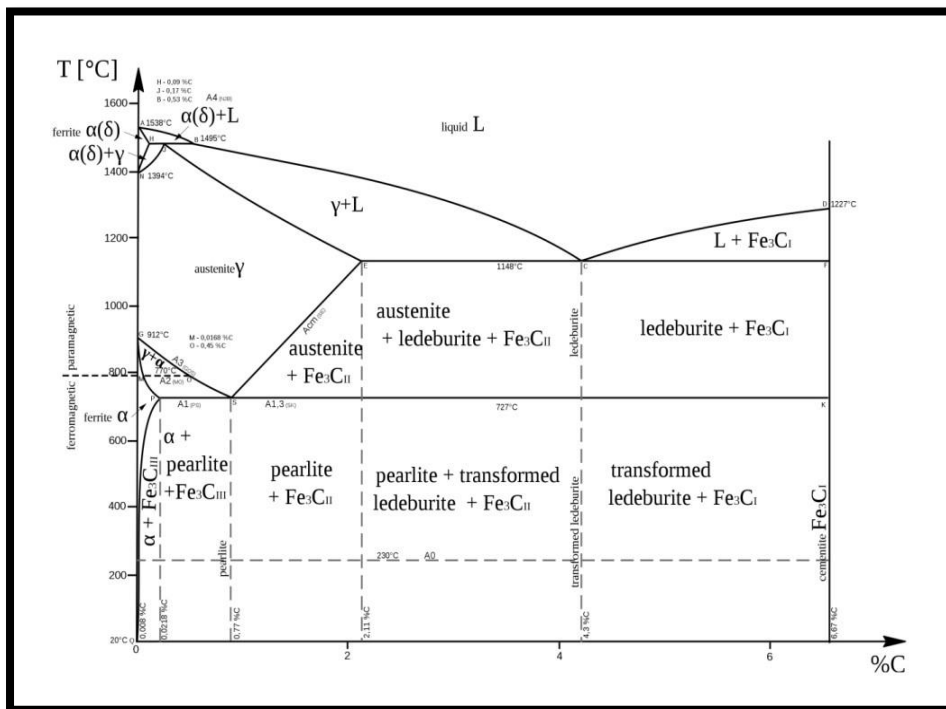
### 1.7 Diagramme d'équilibre fer-carbone :

Le diagramme d'équilibre Fer-carbone (**Figure 1. 1**), Représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite. Elle correspond à 6,67% de carbone. Ce diagramme permet de visualiser la forme d'acier que l'on a selon la température et la teneur en carbone.

La détermination des phases et des constituants d'un acier à une température donnée est fournie par la lecture du diagramme. La structure du fer pur dépend de la température :

- En dessous de 912°C : Cubique Centré (fer  $\alpha$ , ferrite).
- Entre 912°C et 1394°C : Cubique à Face Centrées (Fer  $\gamma$ , austénite).
- Entre 1394°C et 1538°C : Cubique Centré (Fer  $\delta$ ).

Toutefois, ce diagramme n'est valable que pour des aciers non alliés, c'est-à-dire ne contenant que du fer et du carbone. Certains éléments d'alliage favorisent l'élargissement de la phase  $\gamma$  (éléments gamma gènes) et certains autres favorisent le cas inverse (éléments alpha gènes). Il existe deux diagrammes fer-carbone, car il existe du carbone à l'état libre (graphite), et du carbone en combinaison chimique (cémentite). Il y a donc un diagramme fer graphite (dit diagramme stable) et un diagramme fer-cémentite (dit diagramme métastable) [14].



**Figure 1. 1 :** Diagramme de phase fer-carbone, permettant de visualiser les conditions d'existence des formes d'acier.

## **1.8 Les constituants micrographiques :**

### **1.8.1 La ferrite :**

C'est une solution solide de carbone dans le fer  $\alpha$  c'est à dire la ferrite est constituée par du fer  $\alpha$  renfermant des traces de carbone (faible teneur en carbone  $< 0,02\%$ ) ainsi que d'autres inclusions. On distingue la ferrite  $\alpha$  à basse température et à solubilité du carbone allant jusqu'à  $0,02\%$  et la ferrite  $\delta$  à haute température à solubilité limite en carbone allant jusqu'à  $0,1\%$ . La ferrite est peu tendue et très ductile ( $HV= 90$ ,  $R_m= 300 \text{ N/mm}^2$ ,  $K= 300\text{j/cm}^2$ ). Elle est magnétique à la température ordinaire, au microscope la ferrite a l'aspect de grains homogène polyédrique. Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique jusqu'à  $760^\circ\text{C}$  [14].

### **1.8.2 L'austénite :**

C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer  $\gamma$ . La solubilité limite du carbone dans le fer  $\gamma$  est de  $2,14\%$ . L'austénite est stable à haute température, elle est peu dure est relativement malléable ( $HB = 300$ ). La microstructure de l'austénite est composée de grains polyédriques. Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable. Elle est antiferromagnétique [14].

### **1.8.3 La cémentite :**

La cémentite ou carbone de fer ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) est une combinaison chimique de fer et de carbone dont la teneur en carbone peut atteindre  $6,67\%$ . Elle est magnétique jusqu'à  $210^\circ\text{C}$  et très dure ( $HB= 700$ ) mais fragile [14].

La microstructure de la cémentite peut se présenter dans les aciers sous les formes suivantes :

- Lamellaire dans la perlite lamellaire.
- Grains dans les aciers ayant subi un traitement thermique de recuit.
- Et de précipités inter granulaires dans les aciers ayant un  $C > 0,8\%$ .

### **1.8.4 La perlite :**

C'est un eutectoïdes formé d'un mélange de grains de cémentite sphéroïdaux noyés dans la ferrite globulaire en couches alternées (88% de ferrite + 12% de cémentite) elle est obtenue lors du refroidissement et par décomposition de l'austénite à 0,8% de carbone. Elle présente dans l'acier ordinaire toujours une teneur en carbone de 0,85%. La perlite est dure (HV= 200) et assez ductile  $R_m = 800\text{N/mm}^2$ ,  $A\% = 1040$  [14].

### **1.8.5 Martensite :**

Cette phase cristallise dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. Cette distorsion est caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température d'austénitisation, et elle coexiste souvent avec la bainite et la troostite.

La martensite possède une grande dureté (HV= 700 - 900), mais présente l'inconvénient d'être très fragile. Elle est ferromagnétique comme la ferrite.

La martensite peut se présenter sous différentes morphologies : massive ou aciculaire. Cette dernière forme est de loin la plus répandue dans le cas des aciers faiblement alliés.

Tout ce micro textures ou microstructures sont toutes des produits de décomposition de l'austénite. Elles sont composées d'un mélange de ferrite  $\alpha$ , de carbure (cémentite ou carbure plus ou moins complexes). La morphologie des deux phases en présence dépend essentiellement de la vitesse de refroidissement [14].

## **1.9 Conclusion :**

En conclusion, ce chapitre nous donne des informations générales sur les aciers, leurs différentes classes et familles et leurs domaines d'application dans l'industrie moderne.

# **CHAPITRE 02**

*Étude Bibliographique : Traitements Thermo-chimiques*

## 2.1 Introduction :

Compte tenu des inconvénients des alliages métalliques, tels que les problèmes de corrosion, d'usure et de fatigue, de nombreuses études ont été menées pour améliorer les propriétés de surface de ces alliages d'un point de vue mécanique, physico-chimique et tribologique. C'est pourquoi des traitements de surface tels que la boruration et la cémentation sont utilisés pour répondre à ces exigences industrielles.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les principes du traitement thermochimique et les différents types et avantages du traitement de boruration et de cémentation.

## 2.2 Traitement thermochimique :

D'après la norme NF A 02-010, un traitement thermochimique est effectué dans un milieu convenablement choisi pour obtenir une modification de la composition chimique à la surface du métal de base, par échange avec ce milieu [16]. Le principe de ces traitements est d'enrichir la couche superficielle du métal par des éléments issu d'un milieu qui peut être solides (ciments), liquides (bain de sels), gazeux, et même plasma afin d'obtenir des propriétés nouvelles [17] :

- Dureté plus élevée.
- Augmentation à la résistance à la fatigue.
- Amélioration de la résistance à la corrosion et au grippage.

Selon l'élément diffusé, on distingue plusieurs types de traitement :

**Tableau 2. 1** : Quelques types de traitement thermochimique selon l'élément diffusé.

Eléments Diffusant	Traitement Correspondant
Carbone	Cémentation
Bore	Boruration
Azote	Nitruration
Carbone + Azote	Carbonitruration

## 2.3 La Cémentation :

La cémentation est le plus ancien traitement thermochimique maîtrisé par l'homme pour augmenter la dureté superficielle des pièces en acier. Pour cela, on augmente la teneur superficielle en carbone. La diffusion est toujours suivie de trempe à l'huile pour former des structures dures de martensite dans la couche enrichie [27].

## 2.4 Les différents types de Cémentation :

On distingue trois autres procédés de cémentation, en l'occurrence la cémentation gazeuse, la cémentation solide, et la cémentation par des agents liquides.

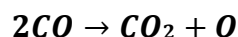
### 2.4.1 Cémentation solide :

L'agent de saturation dans cette opération est un ciment solide, le plus souvent le charbon de bois. Pour accélérer la cémentation, on ajoute au charbon des activateurs dont le carbonate de baryum  $BaCO_3$  et le carbonate de sodium  $Na_2CO_3$  à raison de 10 à 40% du poids du charbon. Le ciment solide largement utilisé se compose de charbon de bois, de 20 à 25% de  $BaCO_3$  et jusqu'à 3,5% de  $CaCO_3$ .

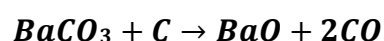
Les pièces sont placées dans des caisses soudées en acier, ou plus rarement, en fonte. La température de cémentation varie de 900 à 940°C.

Après cémentation, les caisses ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400 ou 500°C [28].

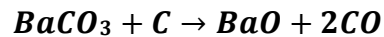
2.4.1.1 Le carbone atomique est obtenu de la manière suivante :



2.4.1.2 L'addition du carbonate rend le ciment beaucoup plus actif et enrichit l'atmosphère carburante en oxyde de carbone :



- 2.4.1.3 L'addition du carbonate rend le ciment beaucoup plus actif et enrichit l'atmosphère carburante en oxyde de carbone :



#### 2.4.2 Cémentation gazeuse :

Dans ce procédé, la pièce à cémenter est chauffée dans un milieu de gaz contenant du carbone. Cette forme de traitement présente beaucoup d'avantages par rapport à la cémentation par agent solide, elle permet d'obtenir une concentration exacte du carbone dans la couche à cémenter, diminue la durée du processus en rendant inutile le chauffage préalable des caisses remplies de ciment etc. La meilleure couche cémentée s'obtient en employant comme agent de cémentation le gaz naturel CH<sub>4</sub>, ainsi que les mélanges de propane et de butane soumis à un traitement spécial [29].

- 2.4.2.1 La réaction principale qui assure la carburation est la dissociation du méthane et de l'oxyde de carbone :



Ou Cat : Fer  $\gamma$  (austénite).

La cémentation gazeuse s'opère le plus souvent dans des fours à moufle et sans moufle, à marche continue, ainsi que dans les fours à cuve à marche discontinue. La cémentation s'effectue à la température de 930 à 650°C, la durée de l'opération assurant l'obtention d'une couche de 0,7 à 1,5 mm d'épaisseur dans les fours à moufle ou à marche continue est de 6 à 12h, on peut accélérer l'opération en faisant circuler les gaz ou augmenter la température de cémentation jusqu'à 1000 à 1050 °C à condition que les aciers employés soient à grains fins par hérédité. La cémentation est accélérée également si les pièces sont fabriquées par des méthodes de déformation plastique à froid [29].



### 2.4.3 Cémentation par des agents liquides :

La cémentation liquide est effectuée dans des sels fondus contenant du  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , le processus de cémentation est plus accéléré que les autres méthodes et la cémentation peut être effectuée rapidement à la température de  $850^\circ\text{C}$ . Le mélange des sels fondus contient le cyanure de sodium 45%, le chlorure de sodium 18%, le carbonate de sodium 37 %, parfois, on utilise dans ce mélange du carbure du silicium.

