

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun – Tiaret



Faculté des Sciences de la Matière

Département de Physique

MEMOIRE

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Physique

OPTION : Physique des matériaux

Thème:

***Approche de l'intelligence artificielle pour la
simulation de la cinétique de boruration
thermochimique***

Présenté par :
BENDJARA Sara

Soutenue publiquement le:

20 /06/2018 devant le Jury composé de:

Mr A. KADARI

M. C .A

Université de Tiaret Président

Mr A. LARABI

M .C .A

Université de Tiaret Examineur

Mr B. MEBAREK

M .C .A

Université de Tiaret Encadreur

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mes chers parents

À mes chères sœurs

À mes chers frères

À mon cousin Abdelkader

*À toute la famille **Bendjara***

*À plus professeur que je respecte **B.MBAREK***

À mes très chers amis : Fatima Zahra, Samira, Mohamed Amine

À tous les membres de ma promotion

À tous ceux qui me sont chers.

Sara

Remerciement

Tous d'abord, nous remercions le dieu **Allah**, notre créateur de nos avoir donné tout la puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Monsieur **MEBAREK Bendaoud** qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils et ses dirigés du début à la fin de ce travail.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nos ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, tout particulièrement :

Monsieur **KADARI Ahmed**, Maître de conférences "A" à l'université de Tiaret, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude à Monsieur **LARABI Abdelkrim**, Maître d'assistante "A" à l'université de Tiaret, pour avoir faire de lecteur notre mémoire, aller l'examiner et ils peuvent évaluer cette mémoire. Nous vous remercions pour l'intérêt que vous avez porté à ce travail et pour vos précieux conseils et remarque.

Finalement, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenues et à tout ce qui participe de réaliser ce mémoire.

Liste des figures

Figure I.1 : Traitements thermiques et thermochimiques.....	7
Figure I.2 : Dispositif industriel de boruration électrochimique.....	9
Figure I.3 : Diagramme d'équilibre du système binaire Fe-B.....	14
Figure I.4 : Réseau cristallin du borure de fer FeB.....	15
Figure I.5 : Structure de FeB, (projection sur le plan (001)).....	16
Figure I.6 : Réseau cristallin du borure de fer Fe ₂ B.....	16
Figure I.7 : La structure de Fe ₂ B (projection sur le plan cristallographique (001)).....	17
Figure I.8 : Type des couches borurées.....	19
Figure I.9 : Micrographie optique d'une coupe transversale de la couche borurée.....	20
Figure I.10 : Méthode utilisée pour mesurer l'épaisseur de la couche borurée.....	20
Figure II.1 : Paradigme du système expert.....	25
Figure II.2 : Composantes du système expert.....	26
Figure II.3 : Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel.....	26
Figure II.4 : Neurone formel.....	27
Figure II.5 : Différents types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel.....	27
Figure II.6 : Représentation de la taille dans la logique floue.....	29
Figure II.7 : Partition floue de l'univers de discours de la variable linguistique.....	30
Figure II.8 : Caractéristiques d'un sous-ensemble flou.....	30
Figure II.9 : Partition floue.....	31
Figure II.10 : Formes de quelques fonctions d'appartenance.....	31
Figure II.11 : Système d'inférence floue.....	34
Figure II.12 : Méthode de fuzzification pour une mesure exacte.....	34
Figure II.13 : Méthode de fuzzification pour une mesure incertaine.....	35
Figure III.1 : Diagramme binaire fer-carbone simplifié.....	41
Figure III.2 : La concentration de bore en fonction de la profondeur (diffusion de bore).....	43
Figure III.3 : Système d'inférence floue.....	48
Figure III.4 : Le système de la logique flou utilisé pour la modélisation.....	48
Figure III.5 : Ensemble flou temps.....	49
Figure III.6 : Ensemble flou température.....	49
Figure III.7 : Ensemble flou épaisseur de la couche borurée.....	50
Figure IV.1 : Détermination de l'épaisseur de la couche de borure.....	54
Figure IV.2 : Variation de la constante du taux de croissance en fonction de température pour la phase Fe ₂ B.....	57
Figure IV.3 : Évolution de l'épaisseur de la couche borurée Fe ₂ B en fonction de temps.....	58
Figure IV.4 : Evolution de l'épaisseur de la couche borurée en fonction de la concentration de bore en surface à 1143k.....	59
Figure IV.5 : Concentration de bore en phase Fe ₂ B (T=1193k pour 8 h de traitement).....	60
Figure IV.6 : Concentration de bore en phase γ-Fe (T=1193k pour 8 h de traitement).....	60
Figure IV.7 : Gain de masse en fonction de temps (T=1273k).....	61
Figure IV.8 : Interface de calcul de l'épaisseur.....	63
Figure IV.9 : Épaisseur en fonction du temps et de la température.....	63
Figure IV.10 : Comparaison entre les deux modèles, modèle mathématique et modèle LF.....	64
Figure IV.11 : Représentation en trois dimensions des résultats de modèle LF.....	65

Liste des tableaux

Tableau I.1: Propriétés des poudres de bore.....	11
Tableau I.2 : Compositions chimiques des mélanges et paramètres de boruration utilisés dans la technique de la boruration dans des poudres.....	12
Tableau I.3: Phases présentes et les duretés des borures de certains métaux de transition..	14
Tableau I.4: Principales caractéristiques des borures Fe_2B et FeB	17
Tableau III.1 : La solubilité du bore dans le fer à différentes températures.....	42
Tableau III.2 : Les règles linguistiques qui relier l'entre avec la sortie.....	50
Tableau IV.1 : Composition chimique de l'acier utilisé en % de masse.....	54
Tableau IV.2 : Les données utilisées pour la simulation.....	55
Tableau IV.3 : Valeurs expérimentales et simulées de la constante k	56
Tableau IV.4 : Comparaison des valeurs des épaisseurs de la couche borurée obtenues expérimentalement et celles obtenues par modèle de la logique floue.....	62
Tableau IV.5 : Valeurs expérimentales et simulées de la constante k	64

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	2
Chapitre I : La technique de boruration	
I.1 INTRODUCTI.....	5
I.2 TRAITEMENTS DE SURF.....	5
I.3 APPORTS ET LES PROPRIETES ATTENDUS DES TRAITEMENTS DE SURFACE.....	6
I.4 CLASSIFICATION DES TRAITEMENTS DE SURFACE.....	6
I.5 TRAITEMENT DE BORURATION.....	7
I.6 MILIEU DE BORURATION ET SOURCE DE BORE.....	8
I.6.1 Processus de boruration en milieu gazeux.....	8
I.6.2 Processus de boruration dans un milieu liquide.....	9
I.6.2.1 Boruration électrochimique dans des sels fondus.....	9
I.6.2.2 Boruration sans électrolyse dans un bain du sel fondu.....	10
I.6.3 Boruration avec les sources solides.....	10
I.6.3.1 Technique des poudres.....	11
I.6.3.2 Technique des pates.....	12
I.6.4 Borures dans le métal.....	13
I.7 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES BORURES DE FER.....	14
I.7.1 Diagramme d'équilibre Fer-Bore.....	14
I.7.2 Structure des borures de fer.....	14
I.7.2.1 Borure de fer FeB.....	15
I.7.2.2 Borure de fer Fe ₂ B.....	16
I.7.3 Caractéristiques des borures FeB et Fe ₂ B.....	17
I.8 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION SUR LA BORURATION.....	17
I.8.1 Carbone.....	18
I.8.2 Chrome.....	18
I.8.3 Manganèse.....	18
I.8.4 Nickel.....	18
I.8.5 Molybdène.....	18
I.9 BORURATION ET LES TYPE DES COUCHES BORUREES.....	18
I.9.1 Mesure de l'épaisseur des couches borurées.....	20
I.9.2 Aspects pratiques de la boruration et ses applications.....	21
I.10 CONCLUSION.....	21
Chapitre II : L'intelligence artificielle – la logique floue	
II.1 INTRODUCTION.....	23
II.2 HISTORIQUE.....	24
II.3 DIFFERENTS DOMAINES D'APPLICATION.....	24
II.4 SYSTEMES EXPERTS.....	24
II.4.1 Paradigme du système expert.....	25
II.4.2 Composantes du système expert.....	26
II.5 RESEAU DE NEURONES ARTIFICIELS.....	26
II.5.1 Composant du neurone artificiel.....	26
II.5.2 Comportement.....	27
II.5.3 Utilité.....	28
II.6 LOGIQUE FLOUE (FUZZY LOGIC).....	28
II.6.1 Présentation et définitions.....	28
II.6.1.1 Incertitude et imprécision.....	28
II.6.1.2 Définition.....	29
II.6.2 Variable floue ou linguistique.....	29
II.6.2.1 Fonctions d'appartenance.....	30

SOMMAIRE

II.6.2.2	Operateurs flous.....	32
II.6.3	Raisonnement en logique floue.....	32
II.6.4	Systèmes d'inférence flous.....	33
II.6.4.1	Fuzzification.....	34
II.6.4.2	Base de données.....	35
II.6.4.3	Base de règles floues.....	35
II.6.4.4	Mécanisme d'inférence floue (unité de décision).....	36
II.6.4.5	Défuzzification.....	37
II.7	SYNTHESE DU FLOU ET DU NEURONAL.....	37
II.8	CONCLUSION.....	38

Chapitre III : Modélisation mathématique

III.1	INTRODUCTION.....	40
III.2	ETAT STRUCTURAL DES ACIERS ET DE FER.....	40
III.2.1	Concentration de carbone dans l'acier : le diagramme binaire Fe-C.....	41
III.2.2	Austénite, perlite, ferrite, cémentite et martensite.....	41
III.3	DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER –BORE.....	42
III.4	CINETIQUE DES COUCHES BORUREES.....	42
III.4.1	Modèle mathématique de la diffusion des couches monophasées.....	42
III.4.1.1	Concentration de bore dans chaque phase.....	45
III.4.2	Modèle de prédiction de la logique floue.....	47
III.4.2.1	Modèle logique floue.....	47
III.4.2.2	Ensembles flous.....	48
III.5	CONCLUSION.....	51

Chapitre IV : Résultat et discussions

IV.1	INTRODUCTION.....	53
IV.2	ENVIRONNEMENT DE CALCUL.....	53
IV.3	VALIDATION EXPERIMENTALE DU MODELE.....	54
IV.3.1	Acier utilisé.....	54
IV.3.2	Procède expérimentale.....	54
IV.3.3	Mesure de l'épaisseur.....	54
IV.4	RESULTATS ET DISCUSSION.....	55
IV.4.1	Modèle mathématique de la diffusion.....	55
IV.4.1.1	Constantes du taux de croissance.....	56
IV.4.1.2	Détermination de l'épaisseur de la couche borurée.....	58
IV.4.1.3	Concentration de bore pour chaque phase.....	59
IV.4.1.4	Gain de masse.....	61
IV.4.2	Modèle de la logique floue.....	62
IV.4.2.1	Application du modèle de la logique floue.....	62
IV.5	CONCLUSIONS.....	65
	CONCLUSION GENERALE.....	67
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	69

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Un traitement de surface est une opération mécanique, chimique, électrochimique ou physique qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données. Les traitements de surface jouent un rôle éminent dans le domaine de la tribologie.