Les deux derniers sels jouent le rôle de modération, évitant une pénétration trop de carbone dans l'acier. Ils réduisent l'évaporation du cyanure qui fond à  $560^\circ\text{C}$ , cependant le bain s'appauvrit par oxydation au contact de l'air. L'agent actif est le cyanogène.

Ces bains diffusent en outre de l'azote dans le métal. La cémentation par agent liquide permet d'obtenir les mêmes profondeurs de cémentation pour les temps plus courts relativement à la cémentation par agent solide et gazeux [29].

### 2.5 La boruration :

La boruration est un procédé de diffusion thermochimique qui s'effectue dans le domaine de température  $800$  à  $1000^\circ\text{C}$  pour un intervalle de temps allant de  $0.5$  à  $10$  h [16]. Ce traitement consiste à enrichir la surface du substrat par la diffusion du bore à travers la surface des pièces mécaniques. Il y a formation des couches de borures, d'épaisseur allant de  $40$  à  $300\mu\text{m}$ . Ce qui a pour conséquence une augmentation de la dureté en surface, une résistance contre l'usure et une amélioration de la tenue à la corrosion [18].

Le substrat traité par boruration peut être à base d'alliage ferreux ou non-ferreux et aussi à base de métaux de transition. Le type de borures formés dépend de la nature du métal de base comme montré dans le (**Tableau 2. 2**) [19] :

**Tableau 2. 2** : Borures présents dans certains métaux de transition [19].

Substrat	Phases Formées
Fer	$\text{FeB}$ / $\text{Fe}_2\text{B}$
Titane	$\text{TiB}$ / $\text{TiB}_2$
Nikel	$\text{Ni}_4\text{B}_3$ / $\text{Ni}_2\text{B}$ / $\text{Ni}_3\text{B}$
Cobalt	$\text{CoB}$ / $\text{Co}_2\text{B}$

## **2.6 Les différents types de boruration :**

La boruration s'effectue par plusieurs techniques et procédés, selon le milieu d'où provient le bore, on distingue trois techniques par voie liquide, gazeux et solide.

### **2.6.1 Par voie liquide :**

Ce traitement s'effectue dans un milieu liquide. Il y a libération du bore actif grâce à la réduction chimique du composé contenant cet élément, qui se produit par voie électrochimique ou chimique [20].

#### **2.6.1.1 La boruration chimique dans des sels fondus :**

Cette technique est basée sur la différence de potentiel entre la pièce et l'agent réducteur contenu dans le bain de boruration [21]. Ce bain est constitué d'une source de bore  $B_4C$  et du composé  $NaBF_4$  qui se décompose pour former  $BF_3$  gazeux, dont le dégagement provoque une agitation du bain, qui permet au composé  $B_4C$  de ne pas rester au fond de la cuve et d'agir au contact de la surface à revêtir.

#### **2.6.1.2 La boruration électrochimique dans des sels fondus :**

Le principe de ce procédé est basé sur la différence de potentiel électrochimique entre la pièce et l'agent réducteur contenu dans le bain liquide de boruration. La pièce à revêtir est la cathode [21].

### **2.6.2 Par voie gazeuse :**

Dans ce type de traitement, la boruration est basée sur la décomposition thermique des composés volatils à base de bore [22]. Les gaz susceptibles d'apporter le bore sont des halogénures de bore ( $BF_3$ ,  $BCl_3$ ,  $BBr_3$ ) de  $B_2H_6$ , de triéthylbore ou de triméthylbore. Cette technique est rarement utilisée dans l'industrie vu la toxicité des gaz mise en jeu par cette

dernière, malgré la toxicité de ces gaz cette technique représente quelques avantages tels que la réduction de la main-d'œuvre.

### 2.6.3 Par plasma :

La décharge anormale est la technique utilisée, où l'intensité du courant appliqué croît avec la tension qui chute dans l'espace entourant la cathode (le substrat). Ce qui donne lieu à des espèces ionisées qui sont accélérées vers la surface du substrat, provoquant ainsi un échauffement qui conduit à l'implantation des atomes du bore à la surface du substrat [22].

### 2.6.4 Par voie solide :

Dans la boruration par voie solide on utilise du bore à l'état solide. Cette technique est la plus utilisée industriellement vu sa facilité de mise en œuvre qui nécessite un minimum d'équipements. Elle s'effectue soit par la méthode des poudres ou des pâtes [23].

Les mélanges de poudres de compositions chimiques ci-dessous sont les plus utilisés à l'échelle industrielle [16] :

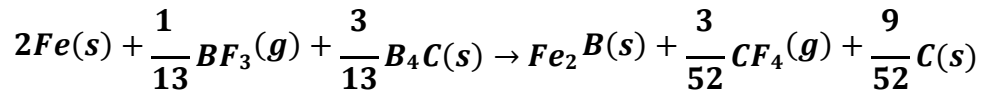
- 5% B<sub>4</sub>C, 90% SiC, 5% NaBF<sub>4</sub>.
- 5% B<sub>4</sub>C, 90% SiC, 5% KBF<sub>4</sub>.
- 50% B<sub>4</sub>C, 45% SiC, 5% KBF<sub>4</sub>.
- 85% B<sub>4</sub>C, 15% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.
- 95% B<sub>4</sub>C, 5% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.
- 84% B<sub>4</sub>C, 16% Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>.

Le mécanisme de boruration par voie solide se produit selon les réactions chimiques suivantes à des températures différentes [24] :

➤ Tout d'abord l'activateur se décompose selon la réaction chimique :



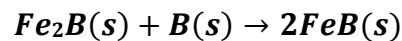
- Le gaz dégagé  $\text{BF}_3$  réagit directement avec le substrat d'après la réaction chimique suivante :



- Dès l'apparition de la couche  $\text{Fe}_2\text{B}$ , le gaz  $\text{BF}_3$  ne réagit plus et la croissance de la couche se poursuit suivant la réaction chimique :



- Le bore doit ensuite diffuser à travers la couche  $\text{Fe}_2\text{B}$ , pour donner naissance à la couche  $\text{FeB}$  si la concentration en bore dépasse 16 % en masse suivant la réaction chimique :



Ainsi, on aura une double couche ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\text{FeB}$ ), moins recommandé industriellement vu les risques de rupture à cause de la fragilité importante de la phase  $\text{FeB}$  et la grande différence entre les coefficients de dilatation thermique de ces deux borures de fer. Pour limiter la formation de la double couche, on utilise un diluant inerte ( $\text{SiC}$ ) [25].

#### 2.6.4.1 La technique des pâtes :

La technique des pâtes est utilisée pour la boruration partielle et pour les grosses pièces. La pâte est appliquée sur la partie de la pièce qui sera traitée tandis que les autres surfaces non traitées seront protégées par un dépôt électrolytique de cuivre qui empêche la diffusion de bore. Les pâtes de boruration se composent généralement :

- D'un constituant solide contenant une source riche en bore (Ferrobores  $\text{B}_4\text{C}$ , Bore amorphe).
- D'un activateur (Cryolite ou fluor borate).
- Un diluant inerte (Alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ou carbure de Silicium  $\text{SiC}$ ).

Pour éviter le collage de la pâte sur la surface du substrat, on utilise des liants [23].

**2.1.1.1 La technique des poudres :**

C'est la technique la plus répandue industriellement vu sa simplicité. Le principe de ce procédé consiste à emballer la pièce dans une enceinte (caisse en acier) contenant le mélange de poudres, La pièce à traiter est ensuite placée dans un four à moufles [25].

Le (Tableau 2. 3) donne la composition chimique des mélanges de poudres utilisés avec B<sub>4</sub>C comme source de bore, ce qui est économique par rapport à l'utilisation du bore amorphe [26].

**Tableau 2. 3 :** Composition chimique des mélanges de poudres utilisés [19].

Type	B <sub>4</sub> C %	SiC %	KBF <sub>4</sub> %	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> M %	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> %
1	5	90	5	/	/
2	50	45	5	/	/
3	85	/	/	15	/
4	95	/	/	/	5
5	84	/	/	/	16

**2.7 Conclusion :**

La boruration et la cémentation sont deux processus thermochimiques de durcissement superficiel qui modifient la surface d'un matériau par la diffusion d'atomes de bore et de carbone dans la couche superficielle du substrat à des températures variant entre 800°C et 1000°C. Comme conséquence directe, il y a amélioration de la dureté et la résistance à l'usure des alliages ferreux.

En conclusion, les traitements thermochimiques par voie solide (par poudres) sont les plus avantageux du fait de la simplicité de son mode opératoire.

# **CHAPITRE 03**

*Étude Bibliographique : Généralité Sur La Tribologie*

### 3.1 Introduction :

Le frottement et l'usure sont de manière directe ou indirecte liés à de nombreux préjudices dans le fonctionnement de machines ou autres sous-ensemble mécanique. Dans le domaine industriel les pertes économiques provoquées par le frottement et l'usure sont très conséquentes.

Par ailleurs des essais mécaniques et des traitements de surfaces ont alors été développés afin de pallier ces problèmes, on trouve la science de l'usure et étude de frottement tout comme les essais de dureté ou autre essai mécanique on pour rôle de prévention sur la durée de vie de notre matériau ce qui fait beaucoup de bien dans le domaine de l'industrie.

Dans ce chapitre nous présenterons la tribologie et l'usure et les différents procédés de mesure de dureté.

### 3.2 La tribologie :

La tribologie est la science de l'usure, des frottements et de la lubrification. Elle étudie les phénomènes qui se produisent lorsque des surfaces entrent en mouvement relatif avec d'autres éléments tribologiques dans des systèmes naturels ou artificiels. Cela inclut la conception et la lubrification des paliers [30].

Proposé par PETER JOST, en 1966 et est basé sur le mot grec (tribos) qui signifie frotter . Il s'agit donc de la science du frottement. Son but est de regrouper sous une seule terminologie l'ensemble des sciences du frottement :

- Frottement.
- Usure.
- Lubrification (troisième corps).

Une définition plus précise de la tribologie est l'étude des interactions entre surfaces solides en mouvement relatif [31].

Le frottement est le phénomène qui s'oppose au mouvement relatif de deux surfaces alors que l'usure décrit la perte de matière. La lubrification consiste à séparer les deux corps en contact par un troisième corps qui peut être liquide ou solide. Il est important de noter que

frottement et usure ne sont pas nécessairement conjoints. En effet, il est possible d'avoir un système à frottements élevés mais usure faible. Un des exemples les plus courants est constitué par les systèmes de freinage. A l'inverse, il est également possible de créer des systèmes à frottements faibles mais usure élevée, notamment dans l'usinage (polissage, outils d'écriture) [32].

### **3.3 Les surfaces :**

Par définition, la surface d'un corps est le lieu des points séparant ce corps du milieu environnant. Elle correspond donc à une discontinuité dans l'aménagement périodique des atomes de celui-ci.

En surface, le nombre de plus proches voisins est différent de ce qu'il est en volume. On parle aussi d'interface solide-gaz, solide-liquide, solide-solide.

La notion d'état de surface comprend [41] :

- L'état physico-chimique (nature, structure, texture des couches superficielles).
- L'état géométrique (ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéale).

### **3.4 Le frottement :**

En physique, le frottement (ou friction) est une interaction qui s'oppose au mouvement relatif entre deux systèmes en contact. Le frottement peut être étudié au même titre que les autres types de force ou de couple. Son action est caractérisée par une norme et une orientation, ce qui en fait un vecteur. L'orientation de la force (ou du couple) de frottement créé sur un corps est opposée au déplacement relatif de ce corps par rapport à son environnement. La science qui étudie le frottement entre solides est la tribologie [32].



### 3.5 Le coefficient de frottement :

Les frottements résultent de la combinaison de trois types de mouvement entre deux surfaces

- Le glissement.
- Le roulement.
- Le pivotement.

Dans ce travail, l'étude se portera essentiellement sur les frottements en glissement.

Le déplacement d'un objet, soumis à une force normale  $FN$ , par glissement sur une surface nécessite l'application d'une force de déplacement assez importante pour vaincre la force de frottement  $FF$  (dite tangentielle). Il existe ainsi une force tangentielle seuil  $F_s$  nécessaire à la mise en glissement du solide et une force tangentielle  $F_d$  nécessaire pour maintenir le glissement [33].

Deux coefficients de frottement peuvent ainsi être définis [34] :

- Le coefficient de frottement statique par le nombre sans dimension  $\mu_s = F_s / N$ .
- Le coefficient de frottement dynamique par le nombre sans dimension  $\mu_d = F_d / N$ .

### 3.6 Surface de contact tribologique :

Le frottement entre les deux surfaces dépend de nombreux paramètres, intrinsèques ou extrinsèques, évoqués ci-dessous :

#### 3.6.1 Paramètres intrinsèques :

D'une part, il y a les propriétés (mécaniques, physicochimiques et topographiques) des matériaux en contact qui vont influencer le frottement. Les propriétés mécaniques regroupent la dureté, les modules de Young et de cisaillement, la limite d'élasticité, la résistance limite à la rupture, les contraintes résiduelles et la ténacité. Les propriétés physicochimiques de surface sont relatives à la réactivité des surfaces (réactions chimiques, adsorptions de molécules) qui modifierait la nature des matériaux [35].

### 3.6.2 Paramètres extrinsèques :

D'autre part, le coefficient de frottement entre deux matériaux peut également dépendre des paramètres extérieurs liés aux conditions expérimentales (fonctionnement et environnement) du test tribologique.

L'environnement dans lequel le glissement est effectué (température et taux d'humidité relative) est un des premiers paramètres affectant le frottement. En effet, l'augmentation du taux d'humidité relative entraîne la présence d'une fine pellicule d'eau qui lubrifie le contact ou peut réagir avec les matériaux. La température peut également provoquer des changements d'état (solide à liquide notamment) ou changements structuraux (changement de phase cristalline) [36].

### 3.7 Mesure du frottement :

Le facteur de frottement se mesure au moyen d'un tribomètre. La figure présente un tribomètre pion-disque qui est parmi les appareils les plus couramment utilisés. Il se compose d'un arbre en rotation à vitesse variable sur lequel se fixe un disque constituant le premier matériau à tester. Un pion réalisé avec le deuxième matériau du couple tribologique se monte sur un support équipé d'un capteur de force normale et tangentielle. Une force normale est appliquée au support de manière à presser le pion sur le disque. Puis le disque est mis en rotation et la force tangentielle est mesurée [37].

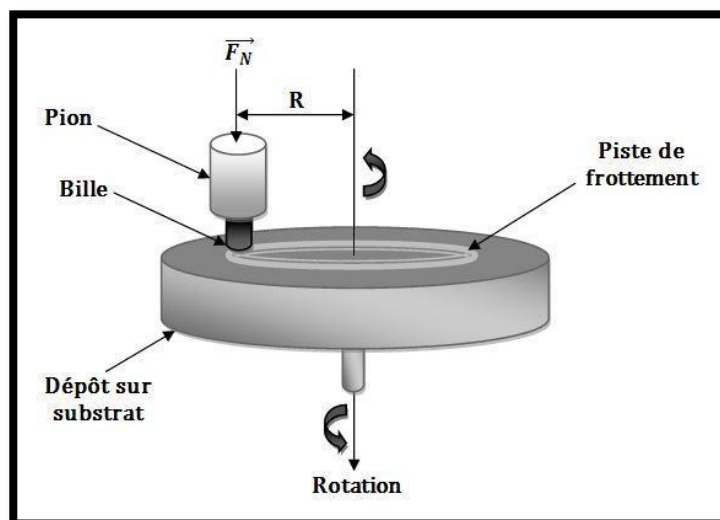


Figure 3. 1 : Schéma de fonctionnement d'un tribomètre Pion-Sur-Disque.

### **3.8 L'usure :**

L'usure d'un solide est généralement défini comme une perte de matière, un mouvement de matière ou une transformation de matière en surface du solide sous l'effet d'une interaction avec un autre milieu (solide dans notre cas, mais ça peut également être un fluide) [37].

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces.

Il existe plusieurs classifications de l'usure [38] :

- Classifications empiriques : basées sur la durée de vie des systèmes frottant.
- Classifications morphologiques : basées sur le faciès des pièces usées.
- Classifications mécanistes : fondées sur l'analyse des mécanismes fondamentaux à l'origine de l'usure.
- Classifications fonctionnelles : focalisée sur le rôle de l'usure dans la formation du troisième corps.

### **3.9 Les différents mécanismes d'usure :**

On a classés en quatre types fondamentaux :

- Usure par abrasion.
- Usure par adhésion.
- Usure fatigue.
- Usure tribochimique.

#### **3.9.1 Usure par abrasion :**

L'usure par abrasion est la forme de dégradation la plus courante et la plus combattue. Cependant, elle peut être recherchée dans certains domaines comme l'usinage de pièces ou même simplement de l'écriture avec une craie sur un tableau. Cette usure est provoquée par la rugosité des surfaces ou par l'incrustation de particules dures, présentes dans le contact, dans le matériau le plus tendre. Elle se manifeste par une perte de poids ou de cote due à des

polissages, des rayures et des sillons. Le durcissement des surfaces soit par traitement thermique soit par écrouissage peut limiter la présence de ce type d'usure.

L'usure abrasive est généralement limitée en augmentant la dureté du matériau le plus tendre. Dans le cas d'abrasion à deux corps, il est souhaitable de réduire l'index de plasticité afin de rester en régime élastique et limiter le labourage d'une des surfaces. Comme suggéré par l'index de plasticité, il est préférable que le matériau dur soit le plus lisse possible. Notons que l'abrasion est un moyen de production de surfaces (rodage, polissage) [39].

### 3.9.2 Usure par adhésion :

L'usure par adhésion a lieu par un transfert de matières d'un corps à l'autre. La résistance mécanique de la jonction adhésive formée est alors amplifiée par une réaction physicochimique pouvant aller jusqu'à la soudure. Si cette résistance est assez importante, on peut avoir ce qu'on appelle communément un phénomène de grippage. Dans le milieu métallurgique, il est possible de choisir des couples de métaux compatibles sans aucune possibilité d'adhésion pour contrer ce type d'usure.

L'adhésion dépend de l'énergie de surface des matériaux et plus particulièrement de leur travail d'adhésion  $W_{AD}$ . Lorsque les pressions de contact sont élevées et que les matériaux ont un travail d'adhésion élevée, il est possible d'atteindre un régime sévère d'adhésion où les surfaces sont soudées. Le mécanisme est alors complètement bloqué, on parle de grippage [40].

### 3.9.3 Usure par fatigue :

L'usure par fatigue des surfaces est provoquée par des sollicitations de chocs ou de glissements sous l'action de contraintes générées par des charges cycliques répétées. Contrairement aux deux précédents types d'usure, l'usure apparaît après un long vieillissement des pièces et se manifeste par des fissurations et des écaillages dans la structure.

Dans ce cas d'usure, l'important est de limiter les contraintes en prenant des matériaux possédant peu de défauts et/ou ayant subi des traitements permettant d'augmenter la dureté [40].

#### **3.9.4 Usure tribochimique :**

L'usure par réactions tribochimiques est liée à la réactivité chimique à l'interface du contact : soit celle avec le milieu extérieur soit avec les débris du troisième corps. La dégradation des surfaces peut être l'effet d'agents corrosifs qui oxydent la surface et rongent les pièces, elle est amplifiée par les contraintes mécaniques exercées pendant le mouvement. Il y a alors formation de débris d'oxydes à l'interface qui jouent un rôle abrasif et contribuent à l'usure [40].

#### **3.10 Conclusion :**

Les surfaces métalliques, soumises à un frottement solide ou fluide, en présence ou non de lubrifiants, sont affectées par des formes d'usure qui peuvent aller de l'usure douce régulière et contrôlable (usure normale) à la détérioration brutale entraînant la mise hors service du mécanisme. De ce chapitre on a pu connaître ces types d'usure, que l'on a classés et comment mesurer le frottement.

# CHAPITRE 04

*Partie Expérimentale*

## 4.1 Introduction :

Ce chapitre présente spécifiquement les différentes technologies utilisées dans l'étude des traitements thermochimiques de cémentation et de boruration en poudres sur acier à outil BÖHLER-K110.

Nous présentons d'abord l'acier à outil pour travail à froid BÖHLER-K110 utilisé pour le traitement de boruration, puis décrivons les méthodes et les conditions opératoires qui permettent d'obtenir un durcissement superficiel donnant la formation d'une couche. La caractérisation de la couche borure et cimentée est réalisée par des méthodes expérimentales adaptées. La morphologie de la couche borure a été examinée avec un microscope optique d'ECLIPSE LV150N, la durée a été mesurée avec un test de micro dureté Vickers de type FALCON 400, suivi d'un test tribologique.

## 4.2 Matériau étudié : Acier BÖHLER-K110 :

Le K110 (AFNOR : Z160CDV12), plus connu sous le nom de D2, développé par la société autrichienne BÖHLER Steel Company, est un acier à outil pour le travail à froid semi inoxydable à haute teneur en carbone et en chrome, en raison de sa dureté, de sa résistance à l'usure et à l'abrasion exceptionnelles.



**Figure 4. 1:** Matériau étudié (Acier BÖHLER-K110) à outil pour le travail à froid, de forme (40x10).

### 4.2.1 Propriétés :

Les propriétés d'acier à outil BÖHLER-K110 [42] :

- Dimensionnellement stable.
- Haute teneur en carbone.
- Acier à haute teneur en chrome (12%).
- Particulièrement adapté au durcissement à l'air.
- Bonne résistance à l'usure, bonne ténacité.
- Grande aptitude aux traitements de surface.

### 4.2.2 Composition chimique :

**Tableau 4. 1** : Composition chimique (% masse) d'acier BÖHLER-K110 [43].

Élément chimique	Teneurs (% masse)
Carbone (C)	1,52
Silicium (Si)	0,39
Manganèse (Mn)	0,38
Phosphore (P)	0,02
Soufre (P)	0,0003
Chrome (Cr)	11,37
Molybdène (Mo)	0,75
Nickel (Ni)	0,33
Vanadium (V)	0,75
Cuivre (Cu)	0,10

### 4.2.3 Applications industrielles :

Les applications industrielles d'acier à outil BÖHLER-K110 [44] :

Outils de coupe, Outils de coupe de précision, Matrices, poinçons, Mandrins pour molettes de filetage, Molettes de filetage, poinçons à emboutir, Outils de presse, outils d'usinage du bois, Lames de cisailles, outils d'emboutissage profond, Cylindres pour laminage à froid, outils de mesure, Moules pour matières plastiques.



### 4.3 Préparation des échantillons :

Les échantillons ont été fournis par la société PRO' DISTRIBUTEUR spécialisée dans la distribution des matières dont les métaux et aciers, et le concessionnaire de BÖHLER Steel Company en Algérie.

#### 4.3.1 Découpage :

Le découpage des échantillons a été fait chez l'entreprise PRO' DISTRIBUTEUR avec une scie à ruban ou on a découpé une barre de (40x10) mm en petits échantillons de (20x20x10) mm.

#### 4.3.2 Polissage :

La préparation d'échantillons pour l'observation microscopique nécessite un traitement mécanique (Polissage). Ce dernier comprend une série de polissage à l'aide de papier abrasif à grain de plus en plus fin, et enfin la finition et le polissage à l'aide d' $Al_2O_3$  dilué avec de l'eau ou une solution ou une pâte diamantée.

Les échantillons ont été polis au niveau du laboratoire de sciences des matériaux du département de génie mécanique, Utilisez du papier de verre de grain différent pour l'opération : 80, 200, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200.

Les échantillons ont ensuite été contaminés avec de l'alumine  $Al_2O_3$  pour un polissage final afin d'obtenir une surface à l'état miroir. Après traitement de surface on refait un petit polissage avec le papier abrasif 1200 pour réobtenir l'état miroir.

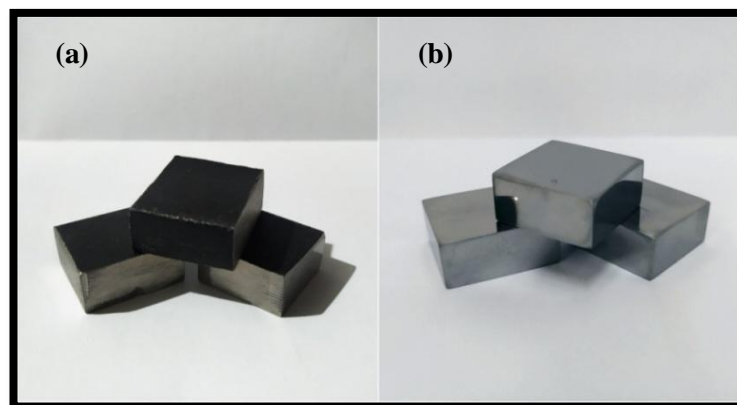


Figure 4. 2 : Les échantillons polis, (a) avant polissage, (b) après polissage.