Différents processus peuvent être appliqués pour traiter les métaux en surface sont destinées à modifier les caractéristiques des matériaux métalliques, elles agissent principalement sur : la dureté la résistance à la rupture la résilience ou la ductilité.

La boruration est un traitement Thermo-Chimique pour métaux ferreux, qui résulte en une surface de borure de fer très dure et résistante à l'usure. Le traitement est idéal pour les pièces qui sont exposées simultanément à de l'usure abrasive et adhésive, avec des exigences de résistance à la corrosion élevées. En principe tous les métaux ferreux sont applicables à la boruration. Les grands avantages d'une boruration sont une obtention d'une dureté de surface qui est trois fois plus élevé que dans l'état non traitée et deux fois plus dur que la nitruration ou une trempe.

Théoriquement et malgré l'importance des procédés de boruration dans le domaine industriel, il n'y a pas de modèles bien détaillés sur la cinétique de croissance des couches borurées.

Ces dernières années, les moyens informatiques connaissent une utilisation intensive dans la résolution des problèmes de traitement de la surface en utilisant les méthodes de simulation numérique.

Dans de nombreux cas l'expérience est difficile à réaliser ou trop chère, c'est pour cela qu'on fait recours à la simulation. La simulation est un moyen de compréhension et de contrôle qui permet non seulement de mieux comprendre les problèmes mais aussi d'accélérer les développements industriels et de prévoir les qualités du produit ou du système étudié.

D'autres méthodes existent telles que la technologie d'intelligence artificielle, déjà utilisée en traitement de surface. Réseaux de neurones, la logique floue est devenue accessible pour ce type de processus.

L'objectif principal de ce travail est l'étude numérique de la cinétique de boruration d'un acier au carbone en utilisant deux modèles, un modèle de diffusion basé sur la loi de Fick et le deuxième modèle basé sur la technique de l'intelligence artificielle (approche de la logique floue (LF)).

INTRODUCTION GENERALE

Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier la cinétique de boruration de l'acier C15, et développer un modèle mathématique basé sur la technique de l'intelligence artificielle (LF) pour simuler le processus de boruration. Le modèle mathématique est basé sur l'approche de la logique floue, pour estimer l'influence et le rôle des différents paramètres participant dans ces processus.

En plus d'une introduction et d'une conclusion, ce mémoire est composé de quatre chapitres :

- Le premier chapitre est dédié à la présentation de la technique de la boruration et les différents domaines d'application ainsi que les propriétés physico-chimiques des couches borurées obtenues.
- Dans le second chapitre on donne la technique de l'intelligence artificielle (la logique floue).
- Dans le troisième chapitre on donne deux modèles appliqués à la boruration, un modèle mathématique basé sur la loi de Fick et un modèle basé sur l'approche de la logique floue.
- Dans le dernier chapitre on présente les résultats pour valider les modèles présentés dans le chapitre III.

Chapitre I

La technique de boruration

I.1 INTRODUCTION

La problématique des traitements de surface relève à la fois de la science des matériaux et du génie des procédés. Les traitements de surface répondent à des besoins réels d'amélioration des performances des matériaux [1]. Leur fonction étant d'améliorer la tenue du matériau vis-à-vis des sollicitations externes, tout en préservant ses propriétés volumiques. Les agressions dues à l'usure ou à la corrosion sont un problème commun en ingénierie, que la pièce, le dispositif, le système, soient en contact avec des solides, des liquides ou des gaz.

Parmi ces problèmes communs est le problème d'alliages métalliques qui sont très utilisés dans le domaine industriel [2]. Vu les insuffisances présentées par ces alliages, telles que les problèmes de corrosion, usure et fatigue de contact, plusieurs recherches ont été menées pour améliorer les propriétés des surfaces de ces alliages sur le plan mécanique, physico-chimique et tribologique. C'est pourquoi, des traitements de surface tels que la boruration, la nitruration, la cémentation et la carbonitruration sont appliquées pour satisfaire ces exigences sur le plan industriel.

I.2 TRAITEMENTS DE SURFACE

La technologie de traitement de surface est à la pointe des technologies d'ingénierie de surface et a permis le développement au niveau international de divers revêtements de projection thermique et en bains [3].

Les traitements de surface sont destinés à conférer un aspect et des caractéristiques particulières à la pièce métallique.

Leurs utilisations sont les suivantes :

Anticorrosion (45%), anti usure (24%), aspect (11%), conductibilité (8%), coefficient de frottement (8%), autre (4%).

Pour cela, un revêtement métallique est déposé par voie électrolytique ou chimique. Ce procédé comprend trois phases principales [3]:

- Le dégraissage ou décapage du support métallique.
- Le traitement à proprement parlé (dépôt des métaux, galvanisation).
- Le rinçage de la pièce (final ou entre chaque phase afin d'éliminer l'exercés de produit).
- Il existe une trentaine de technique regroupée en 5 familles :

- ✓ Traitement mécanique (42%)
- ✓ Traitement thermochimique (4%)
- ✓ Traitement par voie aqueuse et voie sèche (6%)
- ✓ Peinture (31%)
- ✓ Traitement de la conversion (17%)

I.3 APPORTS ET PROPRIETES ATTENDUS DES TRAITEMENTS DE SURFACE

Les principales familles de propriétés conférées aux pièces par les traitements de surface sont:

1- La protection vis-à-vis du milieu extérieur : température élevée ou très basse, présence de variations thermiques brutales, sollicitations tribologiques (résistance aux divers modes d'usure, limitation des forces de frottement), corrosion et oxydation.

2- Les propriétés fonctionnelles, c'est-à-dire, les autres :

- Propriétés optiques : couleur, réflexion ou transmission de la lumière, inscriptions.
- Propriété de « blindage électromagnétique ».
- Propriétés électriques (conduction / isolation / semi-conductivité).
- Gestion de l'interaction physico-chimique avec l'environnement : mouillabilité, propriété barrière de diffusion [4].

I.4 CLASSIFICATION DES TRAITEMENTS DE SURFACE

Les traitements de surface diffèrent les uns des autres selon les paramètres suivants, qui constituent autant de critères possibles de classification :

- Le milieu d'apport ou de mise en œuvre : solide, liquide, plasma ou gazeux.
- L'interaction entre le procédé de mise en œuvre et le substrat.
- La nature du substrat.
- La nature des phases déposées : métalliques, céramiques, sels ou polymères.
- L'énergie utilisée pour le dépôt et la sollicitation correspondante subie par le substrat mécanique, électrique ou chimique.

Les traitements de surface constituent souvent une solution technique et économique pour résoudre des problèmes des matériaux. Ces procédés permettent non seulement de réaliser des dépôts protecteurs mais aussi de modifier des états de surface du point de vue mécanique, chimique ou microstructural [4].

La quasi-totalité des techniques de traitement de surface de métaux et alliages fait intervenir une ou plusieurs transformations de phase, adaptées au fonctionnement particulier de la surface. Les

propriétés changent avec la profondeur. La surface entrant en contact avec un deuxième corps doit résister, par exemple, à l'usure, tandis qu'une excellente adhésion avec le substrat doit être assurée à l'interface qui, dans certaines couches de protection, se trouve à moins d'un micromètre de la surface.