Figure 4. 3 : Polisseuse utilisé de type PRESI Minitex 233.

### 4.3.3 Attaque chimique :

L'attaque chimique se fait à l'aide de réactif (Nital) qui permet de différencier les différentes phases de notre acier et de les joints de grains, cette méthode consiste à tremper la face à attaquer dans le réactif choisi pendant un temps prédéfini.

Pour notre examen nous avons effectué l'attaque suivante :

- 95 ml d'éthanol (alcool éthylique).
- 5 ml d'acide nitrique.
- Durée d'attaque 15 secondes.

Après avoir obtenu un bon résultat de l'attaque chimique on passe à l'examen optique.

## 4.4 Observation microscopique :

L'observation des échantillons borurés et cimenté a été effectuée en utilisant un microscope optique de marque Eclipse LV150N du laboratoire d'études et recherche en technologie industrielle (LERTI), qui est un microscope de :

- Modèles à éclairés dédiés.
- Manuel du microscope.

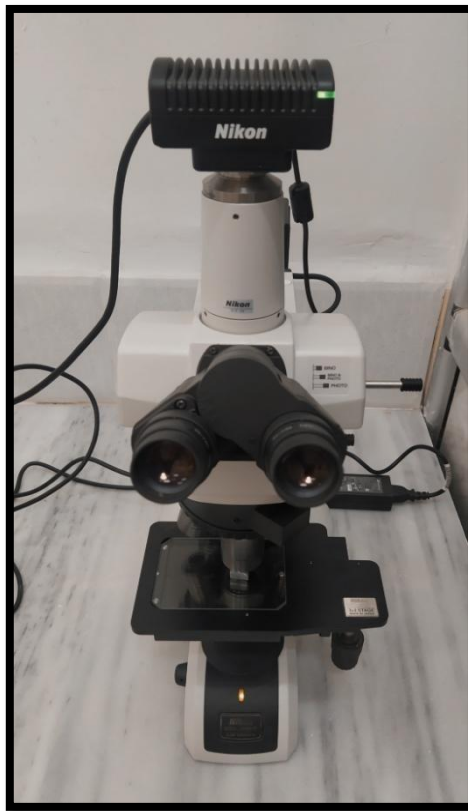


Figure 4. 4 : Microscope optique utilisé de type Eclipse LV150N.

### 4.4.1 Principe :

Corps de microscope modulaire pouvant s'appliquer à différentes observations et tâches Compatible avec les observations en fond clair, fond noir, polarisation simple, Contraste par Interférence Différentielle (DIC), épi fluorescence et interférométrie à deux faisceaux [45].

- Fond clair : c'est le mode le plus couramment utilisé en MO, il permet d'examiner des préparations opaques comme des coupes polies et des étalons.

- Fond noir : Ce procédé se prête particulièrement à l'inspection des surfaces techniques. Il permet de discerner les parties les plus fines en dessous de la limite de résolution du microscope.
- Contraste interférentiel différentiel (DIC) : Ce procédé est basé sur des phénomènes de polarisations optiques et se prête ainsi fort bien à la visualisation d'infimes dénivelés de surfaces.

Objectifs pour l'observation en fond clair :

Le microscope optique peut atteindre des grossissements de 100 fois pour un objectif de 10, un grossissement de 200 fois pour un objectif de 20 et un grossissement de 500 fois avec un objectif de 50.

#### **4.5 Traitement thermochimique :**

Dans le cadre d'une étude tribologique et de micro dureté sur l'influence de la variation de temps et type du traitement thermochimique sur l'acier à outil pour travail à froid BÖHLER-K110. On a fait trois manipulations, Deux traitements thermochimiques de boruration (4h et 8h), et un traitement de cémentation (8h).

##### **4.5.1 Préparation des poudres :**

La poudre utilisée pour le traitement thermochimique de boruration est composée d'un mélange suivant :

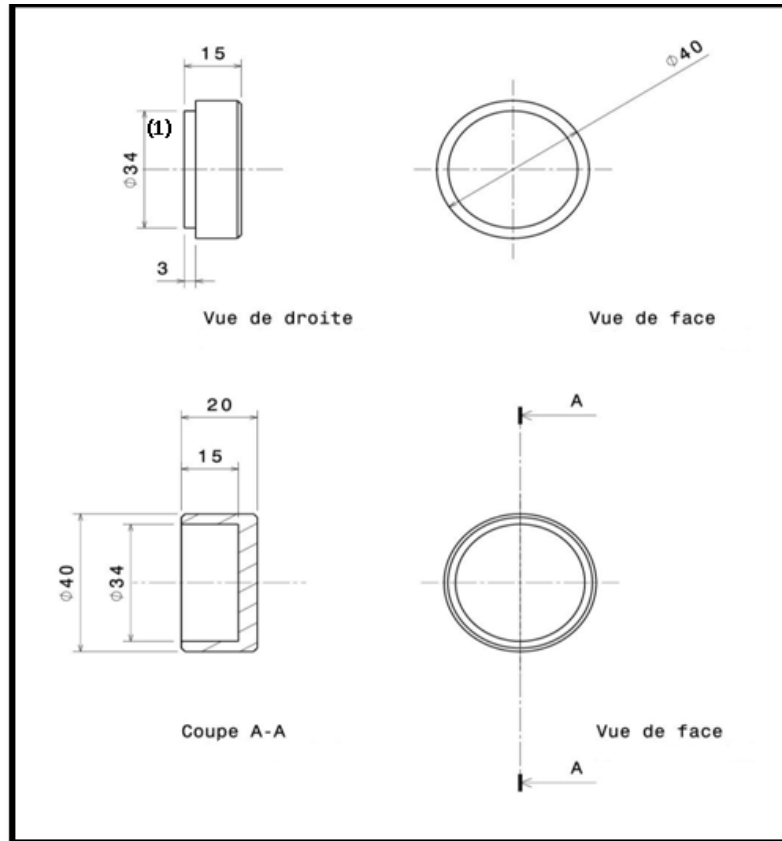
- 20% de carbure de bore ( $B_4C$ ).
- 5% de sodium tétra-fluor borate ( $NaBF_4$ ).
- 75% de carbure de silicium ( $SiC$ ).

La poudre utilisée pour le traitement thermochimique de cémentation est composée d'un mélange suivant :

- 60% de charbon de bois.
- 40% de carbonate de baryum ( $BaCO_3$ ).

### 4.5.2 Procédé de traitements thermochimiques :

Le mélange de poudres de boruration et de cémentation, chaque mélange est placé séparément, a été mis en contact direct avec les échantillons dans le creuset de forme cylindrique en acier (**Figure 4. 5**).



**Figure 4. 5 :** Creuset cylindrique en acier utilisée pour le traitement thermochimique de boruration par la méthode des poudres. (1) couvert, (2) récipient.

Les échantillons sont placés dans un four à moufle et exposés à température  $950^{\circ}\text{C}$ , avec une vitesse de chauffage de  $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , et un temps de maintien de 8h pour deux échantillons (1 boruré, 1 cémenté), et 4h pour un échantillon boruré. Une fois que le traitement est terminé, le four est éteint et on laisse le creuset refroidir lentement dans le four.

Le traitement thermochimique de boruration et de cémentation a été réalisé au sein de laboratoire d'éducation aux sciences des matériaux département de génie mécanique, dans un four à muflle.



**Figure 4. 6 :** Le four à moufle utilisé pour le traitement thermochimique, four de type Nabertherm, notre creuset est encadré en rouge.

#### 4.6 Test tribologique Pion-Sur-Disque :

Le test tribologique a été fait grâce à un Tribomètre à broche sur disque de type ANTONPAAR pin-on-disk tribomètre TRB<sup>3</sup> (**Figure 4. 7**).

Grâce aux capteurs intégrés, le TRB<sup>3</sup> mesure et enregistre les valeurs de température et d'humidité en fonction du temps, ainsi que la force de friction et d'autres données d'essai en temps réel.

Le tribomètre est accompagné d'un logiciel qui est doté de trois modes de paramétrage principaux (standard, incrémental et défini par l'utilisateur) pour répondre à tous les besoins en matière de tests (différents modes de vitesse, de charge et de mouvement). Le logiciel (Modelization) est inclus par défaut pour simuler la distribution des contraintes et des

déformations de contact et permettre de choisir facilement les bons paramètres de mesure. La (vue exploratrice du cycle) et le (mode d'analyse alternatif) permettent de traiter facilement les données en cas de mouvements alternatifs linéaires ou angulaires. Pour les utilisateurs avancés, l'environnement de programmation open-source Python intégré est prêt pour tout traitement de données [46].



**Figure 4. 7 :** Le tribomètre TRB3 utilisé. (1) Tribomètre, (2) Unité de contrôle.

Les paramètres du test sont :

- La charge : 10N.
- Distance : 1000m.
- Temps : 60min.
- Vitesse : 16,66m/min.

#### 4.7 Test Micro dureté :

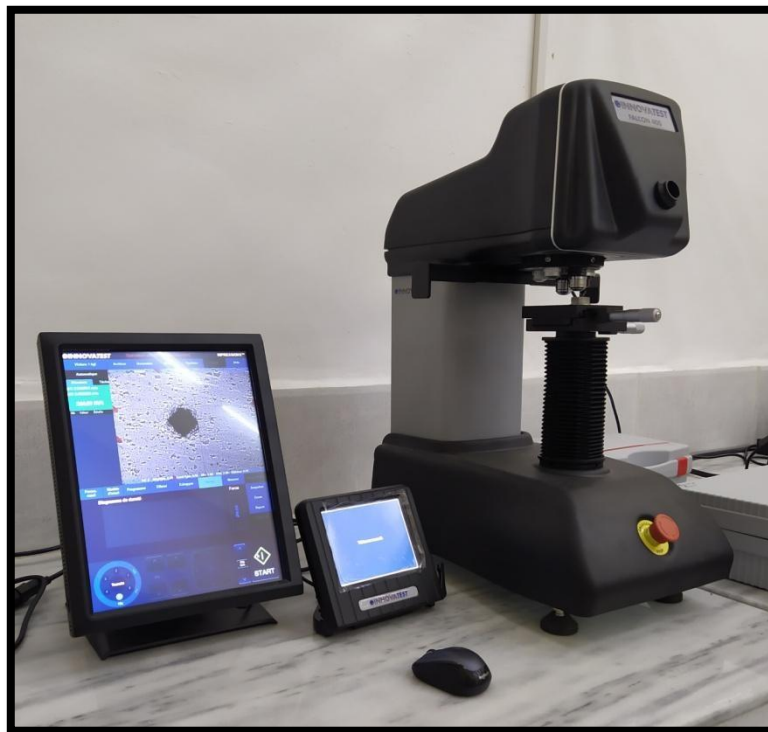
Pour avoir la micro dureté des échantillons on a utilisé un testeur de dureté de type INNOVA TEST FALCON 400 (**Figure 4. 8**).

Le FALCON 400 améliore les méthodes de test de dureté conventionnelles en se concentrant sur l'élimination de l'influence de l'utilisateur sur les résultats des tests. La technologie avancée du capteur de force utilise un système en boucle fermée de cellule de

charge à commande électronique avec retour de force pour obtenir une précision, une fiabilité, sur toutes les forces utilisées pour un test [47].

Il est caractérisé par :

- Des Échelles Micro Vickers, Vickers, Knoop et Brinell.
- Des Forces d'essai : 5gf - 31.25kgf (cellule de charge multiple, boucle fermée).
- Une Oculaire : oculaire grossissant 10X.
- Des Objectifs : 50X, 10X.



**Figure 4. 8 :** Micro dureté utilise de type INNOVA TEST FALCON 400.



# CHAPITRE 05

*Résultats et interprétation*

## 5.1 Introduction :

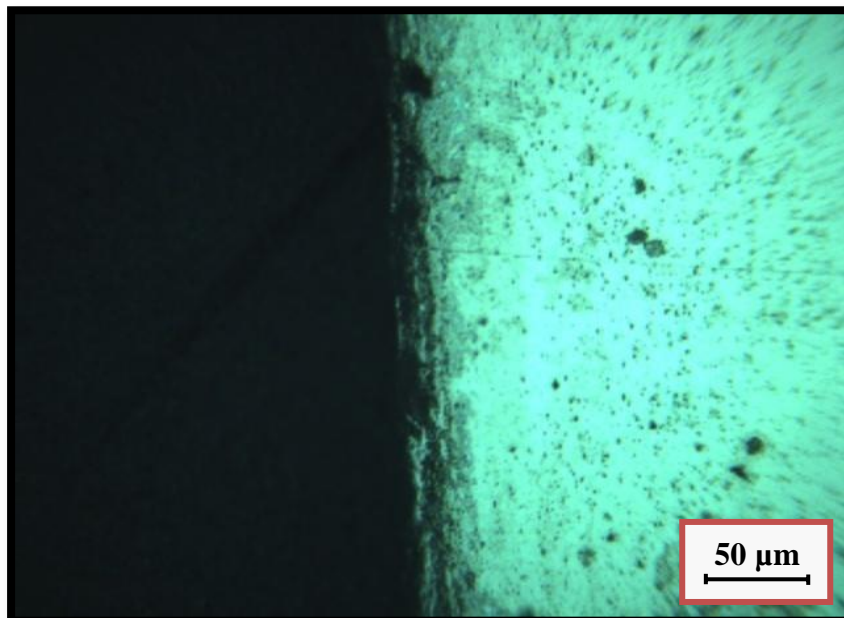
Ce chapitre comprend les résultats des traitements thermochimiques de boruration et cémentation par technique de poudres, réalisé sur l'acier à outil pour travail à froid BÖHLER-K110. On trouvera aussi les résultats de caractérisation mécanique par micro dureté et par test tribologique de nos échantillons.

La première partie de ce chapitre est basée sur l'examen microscopique et les couches qui résultent des deux traitements et la nature des phases qui les composent.

La deuxième partie comprend les résultats tribologiques et de micro dureté, où on trouve les comparaisons des données des échantillons de boruration et l'échantillon de cémentation.

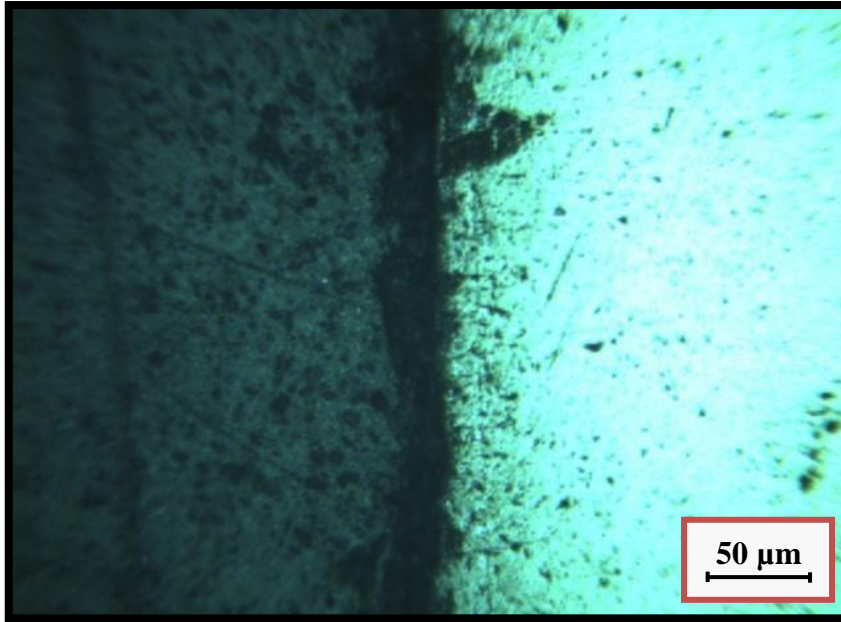
## 5.2 Observation microscope optique :

L'examen au MO (microscope optique) d'un échantillon d'un acier à outil BÖHLER-K110, après un TTC de boruration à une température de 950°C à différents temps de maintien, a révélé des borures de fer de morphologie en dent de scie à l'interface avec le substrat.



**Figure 5. 1 :** Observation au MO la morphologie des borures formés sur l'acier K110 après un traitement de boruration à 950°C à un temps de maintien de 4h.

- On remarque dans la (**Figure 5. 1**) que la couche borurée est continue et adhérente sur toute la surface due à la diffusion du bore dans la matrice, l'épaisseur de la couche est estimée à 97 $\mu$ m calculé par le logiciel du microscope optique.



**Figure 5. 2** : Observation au MO la morphologie borurée formée sur l'acier K110 après un traitement de boruration à 950°C à un temps de maintien de 8h.

- On remarque dans la (**Figure 5. 2**) que la couche borurée est continue et adhérente sur toute la surface due à la diffusion du bore dans la matrice, l'épaisseur de la couche est estimée à 193 $\mu$ m calculé par le logiciel du microscope optique.

En conclusion, l'épaisseur des couches dans un temps de maintien de 8h est plus importante que celle du temps de 4h, causé par la bonne diffusion du bore dans un temps de maintien plus élevé ce qui mène à un taux de diffusion plus important.

### 5.3 Essai tribologique Pion-Sur-Disque :

L'essai tribologique pion sur disque consiste à mettre un échantillon sur un disque tournant et appliquer une force par l'aide d'une bille d'acier pendant un temps précis pour avoir le frottement.

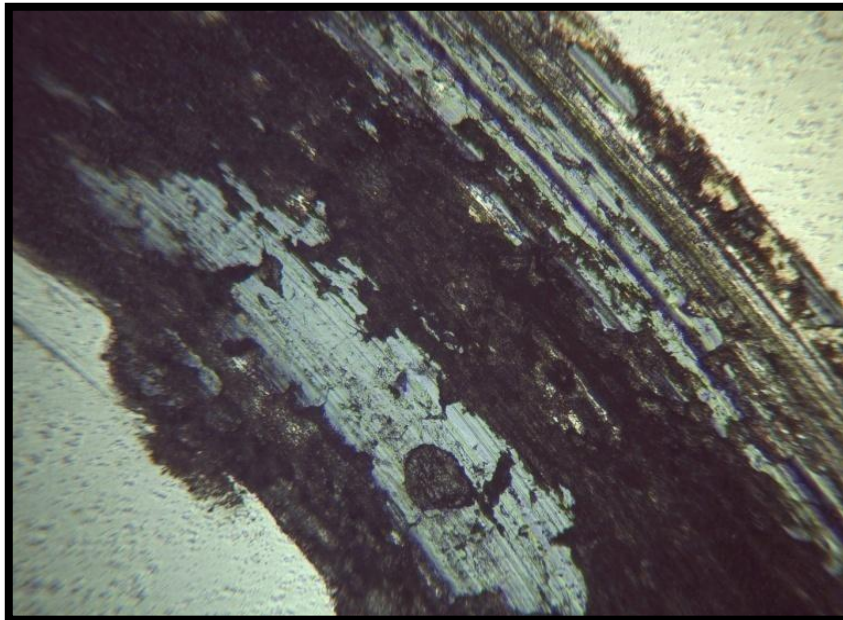
Les paramètres opératoires :

- La charge : 10N.
- Distance : 1000m.
- Temps : 60min.
- Vitesse : 16,66m/min.

Après l'essai on observe des traces d'usure sur l'échantillon accompagné des courbes de frictions.

Un examen microscopique a été réalisé et ont a eu ces résultats :

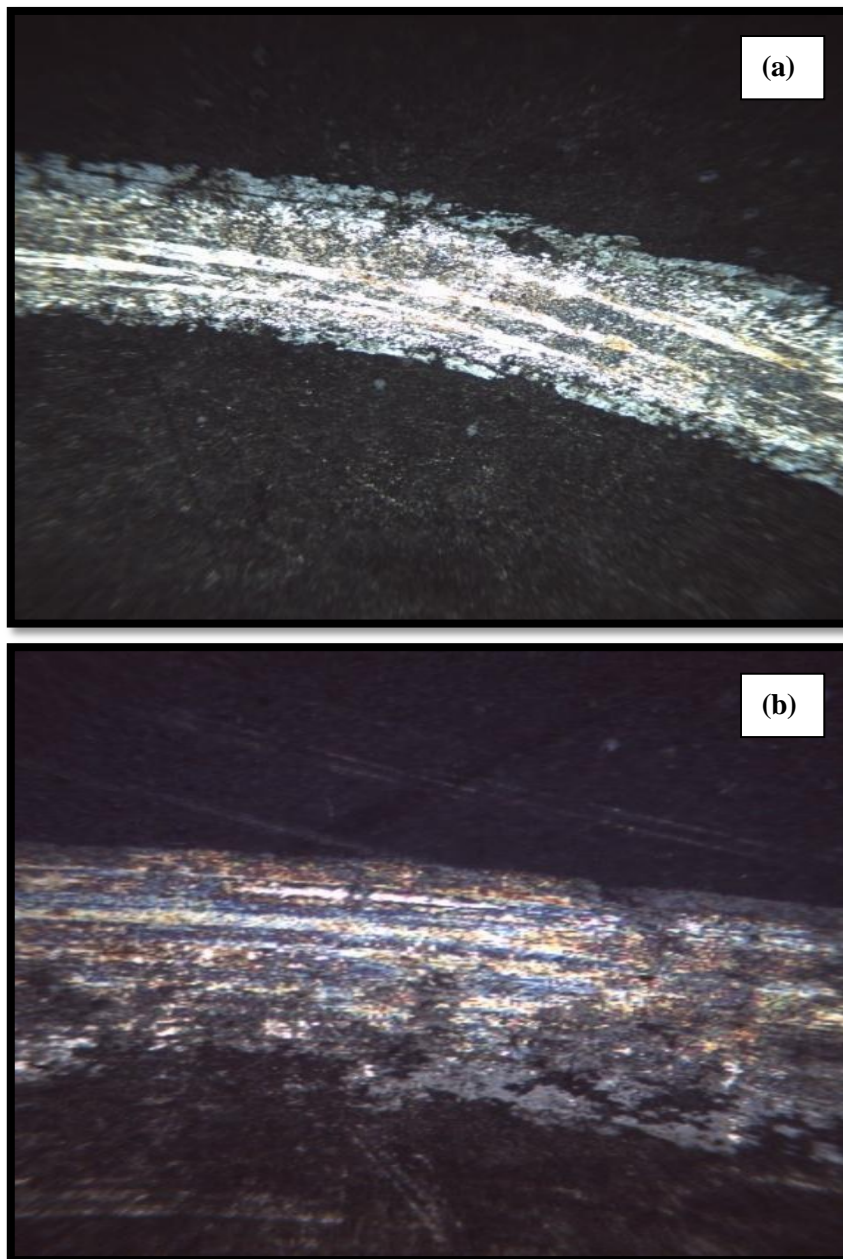
On réalise d'abord le test microscopique sur l'échantillon avant le traitement thermochimique et obtient :



**Figure 5. 3 :** Image représentant une couche tribo film de l'échantillon témoin vue a l'aide microscope optique.

- La (Figure 5. 3) on remarque les rayures due aux frottements de la bille avec les échantillons supposons qu'une usure abrasive c'est produite a trois corps, on peut remarquer aussi une présence de couche formée par la perte de matière de la bille due aux frottements qu'on appellera couche tribo film due au phénomène d'usure adhésive.