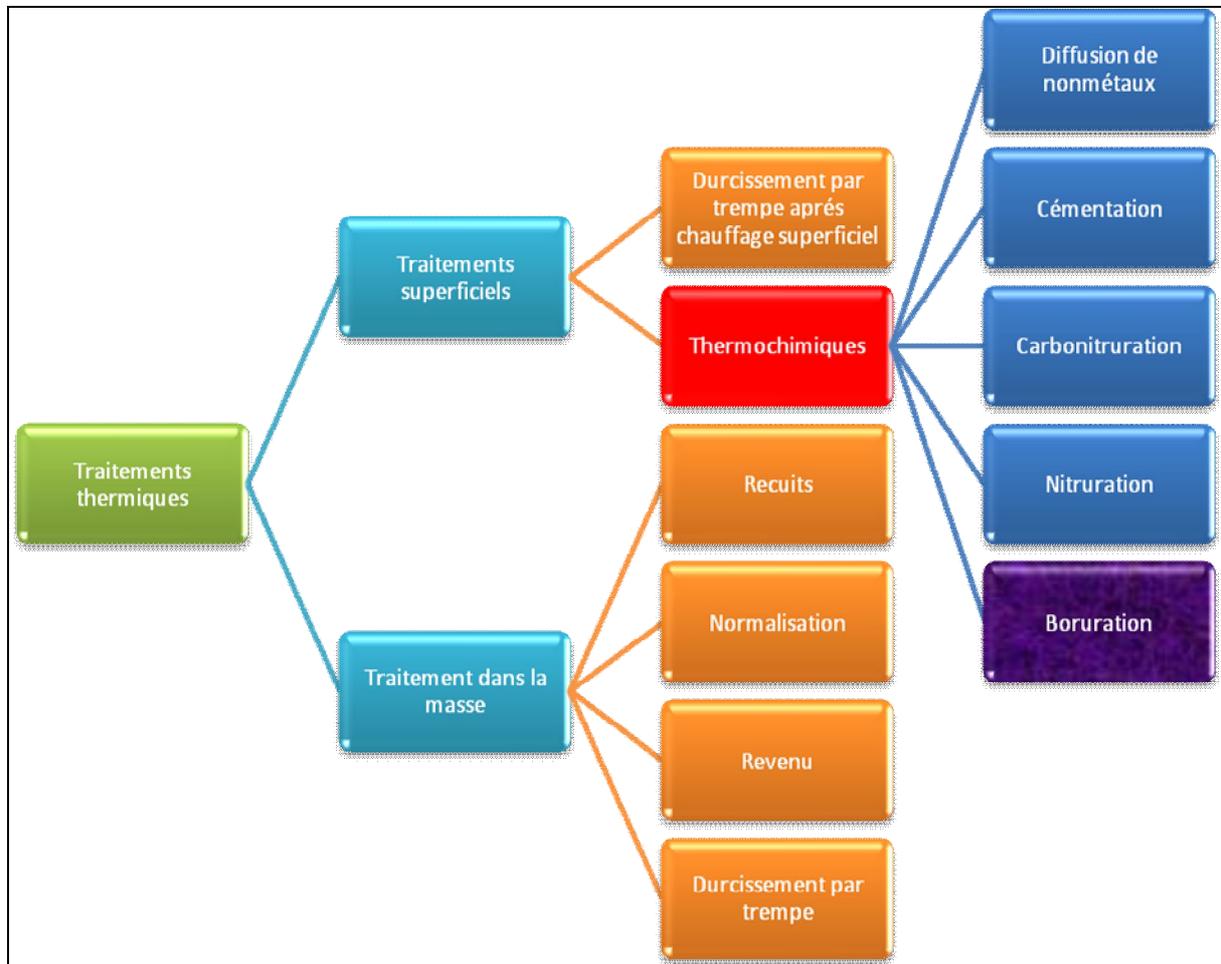


Figure I.1 : Traitements thermiques et thermochimiques [5,9].

Il existe différents processus pour traiter les surfaces des métaux. L'objectif de traitement est de produire des surfaces qui soient dures (la dureté peut atteindre 1800 HV) par conséquent constituent un des moyennes essentielles pour améliorer les propriétés fonctionnelles des métaux.

La boruration est l'un des traitements thermochimiques les plus utilisés

I.5 TRAITEMENT DE BORURATION

La boruration est un traitement thermochimique de durcissement de la surface qui peut être appliquée à une large gamme des matériaux (métaux ferreux, non ferreux, cermets).

La surface d'une pièce est enrichie en bore à des températures de traitements entre 800 et 1000°C durant des temps allant de 0,5 à 10 h. En conséquence directe se forment des couches

homogènes de borures. La dureté élevée de l'ordre de 2000 HV, mais également la structure particulière de la couche, produit une résistance à l'usure extraordinaire [6].

Dans ce processus, les atomes de bore sont présentés dans le treillis métallique à la surface d'une pièce à travers l'énergie thermique pour former des borures avec les atomes du substrat, et permettant d'obtenir des couches très résistantes à la corrosion et à l'usure abrasive et adhésive [7].

Le borure de surface peut être sous forme de couche de borure en phase unique ou double, FeB et/ou Fe₂B à la surface des pièces traitées. Le milieu de boruration peut être solide (poudre ou pâte), gazeux, ou liquide.

Ce procédé comprend quatre étapes :

- a- Un milieu de réaction qui peut libérer du bore à l'état atomique à partir d'une source en bore.
- b- Le contact des atomes du bore avec la surface du substrat et la formation des liaisons, chimiques avec les atomes du substrat à travers le phénomène d'absorption,
- c- Le début de germination des borures métalliques sous forme d'aiguilles.
- d- Fin de croissance de ces aiguilles en donnant naissance à une couche compacte et continue.

I.6 MILIEU DE BORURATION ET SOURCE DE BORE

Le milieu de boruration peut être solide (poudre ou pâte) liquide ou gazeux [7,8].

I.6.1 Processus de boruration en milieu gazeux

Cette technique est utilisée pour le milieu gazeux, se base sur la décomposition thermique de composés volatils de bore [10]. Cette méthode apparaît comme étant bien appropriée du fait de l'inexistence de bains de sels généralement polluants et de l'absence de nettoyage de la pièce après traitement. Elle est caractérisée par une meilleure répartition du bore en raison de la circulation du gaz.

Les composés organiques les plus utilisés sont le triméthyle de bore (CH₃)₃B et le triéthyle de bore (C₂H₅)₃B. Ces composés étant riches en carbone (une couche de borure avec un taux en carbone élevé). Leur utilisation provoque une cémentation (carburation) des aciers traités [11,12].

Dans la pratique on évite d'employer le diborane car il est très toxique et explosif. Ce processus a été appliqué principalement sur des matériaux avec des points de fusion plus élevés.

I.6.2 Processus de boruration dans un milieu liquide

Dans ce cas, le traitement des pièces se fait dans un milieu liquide. La libération du bore vers la surface de la pièce traitée nécessite la réduction chimique du composé porteur de bore. Cette réduction peut s'effectuer soit par [13]:

I.6.2.1 Boruration électrochimique dans des sels fondus

Il s'exécute en général avec des borax, et le plus employé dans l'industrie. Pour ce type de traitement, les électrolytes les plus utilisés sont à base de tétraborate de sodium $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (Borax) et le tétra fluoroborate de potassium KBF_4 .

La réduction chimique du composé porteur de bore s'effectue par voie électrochimique. Ornig et Schaaber [14], décrivent l'équipement d'essai dans lequel l'échantillon est la cathode et une barre de graphite joue le rôle d'une anode, le tout étant plongé dans un bain de sels fondus.

La figure I.2 schématise le dispositif standard utilisé pour la boruration électrochimique dans des sels fondus [14].

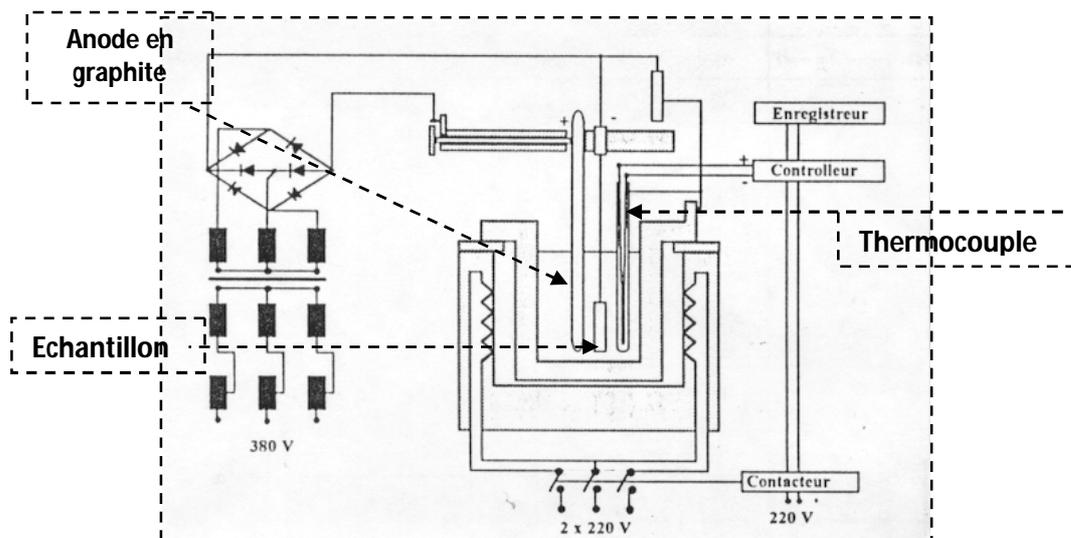


Figure I.2 : Dispositif industriel de boruration électrochimique [12].

Ce processus a plusieurs inconvénients :

- La grande viscosité du borax fondu rend la boruration pratiquement impossible en dessous d'une température de 850 °C, et ne permet pas une homogénéité de température dans un bain de dimensions industrielles.
- La variation de densité de courant spécialement avec des pièces de forme complexe, fait que l'on obtient des épaisseurs des couches borurées non régulières.

- La quantité de bore ne peut pas être réglée à tel point. Les pièces sont recouvertes d'une couche de sel adhérente rendant le nettoyage difficile et coûteux [14].

Le processus de boruration électrolytique se fait selon les réactions suivantes [15]:

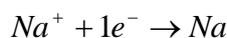
1. Dissociation du borax par formation d'ions de sodium et de tétraborate. Les ions de tétraborate se déchargent à l'anode et se décomposent en trioxyde de bore et d'oxygène.



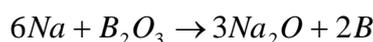
2. L'oxygène se transforme en CO₂ au contact de l'anode en graphite.

3. Le bore absorbé sur l'échantillon se forme à la cathode d'après les réactions suivantes :

- Dépôt d'ions de sodium sur l'échantillon à borurer



- Le sodium ainsi formé réduit le trioxyde de bore et libère du bore ainsi que de l'oxyde de sodium :



I.6.2.2 Boruration sans électrolyse dans un bain de sels fondus

Le principe de la boruration chimique se base sur la différence de potentiel électrochimique entre la pièce et l'agent réducteur contenu dans le bain de boruration. Un borure donné ne se forme que si son potentiel électrochimique est supérieur à celui de l'agent réducteur ajouté au borax [16].