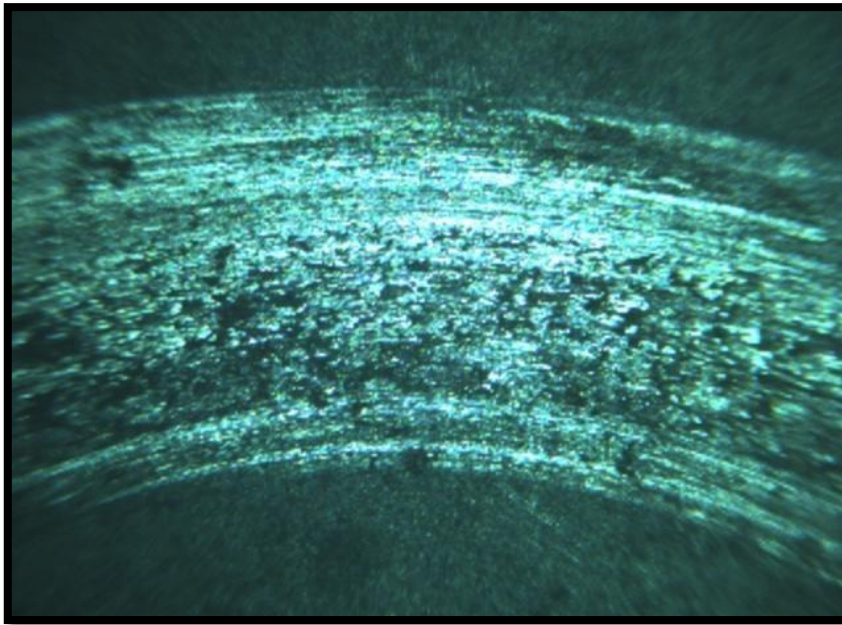
Puis on réalise une imagerie après le traitement thermochimique et ca nous donne :



**Figure 5. 4 :** Images représentant une couche tribo film des échantillons après traitements de boruration a une température de 950°C pour un temps de maintien de (a) 4h et (b) 8h.

- La (**Figure 5. 4**) on peut clairement voir les rayures due aux frottements de la bille avec notre échantillon qu'on appellera usure abrasive, on peut remarquer aussi une présence de couche formée due à la dureté élevé du bore qui impactent la bille qui perd de sa matière on l'appellera une couche tribo film.

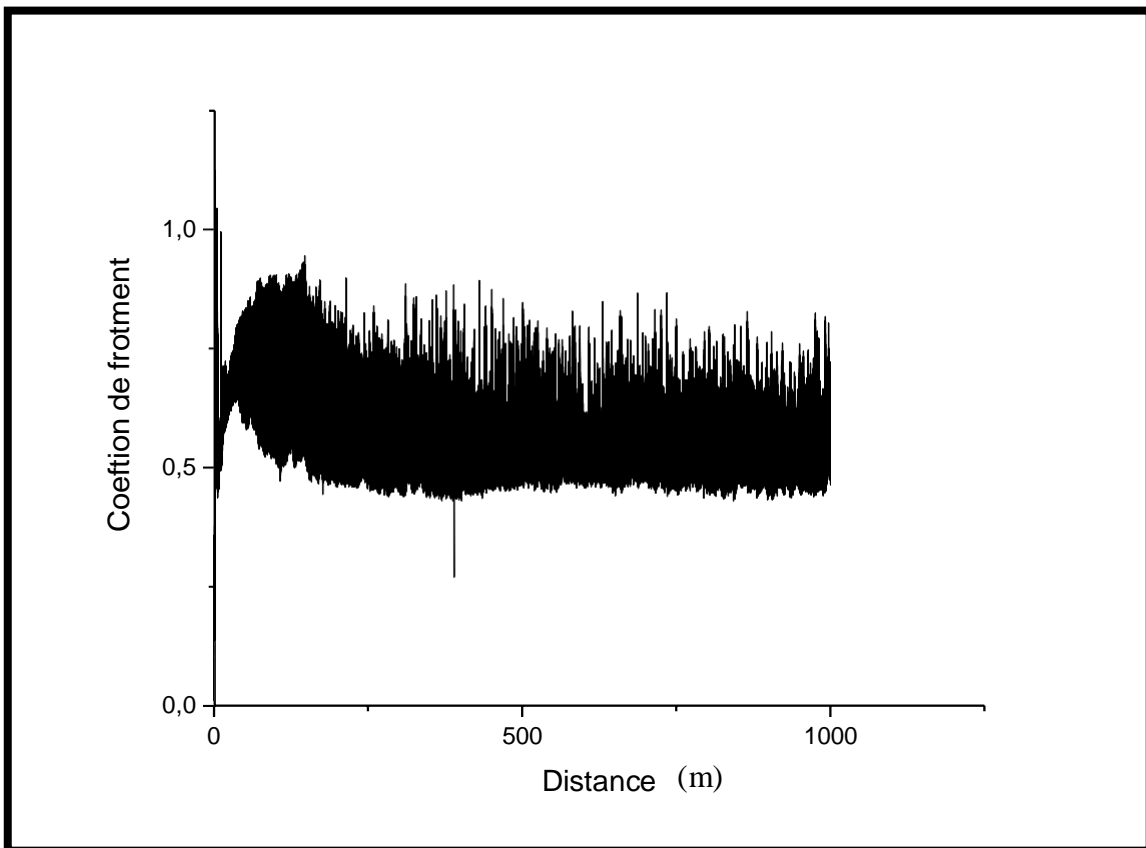
On réalise un autre traitement thermo-chimique (cémentation) sur un échantillon du même acier pour comparer les résultats :



**Figure 5. 5 :** Image représentante une couche tribo film des échantillons après traitements de cémentation a une température de 950°C pour un temps de maintien de 8h.

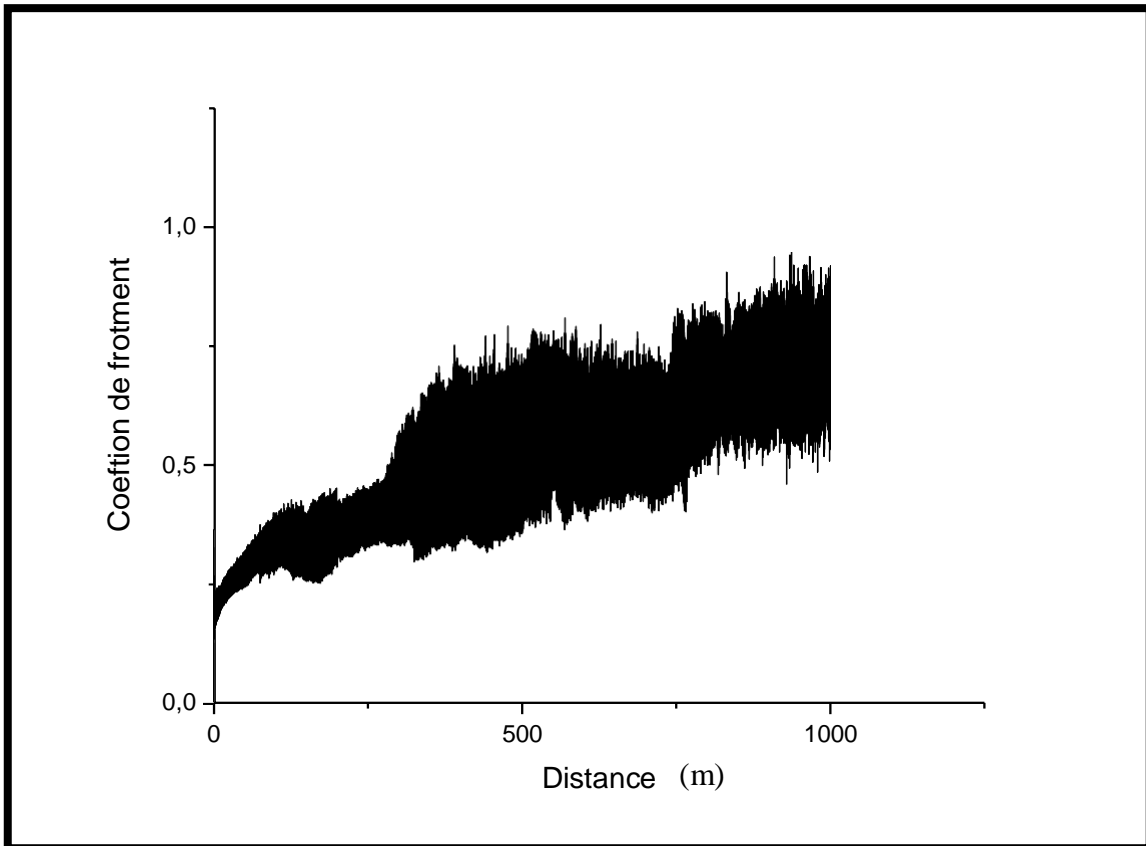
- On remarque dans la (**Figure 5. 5**) les mêmes rayures abrasives avec une couche tribo film due a la dureté élevé des céments qui impactent la bille qui perd de sa matière.

Les différents résultats graphiques sont donnés comme suit :



**Figure 5. 6 :** Le graphe représente les résultats des l'échantillon témoin.

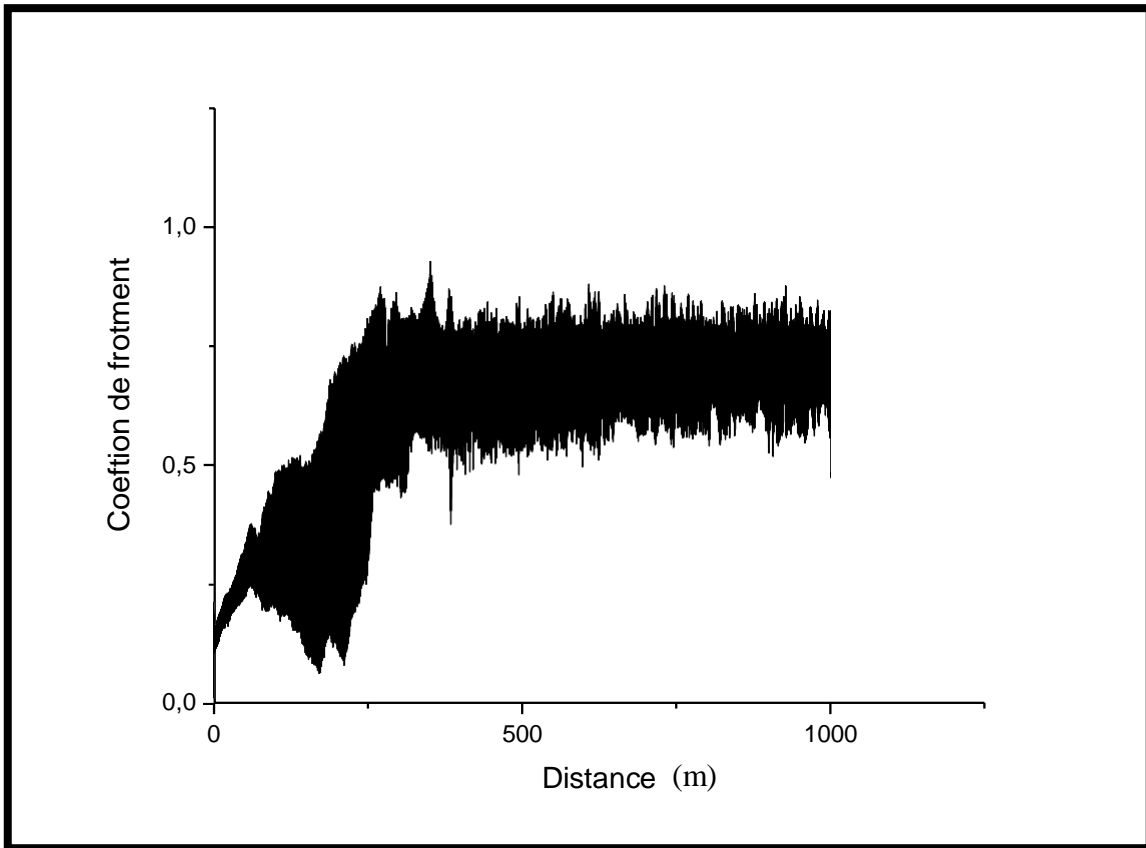
- On remarque dans la (**Figure 5. 6**) que le coefficient de frottement de l'échantillon témoin est aux alentours de  $0.7\mu$  sans la période transitoire de rodage ou le graphe reste stable pendant toute la distance parcourue.