Le bain est constitué d'une substance contenant du bore, généralement Na₂B₄O₇ mais aussi de KBF₄ ou B₂O₃ [16] et d'un agent réducteur, souvent B₄C ou SiC un métal ou un alliage. Afin d'améliorer les propriétés physicochimiques du bain, on y ajoute souvent des chlorures ou des carbonates de métaux alcalins [17].

I.6.3 Boruration avec les sources solides

Le traitement de boruration est effectué en utilisant une source du bore à l'état solide. La boruration avec du bore amorphe permet d'avoir des couches minces et poreuses.

Les produits les plus utilisés dans ce traitement sont les poudres de bore, les poudres de ferrobore et les poudres des carbures de bore [14].

- Les 5% B₄C, 90% SiC, 5% NaBF₄
- 5% B₄C, 90% SiC, 5% KBF₄
- 50% B₄C, 45% SiC, 5% KBF₄
- 85% B₄C, 15% Na₂CO₃

- 95% B₄C, 5% Na₂CO₃
- 84%B₄C, 16%Na₂B₄O₇.

On peut aussi utiliser des sources solides comme moyen de boruration, Kunst et Schaaber [18], ont effectué une étude sur les conditions de la boruration employant les substances solides (poudre).

Nom	Formule	Poids moléculaire	Contenu de B (%)
Bore amorphe	B	10.82	95.97
Ferro bore	Fe-B	/	17.19
Carbure de bore	B ₄ C	55.29	77.26

Tableau I.1: Propriétés des poudres de bore.

La boruration dans un milieu solide a beaucoup d'applications industrielles en raison de sa propreté et simplicité. Les trois composés essentiels dans cette boruration sont :

Une source riche en bore, un activateur qui sert a déposé les atomes de bore sur les surfaces et un diluant inerte.

I.6.3.1 Technique des poudres

En raison de sa simplicité et la propreté des pièces obtenues, la boruration par la technique des poudres est la plus utilisée dans le domaine industriel. Ce procédé consiste à emballer les pièces à traiter dans des caisses en acier contenant le mélange de poudres, puis à les chauffer dans des fours à moufles [17].

Les avantages importants de ce processus sont [14,19]:

- Une manipulation facile.
- La possibilité de changer la composition de la poudre.
- Le besoin d'équipement très simple.

Les poudres les plus utilisées sont:

❖ Bore amorphe

Le bore amorphe active plus la surface que le bore cristallin .IL a des couches plus épaisses peuvent être produites, et est augment la boruration et des couches biphasées peuvent être produites. Cette méthode est abandonnée actuellement car le bore amorphe est d'un coût relativement élevé [17].

❖ Ferrobore

Les couches borurées obtenues avec le ferrobore sont techniquement de mauvaise qualité parce qu'elles sont la plupart du temps de type K [14] (Voir la figure I.8).

Cette morphologie particulière a été attribuée à l'action du silicium présent en tant qu'impureté dans le ferrobore (environ 1%).

Pour l'usage industriel le ferrobore n'est pas disponible avec la pureté nécessaire.

Le ferrobore très pur ne peut être fabriqué industriellement [14]. Autrement les couches dégénérées du type K (Voir la figure I.8) sont inutilisables dans l'industrie [20].

❖ Carbure de bore

Il est possible d'employer le carbure de bore dans la boruration. Le carbure de bore est actuellement disponible sur le marché, par qualités consistantes à un prix relativement bas et en quantité suffisante. Les longues durées et les températures élevées de traitement avec le carbure de bore ont produit des couches biphasées, composées de Fe_2B et de FeB [19].

Les paramètres de boruration et la composition chimique des mélanges recommandés pour la technique des poudres sont rassemblés dans le tableau I.2.

Milieu de boruration	Température de boruration (°C)	Temps de boruration (h)	Épaisseur de la couche borurée (µm)	Borures obtenus
100% B amorphe dans une atmosphère de H_2	850-900	2-5	30-130	$FeB+Fe_2B$
75% B amorphe+25% Al_2O_3	950-1050	2-5	45-330	$FeB+Fe_2B$
33% B amorphe + 65% Al_2O_3 +2 NH_4Cl	850-900	2-5	100	$FeB+Fe_2B$
100% B_4C	950-1000	2-6	50-300	$FeB+Fe_2B$
98-99% B_4C +1-2% AlF_2	800-1000	2-6	60-300	$FeB+Fe_2B$
Ekabor 1, Ekabor 2, Ekabor 3	900	4-12	100-200	$FeB+Fe_2B$

Tableau I.2: Compositions chimiques des mélanges et paramètres de boruration utilisés dans la technique de la boruration dans des poudres.

I.6.3.2 Technique des pâtes

Cette technique est surtout utilisée pour la boruration partielle des pièces [17]. Les pièces [22] à traiter sont couvertes d'une pâte à base du bore, puis chauffées dans un four.

Les pâtes de boruration se composent :

- D'un constituant solide contenant une source riche en bore (carbure de bore, ferrobore, bore

amorphe), un activateur (cryolite ou fluoroborate) et un diluant inerte (alumine ou carbure de silicium)

- D'un liant liquide de nature organique (méthyle cellulose, nitrocellulose dissoute dans l'acétate de butyle).

Les zones à ne pas borurer, sont protégées par un dépôt électrolytique de cuivre qui empêche la diffusion du bore.

I.6.4 Borures dans le métal

Le procédé de boruration peut être effectué sur les alliages ferreux (aciers et fontes) et les alliages nonferreux.

La boruration est aussi réalisable sur des substrats à base de métaux de transition tels que : nickel, cobalt, molybdène, tantale, tungstène et titane.

Le tableau I.3 montre les phases formées dans la couche borurée et les valeurs de micro dureté lors de la boruration de certains métaux de transition.

Substrat	Phases présentes	Valeurs de microdureté
Fer	FeB	1900-2100
	Fe ₂ B	1800-2000
Cobalt	CoB	1850
	Co ₂ B	1500-1600
Nickel	Ni ₄ B ₃	1600
	Ni ₂ B	1500
	Ni ₃ B	900
Molybdène	Mo ₂ B	1660
	MoB ₂	2400-2700
Titan	TiB	2500
	TiB ₂	3370
Tungstène	W ₂ B	2700
	WB	2700
	W ₂ B ₅	2700
Niobium	Nb ₂ B ₂	2600-3000
	NbB ₄	2600-3000
Tantale	Ta ₂ B	3200-3500

	TaB ₂	2500
--	------------------	------

Tableau I.3 : Phases présentes et les duretés des borures de certains métaux de transition.

I.7 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CIMIQUES DES BORURES DE FER

I.7.1 Diagramme d'équilibre Fer-Bore

Le diagramme d'équilibre binaire Fe-B est présenté dans la figure I.3.

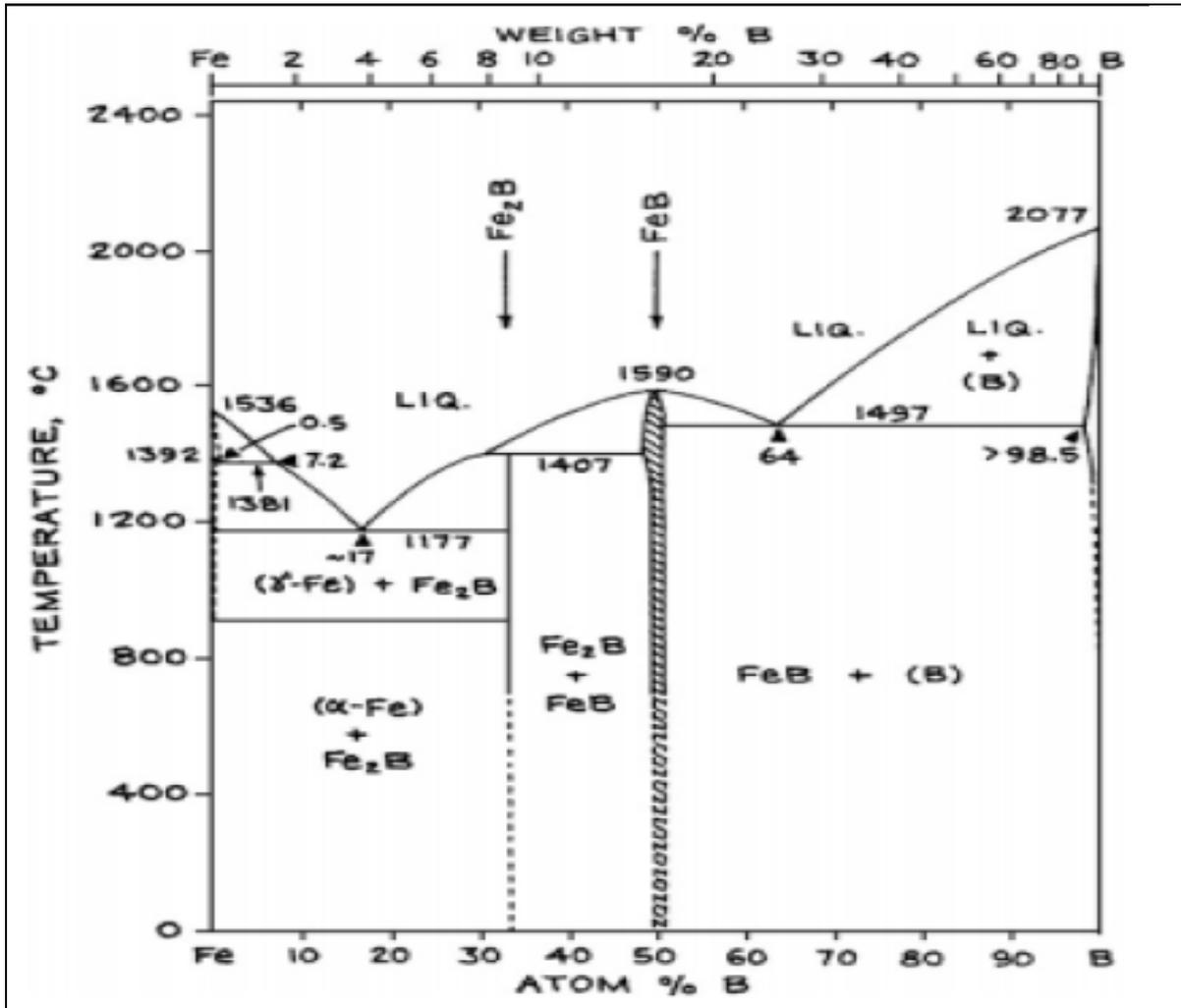


Figure I.3 : Diagramme d'équilibre du système binaire Fe-B [9,13].

D'après le système binaire Fer-Bor (figure I.3) deux borures d'une seule composition existent:

- 1- Fe₂B avec poids du bore de 8.83%.
- 2- FeB avec poids du bore de 16.23%.

I.7.2 Structure des borures de fer

La structure des borures de fer a été étudiée pour la première fois par Kiessling [20].

I.7.2.1 Borure de fer FeB

Le borure FeB peut prendre deux formes allotropiques, et n'est stable que sur une gamme de composition chimique extrêmement étroite, FeB à une structure cristalline orthorhombique (figure I.4)

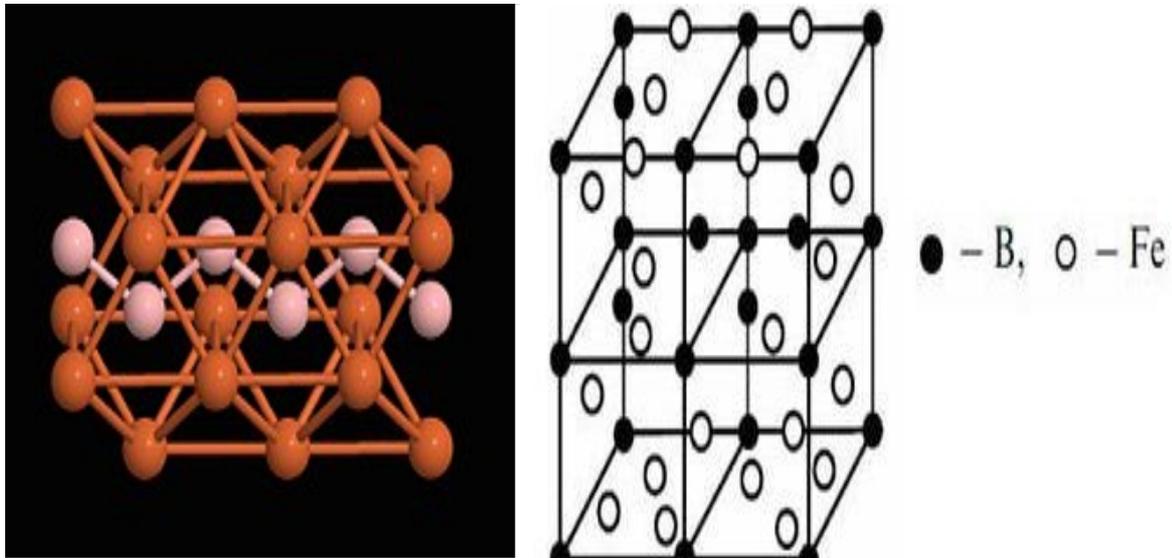


Figure I.4 : Réseau cristallin du borure de fer FeB.

La maille élémentaire est composée de quatre atomes de fer et de quatre atomes de bore. Ces derniers occupent les centres des prismes trigonaux ; on peut dire que ces atomes sont arrangés en des chaînes en zig-zig comme le montre la figure 1.4. La distance inter-atomique B-B est de l'ordre de 0.177 nm.

Les paramètres de maille de la phase FeB ont les valeurs suivantes [21] :

$$a = 0.4053 \text{ nm,}$$

$$b = 0.5495 \text{ nm,}$$

$$c = 0.2946 \text{ nm}$$

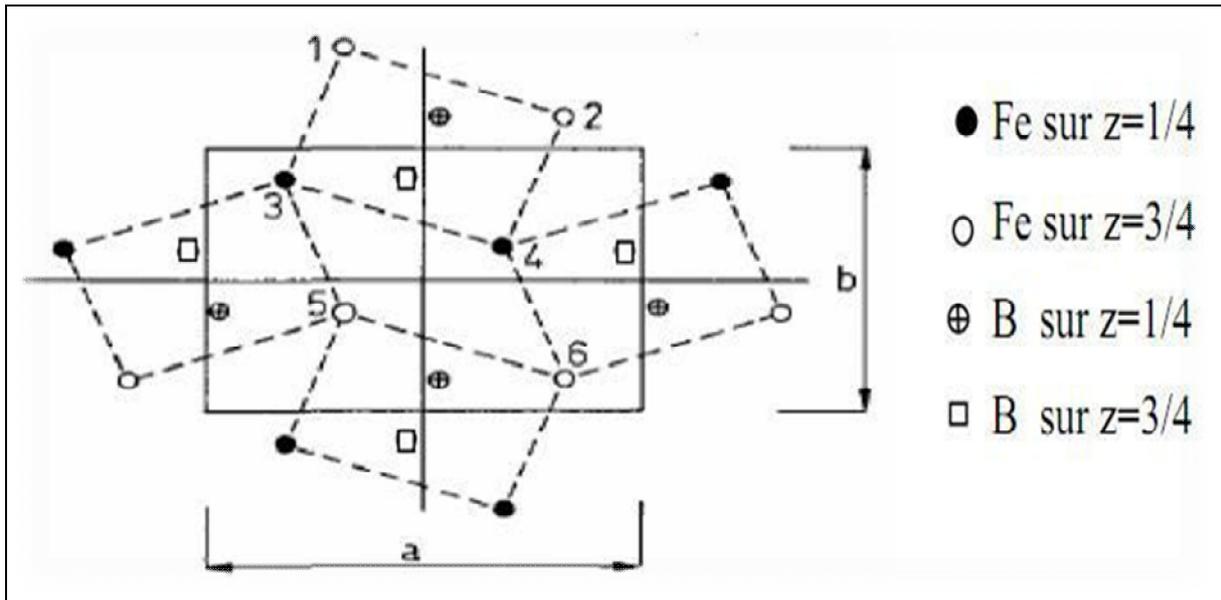


Figure I.5 : Structure de FeB, (projection sur le plan (001)).

I.7.2.2 Borure de fer Fe₂B

Le borure Fe₂B cristallise selon un réseau quadratique centré (figure I.6).

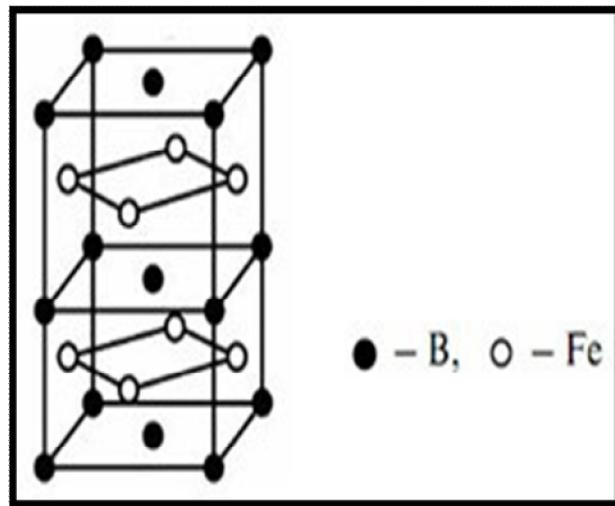


Figure I.6 : Réseau cristallin du borure de fer Fe₂B.

La maille élémentaire est composée de douze atomes. L'arrangement des quatre atomes de bore est décrit dans la figure I.6.

Les paramètres de maille ont les valeurs suivantes :

$$a = b = 0.5078 \text{ nm}$$

$$c = 0.4249 \text{ nm.}$$

La formation de FeB et de Fe₂B dépend de plusieurs paramètres tels que la durée de traitement, la température du traitement, la concentration de bore et la composition chimique de la surface du substrat.

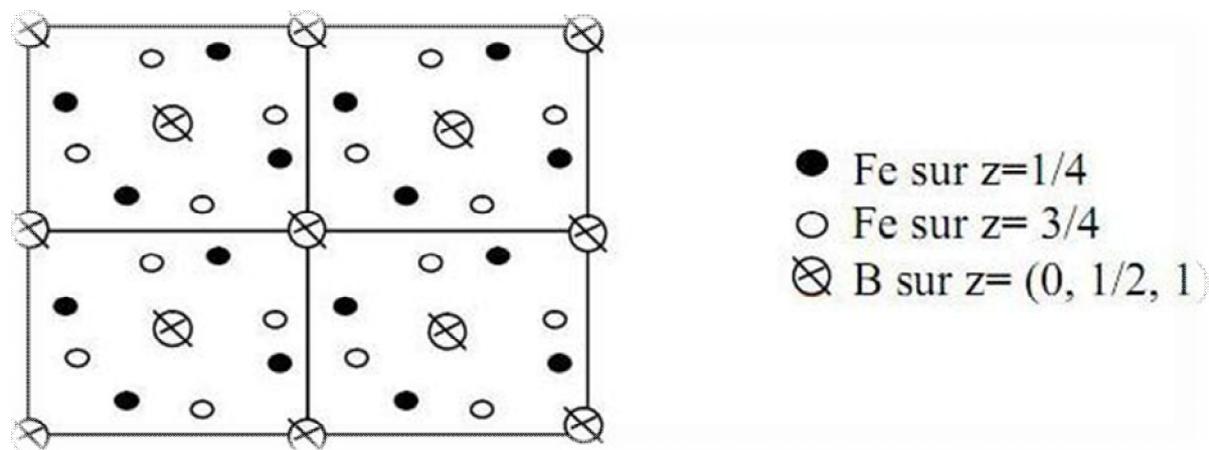


Figure I.7 : La structure de Fe₂B (projection sur le plan cristallographique (001)).