**Figure 5. 7** : Graphe représentant les résultats de l'échantillon borure 4h.

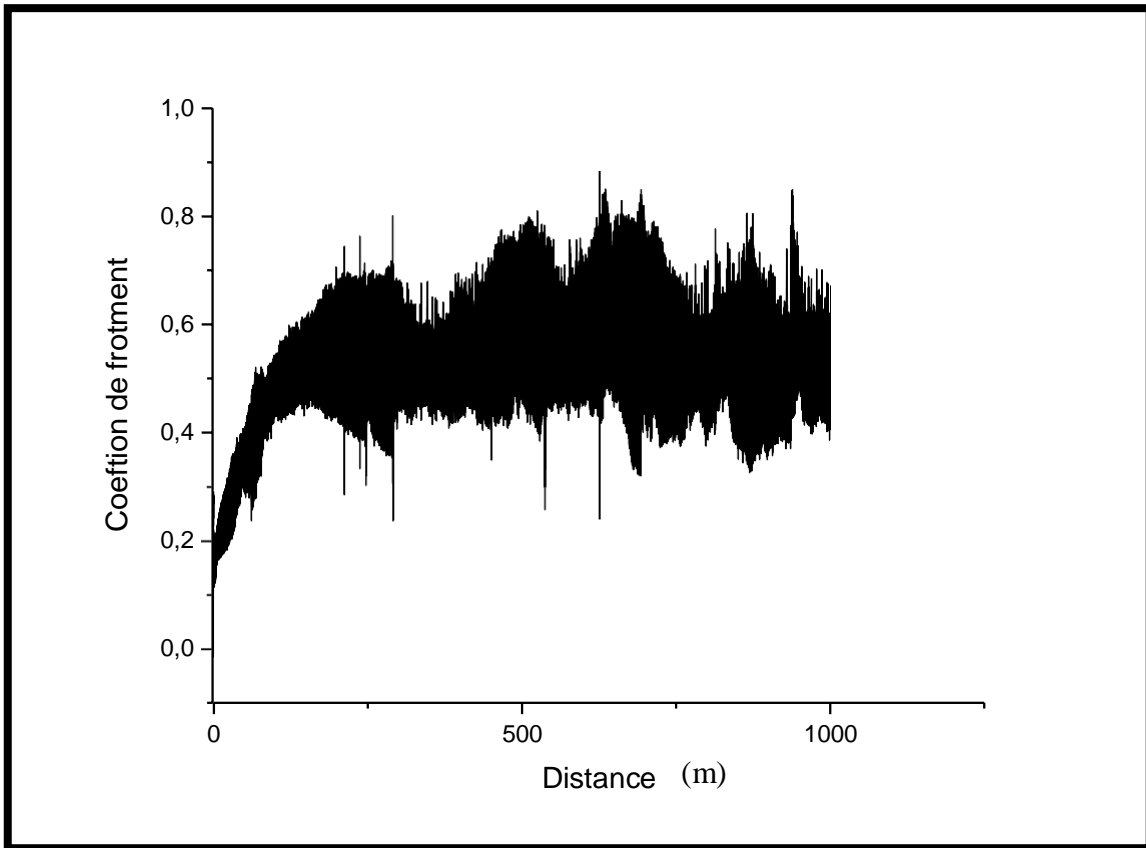
- On remarque dans (**la Figure 5. 7**) deux paliers dans le coefficient de frottement le premier de l'ordre de  $0,5\mu$  et l'autre de  $0,7\mu$  ce qui prouve que le frottement de la bille à éliminer la première couche qui est la couche borure après un parcours de 700m arriver a la partie de l'acier ou le coefficient de frottement remonte a  $0,7\mu$  qui le résultat de l'échantillon témoin.





**Figure 5. 8 :** Graphe représentant les résultats de l'échantillon Borure 8h.

- La (**Figure 5. 8**) On remarque que la distance de 1000m n'était pas suffisante pour éliminer toute la couche borure ce qui nous confirme que l'épaisseur de la couche et la diffusion du bore sur notre matériau est très consistant.



**Figure 5. 9 :** Graphe représentant les résultats de l'échantillon cimenté de 8h.

- La (Figure 5. 9) On remarque que la distance de 1000m n'était pas suffisante pour éliminer toute la couche cimenté mais on trouve plusieurs rugosités sur la surface se qui nous donné des ondulations sur le graphe qui peuvent expliquer la qualité de l'état de surface de l'échantillon.

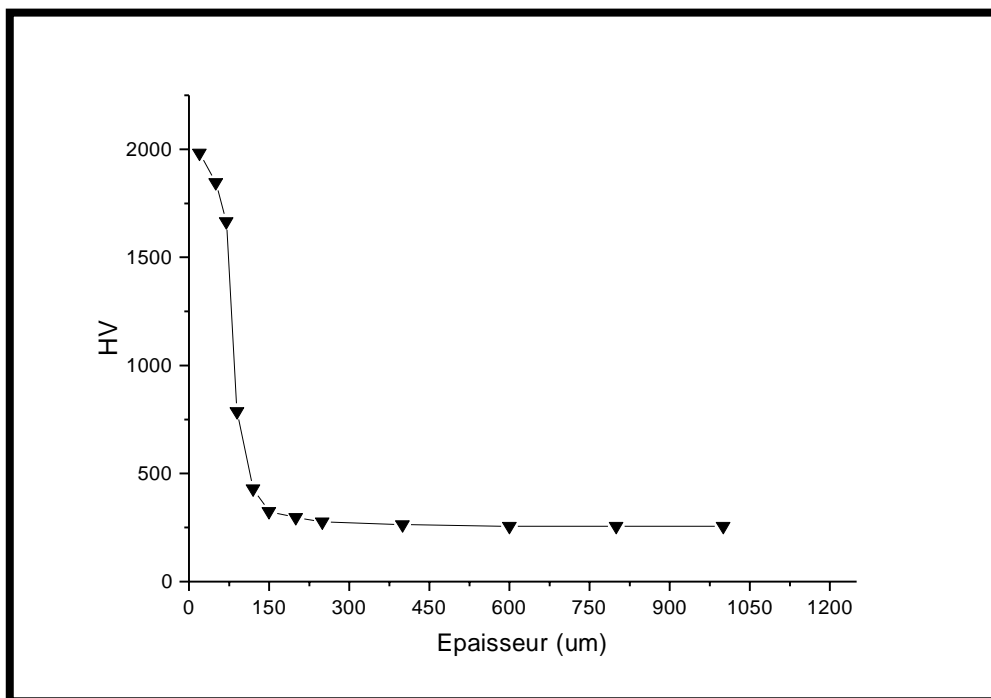
En conclusion, que le têt de maintient a un rôle important dans la formation des couches d'où le traitement de 8h est meilleur que le traitement de 4h. Le traitement de boruration a un état de surface meilleur que le traitement de cimentation.

### 5.4 Examen micro dureté :

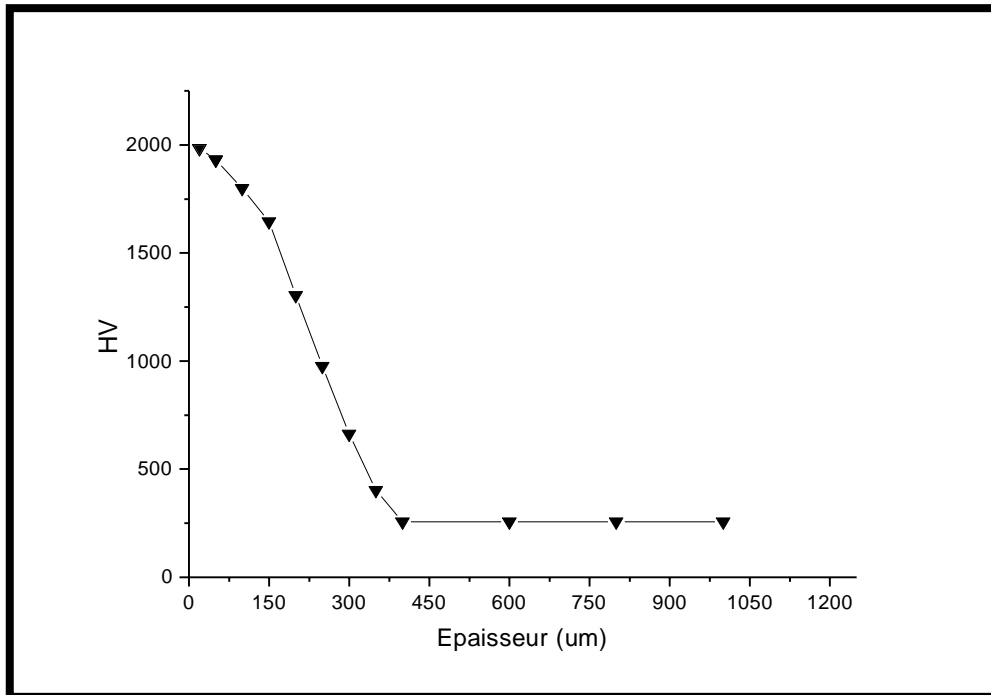
Les paramètres opératoires :

- Des Échelles Micro Vickers, Vickers, Knoop et Brinell.
- Des Forces d'essai : 5gf - 31.25kgf (cellule de charge multiple, boucle fermée).
- Une Oculaire : oculaire grossissant 10X.
- Des Objectifs : 50X, 10X.

Les résultats de notre essai ont donné les graphes suivant :



**Figure 5. 10 :** Profile de micro dureté obtenues sur acier K110 après traitement de boruration pour 950°C pendant 4h.

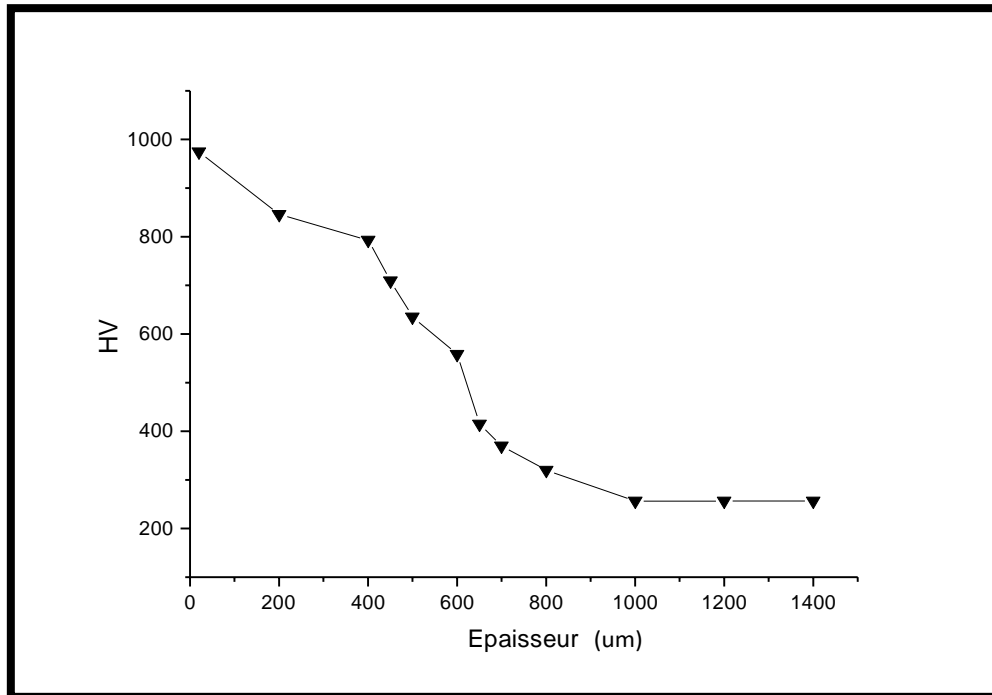


**Figure 5. 11 :** Profile de micro dureté obtenues sur acier k110 après traitement de boruration pour 950°C pendant 8h.

D'après le profile de micro dureté de l'échantillon borure pendant 8h, on remarque l'existence d'une zone superficielle durcie par les borures FeB et Fe<sub>2</sub>B allons jusqu'à 193µm, puis une zone de cœur de notre échantillon, La valeur maximale de la micro dureté est aux alentours de 1900HV.

D'après le profile de micro dureté de l'échantillon borure pendant 4h, on remarque d'une existence d'une faible zone superficielle durcie par les borures de FeB allons jusqu'a 97 µm, puis la zone de cœur de notre échantillon, la valeur maximale est tout de même aux alentours des 1900HV.

La différence de couche entre les deux échantillons est due aux temps de maintien car la diffusion des borures dans l'échantillon de durée de 8h est bien meilleur, on peut conclure que le temps de maintien a un rôle important dans la formation des couches.



**Figure 5. 12 :** Profile de micro dureté obtenues sur acier K110 après traitement de cémentation pour 950°C pendant 8h.

Le profil de micro dureté présente un palier où la micro dureté est constante puis décroît vers le cœur du matériau pour  $T= 950^{\circ}\text{C}$  et 8h de traitement on remarque que la couche cémenté est plus dense avec une épaisseur de 900 $\mu\text{m}$  mais a une valeur de dureté plus basse compare au traitement de boruration, la valeur maximale de la micro dureté est aux alentours de 900HV.