I.7.3 Caractéristiques des borures FeB et Fe₂B

Les principales caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de borure Fe₂B et FeB sont présentées dans le tableau I.4.

Propriétés	Fe ₂ B	FeB
Température de fusion (°C)	1390	1550
Température de Curie (°C)	742	325
Masse volumique (kg/m ³)	6750	7430
Conductibilité thermique (W/m °C)	20 – 30	10 – 20
Résistivité électrique (μΩ /m)	1000	2000
Module d'élasticité (GPa)	590	285
Ténacité K _{Ic} (MPa ^{1/2})	3.3	2.7
Dureté (HV)	1800-2000	1900-2100

Tableau I.4 : Principales caractéristiques des borures Fe₂B et FeB [22,17].

I.8 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION SUR LA BORURATION

La présence des éléments d'alliages (comme le carbone, le chrome, vanadium, molybdène, manganèse, nickel) dans le substrat modifie la morphologie et les propriétés des couches borurées [23]. De ce fait, ces éléments entrent en compétition avec le bore et ils peuvent avoir une influence directe sur la cinétique de boruration.

I.8.1 Carbone

Vu 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 $Fe_{23}(B, C)_6$.

L'augmentation de la teneur en carbone réduit ainsi l'épaisseur de la couche borurée.

I.8.2 Chrome

Cet élément présente une grande affinité pour le bore, il favorise donc la formation de la phase FeB au détriment de la phase Fe_2B pour des teneurs croissantes en chrome. Pour des aciers alliés au chrome, en plus des borures de fer, on peut avoir la formation de deux types de borures de chrome (CrB et Cr_2B).

I.8.3 Manganèse

Le manganèse n'affecte pas les couches borurées, il se dissout dans le borure Fe_2B plutôt que dans le borure FeB.

I.8.4 Nickel

Sa faible solubilité dans les borures entraîne une ségrégation dans les couches sous-adjacentes à Fe_2B . Les aciers au nickel présentent des couches borurées à dureté réduite.

I.8.5 Molybdène

La substitution partielle du fer par du molybdène dans les deux borures FeB et Fe_2B entraîne la formation des complexes de type $(Fe, Mo)B$ et $(Fe, Mo)_2B$. Ces composés entravent la croissance de la couche borurée obtenue, leur dureté est proportionnelle à la teneur en molybdène.

I.9 BORURATION ET LES TYPE DES COUCHES BORUREES

Kunst et Schaaber ont développés un système d'évaluation présenté par la figure I.8 ils proposent un modèle d'arrangement des couches possibles dans différents groupes selon leur composition [14].

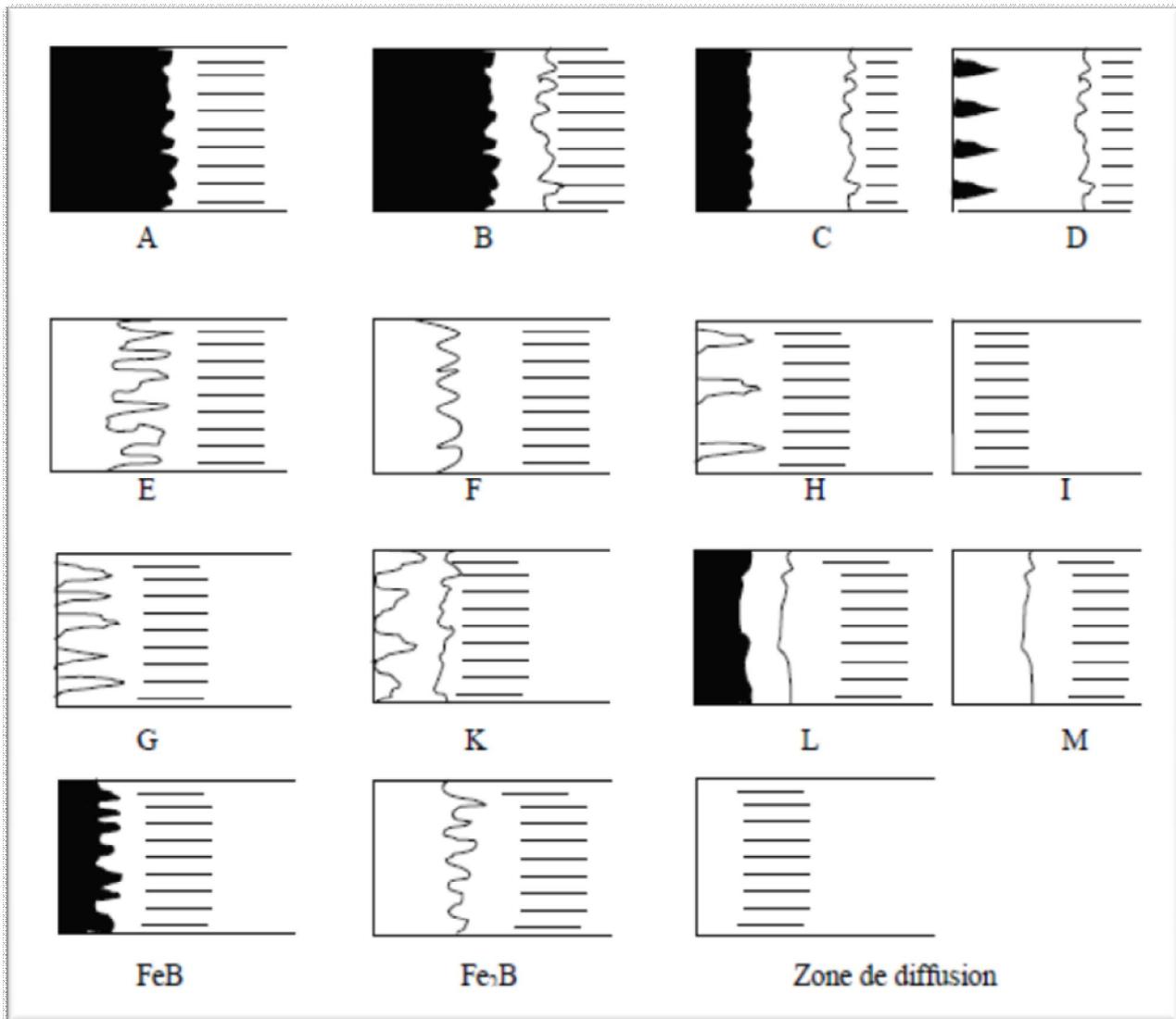


Figure I.8 : Type des couches borurées [14].

Les différents types de couches sont caractérisés comme suit :

- A : couche monophasé, exclusivement FeB.
- B : couche biphasée de Fe_2B et de FeB, (Couche complète).
- C : couche biphasée, la couche FeB mince que la couche Fe_2B .
- D : couche biphasée, mais seulement des dents isolées de FeB.
- E : couche monophasée, exclusivement Fe_2B , (fortement denté).
- F : couche monophasée, exclusivement Fe_2B , moins denté.
- G : couche Fe_2B , de différentes dents.
- H : couche Fe_2B , avec des dents très isolées.
- I : zone de diffusion.
- K : couche dégénérée.
- L : couche biphasée de FeB et de Fe_2B , pas des dents.
- M : la couche monophasée de FeB et de Fe_2B , pas des dents.

Ce système d'évaluation permet de juger l'aspect de la couche borurée, et la convenance d'un processus de boruration.

I.9.1 Mesure de l'épaisseur des couches borurées

La mesure de l'épaisseur des couches borurées est rendue problématique par la forme aciculaire de ces couches. La longueur des dents de borure dépend de la nature de l'acier.

Dans la pratique il est difficile de mesurer expérimentalement l'épaisseur de la couche borurée par un microscope optique. Cette difficulté est due à la nature et à la structure de l'interface (borure/substrat) figure I.9.

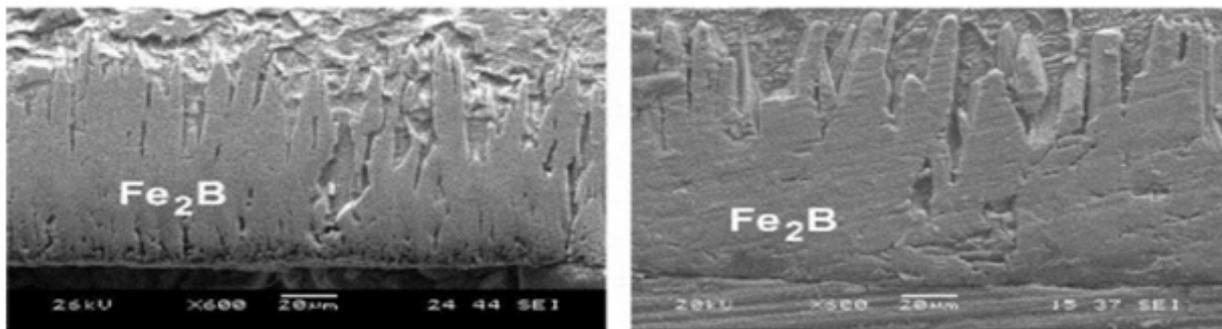


Figure I.9 : Micrographie optique d'une coupe transversale de la couche borurée.

La figure I.9, indique la présence de Fe_2B , dans un acier borurée à 1273°C pour 6 h avec la pâte de bore) [19].

La méthode proposée par Kunst consiste à mesurer sur un microscope optique les longueurs des deux aiguilles les plus profondes et celles des deux aiguilles les moins profondes et de prendre la longueur moyenne de ces quatre aiguilles comme étant la valeur de l'épaisseur de la couche borurée à l'endroit sélectionné (figure I.10). Ces mesures sont répétées à trois, quatre ou cinq endroits différents, leur valeur moyenne étant prise comme valeur de l'épaisseur de la couche borurée [19].