## *Conclusion Générale*

Dans ce travail, un traitement de boruration en poudre a été réalisé sur un acier à outils pour travail à froid BÖHLER-K110, à une température de 950°C avec variation de temps de maintien de 4h et 8h. En utilisant un mélange de poudre de 20% B<sub>4</sub>C, 75% SiC et 5% NaBF<sub>4</sub> (massique).

Le traitement thermo-chimique de boruration sur l'acier à outils pour travail à froid BÖHLER-K110 à pour objectif d'acquérir une amélioration des propriétés mécaniques, à savoir la dureté superficielle de l'acier traité.

L'étude microstructurale par microscope optique après boruration nous a confirmé la formation d'une couche de 97µm pour l'échantillon traité avec un temps de maintien de 4h et 193µm pour l'échantillon à un temps de maintien de 8h, à la surface de tous les échantillons borurés et une épaisseur de couche de 900µm pour l'échantillon cémenté à 8h de temps de maintien.

Le test de micro dureté a donné une valeur maximale de la micro dureté est aux alentours de 1900HV sur les échantillons borurés.

Une étude comparative avec un traitement de cémentation sur le même acier à été fait en appliquant une température 950°C pendant 8h, les résultats sont comme suit :

Formation de couche cémentée Fe<sub>3</sub>C avec une dureté de 900HV qui est en dessous des résultats de boruration mais avec une couche supérieure.

L'étude tribologique a permis de comprendre les mécanismes d'usure ou une usure abrasive à trois corps et une usure adhésive ont été observés aussi l'épaisseur des couches augmente avec l'augmentation de la température et du temps de maintien.

## **Conclusion Générale**

Toutefois, cette étude n'a encore pas été faite auparavant, pour cela nous sommes conscients que certains points, pouvant être traité ultérieurement, n'ont pas été abordés. C'est pour cela que nous mettons en disposition quelques perspectives dans le cadre d'une poursuite à ce travail :

- ✓ Réaliser des essais de traitement thermochimique de boruration dans une atmosphère contrôlée.
- ✓ Réaliser une étude sur le comportement tribologique sur les échantillons traités dans l'atmosphère contrôlée et de faire une étude comparative avec les résultats obtenus lors de cette recherche.
- ✓ Une éventuelle publication scientifique dans le cadre de ce travail, est prévue dans un journal international.

## Référence Bibliographiques

- [1] BENSAADA Saïd, Elaboration Des Métaux Ferreux, Université de BISKRA, (2001), P 74.
- [2] J.N. LOQUET, Caractérisation Métallurgiques Et Mécaniques De Couches, (2015).
- [3] SINGH Ramesh, Classification of Steels, CHAP 6 (2012), P 51.
- [4] BENSAADA Saïd, Classification Des Aciers Et Des Fontes, Université de Biskra, (2019), P 200-214.
- [5] BENE Inox, Pourquoi Utilise L'acier Inoxydable, Fiche Techniques, Saint Priest, (2017), P 03.
- [6] NICOLAS Bouquet, Etude De La Formation Des Joints Soudes Par Diffusion, Université de BOURGOGNE, (2014), P 14.
- [7] BENE Inox, Pourquoi Utilise L'acier Inoxydable, Fiche Techniques, Saint Priest, (2017), P 04.
- [8] DAMSTAHL STAINLESS STEEL, « L'acier Inoxydable Ferritiques », [EN LIGNE], [[www.damstahl.fr/la-connaissance-de-lacier-inoxydable/quest-ce-que-lacierinoxydable/lacier-inoxydable-ferritique](http://www.damstahl.fr/la-connaissance-de-lacier-inoxydable/quest-ce-que-lacierinoxydable/lacier-inoxydable-ferritique)], (29/04/202).
- [9] BENSAADA SAÏD, CLASSIFICATION DES ACIERS ET DES FONTES, UNIVERSITE DE BISKRA, (2019), P 213.
- [10] BENE INOX, POURQUOI UTILISE L'ACIER INOXYDABLE, FICHE TECHNIQUES, SAINT PRIEST, (2017), P 20.
- [11] SOULIGNAC PIERRE, BONNEFOIS BERNARD, SOUTIF ETIENNE, CHAUDRONNERIE EN ACIERS INOXYDABLES, (2007), P 171.
- [12] STRUES, « Acier a Outil », [EN LIGNE], [[HTTPS://WWW.STRUERS.COM/KNOWLEDGE/MATERIALS/TOOL-STEEL](https://www.struers.com/knowledge/materials/tool-steel)], (05/05/2021).
- [13] BENSAADA SAÏD, CLASSIFICATION DES ACIERS ET DES FONTES, UNIVERSITE DE BISKRA, (2019), P 200-218.
- [14] BENSAADA SAÏD, DIAGRAMME FER-CARBONE, UNIVERSITE DE BISKRA (2016), P 92.
- [15] J.BARRALIS, L.CASTEX, J.-C.CHAIZE, INFLUENCE DES CONDITIONS DE TRAITEMENT SUR LA DISTRIBUTION DE PHASES ET DES CONTRAINTES RESIDUELLES DANS LES COUCHES NITRUREES-MEMOIRES ET ETUDES SCIENTIFIQUES REVUE DE METALLURGIE, (1986), P 629-642.
- [16] A.K. SINHA, BORONIZING, HEAT TREATMENT- ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, VOL. 4 (1991), P 437.
- [17] MESSAOUI MOSBAH, SUPPORT DECOURS MATERIAUX METALLIQUES, INSTITUT SUPERIEUR DES ETUDES TECHNOLOGIQUES DE GAFSA, (2014-2015).
- [18] J. CATALDO, D. HARRADEN, F. GALLIGANI, BORIDE SURFACE TREATMENTS, ADV. MATER. PROCESS 157 (4) (2000), P 35-38.



## Référence Bibliographiques

- [19] J.BRANDSTÖTER, W. LENGAUER, JOURNAL DES ALLIAGES ET COMPOSES, 262 - 263 (1997), P 390.
- [20] O. ALLAOUI, N. BOUAOUADJA, G. SAINDERNAN, SURF. COAT AND TECHNOL. 201 (2006), P.34-75.
- [21] MATUSHKA, BORONIZING, CARL HANSEN VERLAG, HEYDEN& SON, MINCH- IENNE, PHILADELPHIE, (1980).
- [22] W. GRÄFEN AND B. EDENHOFER, NOUVEAUX DEVELOPPEMENTS DANS LES PROCESSUS DE DIFFUSION THERMOCHIMIQUE, SURFACE AND COATINGSTECHNOLOGY, 200 (2005), P 1830-1836.
- [23] A.GALIBOIS. O. BOUTENKO. B. VOYZELLE, MECANISME DE FORMATION DES COUCHES BORUREES, SUR LES ACIERS A HAUT CARBONE, TECHNIQUE DES PATES, ACTA METALLURGICA, (1980), P 1753-1763.
- [24] T.W. SPENCE AND M.M. MAKHLOUF, CARACTERISATION DU MECANISME OPERATOIRE DANS LA BORURATION EN MASSE DES ACIERS ACTIVES PAR LE FLUOBORATE DE POTASSIUM, JOURNAL OF MATERIALSPROCESSINGTECHNOLOGY, 168 (2005), P 127-136.
- [25] K. STEWART, BORONIZING PROTECTS METALS AGAINTS WEAR, ADVANCED MATERIALS AND PROCESS, 151 (1997), P 23 – 25.
- [26] ASTM A247-06 STANDARD TEST METHOD FOR EVALUATING THE MICROSTRUCTURE OF GRAPHITE IN IRON CASTINGS.
- [27] PERFORME GUIDE D'AUTO APPRENTISSAGE POUR LES OPERATEURS DE TRAITEMENT THERMIQUE, QUEBEC (2015), P 54.
- [28] ATHMANI MOUSSA, AMELIORATION DES PROPRIETES DE SURFACE D'UN ACIER A OUTILS DE TRAVAIL A CHAUD PAR DES TRAITEMENTS THERMIQUES ET THERMOCHIMIQUES (CEMENTATION), UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA (2011).
- [29] BENSADA SAÏD, TRAITEMENT THERMIQUE ET CLASSIFICATION DES ACIERS ET FONTES, UNIVERSITE DE BISKRA, P 79-87.
- [30] GGB BREANINGS, « DEFINITION DE LA TRIBOLOGIE », [EN LIGNE], [WWW.GGBEARINGS.COM/FR/TRIBOU/LA-TRIBOLOGIE], (15/03/2021).
- [31] Q.J.WANG AND Y-W. CHUNG, EDITORS. ENCYCLOPEDIA OF TRIBOLOGY, SPRINGER, (2013), P 94.
- [32] J.M. GEORGES, FROTTEMENT, USURE ET LUBRIFICATION: LA TRIBOLOGIE OU SCIENCE DES SURFACES, EDITIONS EYROLLES, PARIS, (2000).
- [33] C.A. COULOMB, THEORIE DES MACHINES SIMPLE, EDITIONS BACHELIER, PARIS, (1821).

## Référence Bibliographiques

- [34] ESSOURCESUNIVLEMANS, [EN LIGNE], [ESSOURCES.UNIVLEMANS.FR/ACCESLIBRE/UM/PEDAGO/PHYSIQUE/02/MECA/FROTTE2.HTML], (28/04/2021).
- [35] G. ZAMBELLI, L. VINCENT, MATERIAUX ET CONTACTS, UNE APPROCHE TRIBOLOGIQUE, EDITIONS EYROLLES, PARIS (1998).
- [36] O. BARRAU, ETUDE DU FROTTEMENT ET DE L'USURE D'ACIER A OUTILS DE TRAVAIL A CHAUD, THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE TOULOUSE III, (2004).
- [37] NOEL BRUNETIERE, INTRODUCTION A LA TRIBOLOGIE INSTITUTE PPRIME, FUTUROSCOPE (2016), P 53.
- [38] M. CARTIER, P. KAPSA, USURE DES CONTACTS MECANIQUES MANIFESTATIONS DE L'USURE, TECHNIQUES DE L'INGENIEUR, (2001).
- [39] CORNET AND J-P. DEVILLE. PHYSIQUE ET INGENIERIE DES SURFACES. MONOGRAPHIE DE MATERIOLOGIE. EDP SCIENCES, LES ULIS, FRANCE, (1998).
- [40] ANIRBAN MAHATO, NARAYANK. SUNDARAM, HO YEUNG, MICHAEL LUKITSCH, ANILK. SACHDEV AND SRINIVASAN CHANDRASEKA, QUANTITATIVE IN SITU ANALYSIS OF DEFORMATION, IN SLIDING METALS EFFECT OF INITIAL STRAIN STATE, TRIBOLOGY LETTERS, CHAP 3, P 60.
- [41] M. GODET, THE THIRD BODY APPROACH A MECHANICAL VIEW OF WEAR, (1984), P 437 - 452.
- [42] ABRAMS ENGINEERING SERVICES, FICHE TECHNIQUE K110, ABRAMS ACIERS PREMIUM.
- [43] STAPHYLINE BÖHLER EDELSTAHL GMBH & CO KG, CERTIFICAT D'ANALYSE N° 846838, (2021/01/27).
- [44] ACIER PREMIUM, COLD WORK STEEL BÖHLER, [EN LIGNE], [WWW.FR.ABRAMS-INDUSTRIES.COM/ACIER/PREMIUM-1237], (14/02/2021).
- [45] NIKON METROLOGY, INDUSTRIEL MICROSCOPES, [EN LIGNE], [HTTPS://WWW.NIKONMETROLOGY.COM/EN-GB/INDUSTRIAL-MICROSCOPES/UPRIGHT-MICROSCOPES-ECLIPSE-LV150N], (21/05/2021).
- [46] ANTON PAAR, TRB3 PIN-ON-DISK TRIBOMETRE, [EN LIGNE], [HTTPS://WWW.ANTON-PAAR.COM/CORP-EN/PRODUCTS/DETAILS/TRB3-PIN-ON-DISK-TRIBOMETER], (25/05/2021).
- [47] INNOVATEST EUROPE, FLCON 400, [EN LIGNE], [HTTPS://WWW.INNOVATEST-EUROPE.COM/FR/PRODUITS/FALCON-400], (25/05/2021).