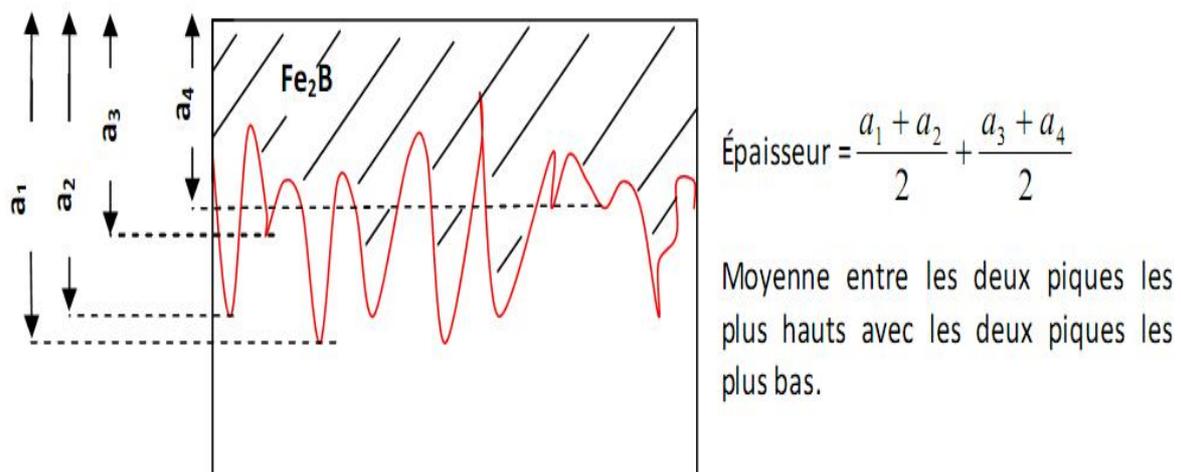


Figure I.10 : Méthode utilisée pour mesurer l'épaisseur de la couche borurée.

I.9.2 Aspects pratiques de la boruration et ses applications

Le processus de la boruration trouve de nombreuses applications industrielles, on peut recourir à la boruration chaque fois que l'on doit faire face à des problèmes d'usure, comme l'usure abrasive, ou les problèmes de corrosion dans des milieux acides ou basiques ou dans des métaux fondus [14].

Les qualités recherchées diffèrent selon l'application considérée (protection anti corrosion, propriété tribologique, optiques, thermique...).

Guide fils (fils textiles et métallique)

- Plaques de criblage (matériaux granulés ou pulvérulents)
- Pales de ventilateurs (atmosphères poussiéreuses)
- Guides chaînes-scies de tronçonneuses Axes tournants dans des joints d'étanchéité
- Élément de conduite pour le transport pneumatique des grains ou autres matières pulvérulentes ou pour le transport du béton
- Moules ou filières à céramique
- Éléments de moules de fonderie d'alliages légers et d'alliages de zinc (acier Z35 CDV5)
Pièces de pompes à acides

I.10 CONCLUSION

La technique de boruration est utilisée pour réaliser des couches dures qui résistent à l'usure et à la corrosion. Elle peut être effectuée soit en phase solide, liquide ou gazeuse.

Les borures qui sont produits ont des propriétés physico-chimiques et mécaniques intéressantes pour les différentes applications industrielles. On peut réaliser avec cette technique des couches borurées monophasées ou biphasées. La boruration est avantageuse par rapport aux autres procédés de traitement de surfaces des matériaux.

Chapitre II

L'intelligence artificielle – la logique floue

II.1 INTRODUCTION

Depuis l'émergence de l'informatique, les chercheurs essaient d'injecter des notions d'intelligence humaine dans des machines. Étant conçue et fabriquée par l'homme, on qualifie cette forme d'intelligence comme "L'intelligence artificielle" ou IA [24].

L'intelligence artificielle est souvent définie comme la science de créer et de programmer des ordinateurs capables d'accomplir des tâches qui nécessitent l'intelligence quand elle doit être faite par un être humain.

L'intelligence artificielle, souvent abrégée avec le sigle IA, est définie par l'un de ses créateurs, Marvin Lee Minsky, comme : " la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que [25]: l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critiquée. "

L'intelligence artificielle (IA) est « l'ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence ». Elle correspond donc à un ensemble de concepts et de technologies plus qu'à une discipline autonome constituée.

Souvent classée dans le groupe des sciences cognitives, elle fait appel à la neurobiologie computationnelle (particulièrement aux réseaux neuronaux), à la logique mathématique (sous-discipline des mathématiques et de la philosophie) et à l'informatique. Elle recherche des méthodes de résolution de problèmes à forte complexité logique ou algorithmique. Par extension elle désigne, dans le langage courant, les dispositifs imitant ou remplaçant l'homme dans certaines mises en œuvre de ses fonctions cognitives [24].

Les problèmes soulevés par l'intelligence artificielle concernent des domaines divers comme :

- L'ingénierie,
- Les sciences de la cognition humaine (neurosciences cognitives, psychologie cognitive, ...)
- La philosophie de l'esprit pour les questions associées à la connaissance et à la conscience.

Il existe deux types d'Intelligence :

➤ **Intelligence artificielle forte**

Le concept d'intelligence artificielle forte fait référence à une machine capable non seulement de produire un comportement intelligent, mais d'éprouver une impression d'une réelle conscience de soi, de « vrais sentiments », et une compréhension de ses propres raisonnements.

➤ Intelligence artificielle faible

La notion d'intelligence artificielle faible constitue une approche pragmatique d'ingénieur : chercher à construire des systèmes de plus en plus autonomes, des algorithmes capables de résoudre des problèmes d'une certaine classe, etc... Mais, cette fois, la machine simule l'intelligence, elle semble agir comme si elle était intelligente. (Il s'agit donc d'un programme préalable effectué par l'homme, ex : Jeu d'échec en ligne) [25].

II.2 HISTORIQUE

1917 : Karel Cape, dramaturge Grec, donne le nom de robot à des machines intelligentes.

1931 : Kurt Godel publie le théorème sur l'incomplétude.

1936 : Alan Turing publie des notions de décidabilité.

1940 : Norbert Wiener introduit les automates systèmes auto régulé avec boucle de rétro action.

1943 : Première étude sur les neurones formels.

1944 : Début des ordinateurs basés sur les idées de Turing et Von Newman.

1949 : Donald Hebb explique les phénomènes d'apprentissage.

1955 : Premier langage d'intelligence artificielle.

1957 : Rosinblatt invente le perceptron ancêtre des réseaux de neurones.

1961 : Cybernétique de Wiener.

1971 : Début des microprocesseurs avec les circuits intégrés d'Intel [26].

II.3 DIFFERENTS DOMAINES D'APPLICATION

Les réalisations actuelles de l'intelligence artificielle peuvent être regroupées en différents domaines, tels que :

- Les systèmes experts.
- L'apprentissage automatique.
- Le traitement automatique des langues.
- La reconnaissance des formes, des visages et la vision en général [25,26].

II.4 SYSTEMES EXPERTS

Les résultats les plus aboutis de l'intelligence artificielle concernent la résolution, par une machine, de problèmes complexes dans un domaine délimité de compétences. C'est la démarche des systèmes experts : les connaissances des experts humains sont explicitées symboliquement sous forme de règles d'inférences que la machine peut ensuite appliquer à une situation réelle.

Il existe plusieurs applications opérationnelles, telles que le jeu d'échecs ou l'aide au diagnostic médical. Non seulement ces systèmes peuvent traiter un problème, mais ils sont également capables d'expliquer ensuite le raisonnement détaillé permettant d'aboutir au résultat. En outre, les plus perfectionnés d'entre eux sont à même de nuancer leurs conclusions, en recourant à la "logique floue" [25].

II.4.1 Paradigme du système expert

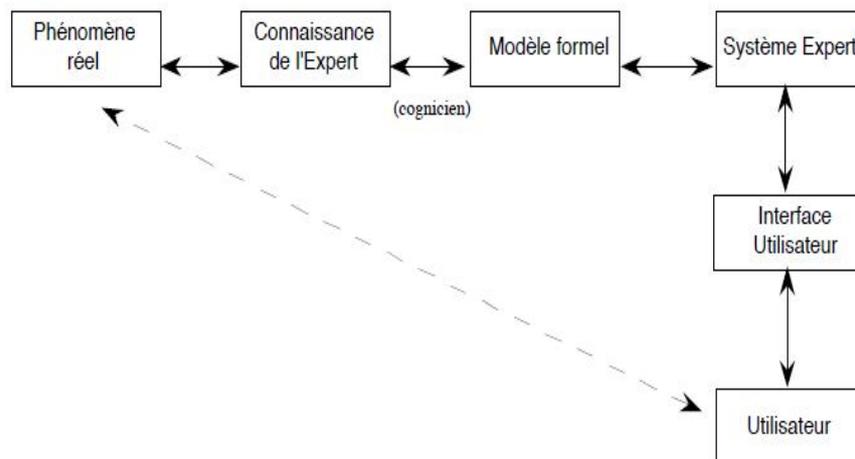


Figure II.1 : Paradigme du système expert.

Les systèmes experts ont pour but de modéliser puis de simuler, Leur champ d'application est vaste [27] :

Ils permettront par exemple d'aborder des problèmes pour lesquels:

- il n'existe pas de solution algorithmique connue, possible ou souhaitable,
- les connaissances mises en œuvre sont de nature intuitive,
- les connaissances mises en œuvre sont de nature qualitative plutôt que quantitative,
- les connaissances mises en œuvre sont en évolution rapide et constante,
- la résolution implique des coûts élevés,
- la résolution se fait dans des conditions difficiles, voire stressantes,
- les données sont imprécises, voire incomplètes, ...

II.4.2 Composantes du système expert

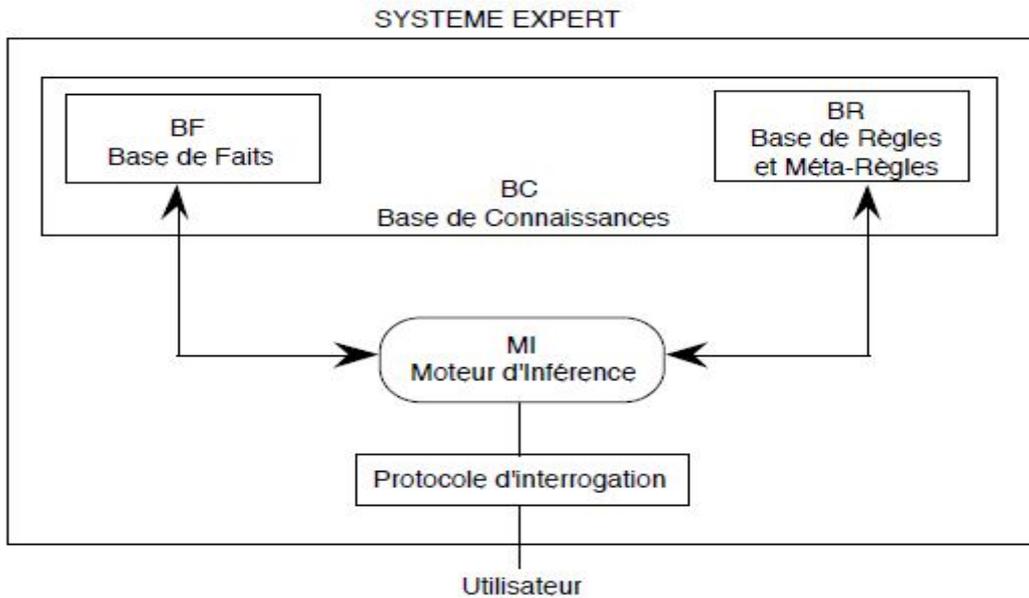


Figure II.2 : Composantes du système expert.

II.5 RESEAU DE NEURONES ARTIFICIELS

Est une technique utilisée en intelligence artificielle, les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau [26,28].

II.5.1 Composant du neurone artificiel

La figure II.3 montre la structure d'un neurone artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associé un poids w abréviation de weight (poids en anglais) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones aval. A chaque connexion est associé un poids [29].

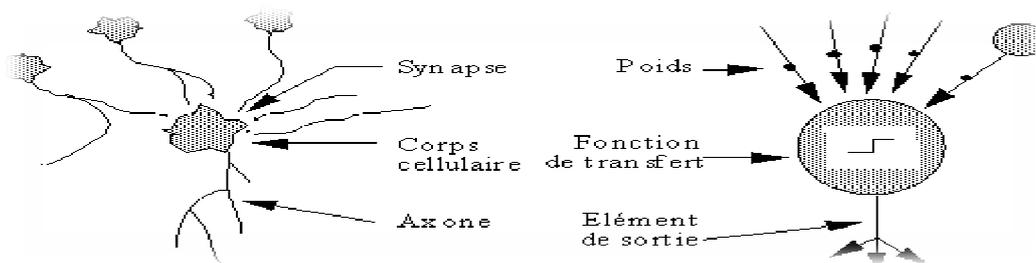


Figure II.3: Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel.

La figure II.3 donne les notations que nous utiliserons.

II.5.2 Comportement

Par analogie avec le neurone biologique, le comportement du neurone artificiel se compose de deux phases (figure II.4) :

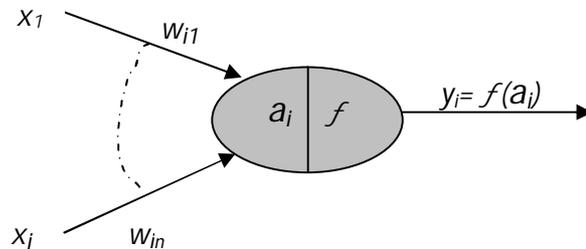


Figure II.4: Neurone formel.

Première phase :

La première phase, appelée activation, représente le calcul de la somme pondérée des entrées selon l'expression suivante :

$$a_i = \sum_{j=1}^n w_{in} x_j$$

Avec : a_i : est une sortie, w_{in} : appelés poids synaptiques, f : est une fonction d'activation, x_j : sont des entrées.

Deuxième phase :

A partir de cette valeur, une fonction de transfert calcule la valeur de l'état du neurone. Cette valeur qui sera transmise aux neurones aval. Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction de transfert. Les plus courantes sont présentées sur la figure II.5, on remarquera qu'à la différence des neurones biologiques dont l'état est binaire, la plupart des fonctions de transfert sont continus, offrant une infinité de valeurs possibles comprisent dans l'intervalle [0, +1] (ou [1, +1]) [30].

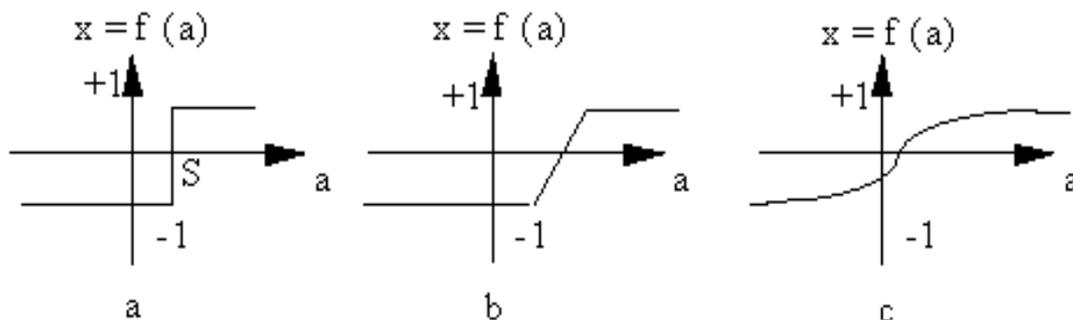


Figure II.5 : Différents types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel,

a : fonction à seuil (S, la valeur du seuil), b : linéaire par morceaux, c : sigmoïde.

II.5.3 Utilité

Les réseaux de neurones, en tant que systèmes capables d'apprendre, mettent en œuvre le principe de l'induction, c'est-à-dire l'apprentissage par l'expérience. Par confrontation avec des situations ponctuelles, ils infèrent un système de décision intégré dont le caractère générique est fonction du nombre de cas d'apprentissages rencontrés et de leur complexité par rapport à la complexité du problème à résoudre.

Grâce à leur capacité de classification et de généralisation, les réseaux de neurones sont généralement utilisés dans des problèmes de nature statistique, tels que la classification et la régression des données expérimentales.

II.6 LOGIQUE FLOUE (FUZZY LOGIC)

La logique floue (Fuzzy logic, en anglais) est une technique utilisée en intelligence artificielle. La technique a été formulée par L.Zadeh dans le milieu des années 60. Elle sert à pouvoir programmer un ordinateur pour qu'il contrôle une machine un peu comme le ferait un être humain.

A première vue, la logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain. Utilisée à côté d'autres techniques de contrôle avancé, elle fait une entrée discrète mais appréciée dans les automatismes de contrôle industriel [31].

II.6.1 Présentation et définitions

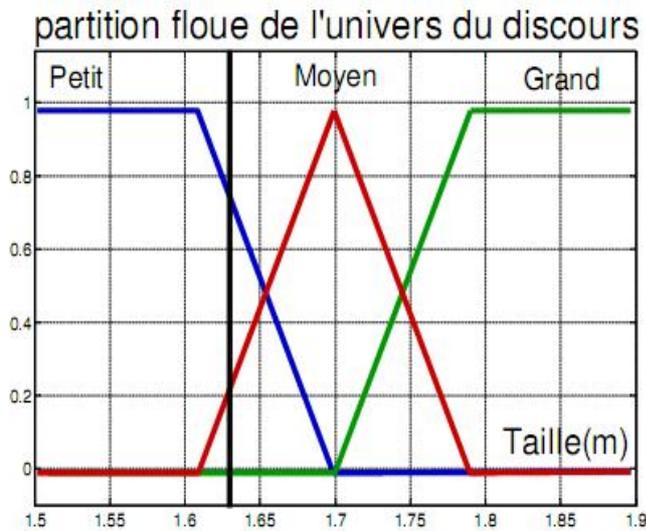
II.6.1.1 Incertitude et imprécision

La vie courante est parsemée de concepts qui ne peuvent pas être décrits par des notions mathématiques simples. Chacun de nous manipule ainsi des notions qui sont soit imprécises (assez tôt, important, environ, ...) soit incertaines (il est possible que ...).

Les catégories manipulées par le langage sont rarement tout ou rien leur présentation par des ensembles classiques est souvent mal adaptée [32].

Idée de Zadeh : remplacer l'appartenance $[0,1]$ à un sous-ensemble classique par un degré d'appartenance pouvant prendre toutes les valeurs comprises entre 0 et 1.

Exemple :



Ici, Ahmed mesure 1m 625 se traduit en logique floue par :

‘Ahmed est petit’ à un degré de 75%

‘Ahmed est moyen’ à 25%

‘Ahmed st grand’ à 0%

Figure II.6 : Représentation de la taille dans la logique floue.

II.6.1.2 Définition

Un sous-ensemble floue F est défini sur un ensemble de valeur, le référentiel U est caractérisé par une fonction d'appartenance μ de U dans l'intervalle réel $[0,1]$ tel que :

$$\mu : x \in U \rightarrow \mu(x) \in [0,1]$$

Qui quantifie le degré d'appartenance de chaque élément de U à F [33].

Un ensemble flou est constitué de trois parties :

1. Un axe horizontal représenté les éléments de l'ensemble.
2. Un axe vertical auquel sont représentées les valeurs d'appartenance.
3. Une courbe reliant les différents points de coordonnées (élément, valeur d'appartenance).

Les sous-ensembles flous permettent de graduer l'appartenance d'un élément à une classe.

II.6.2 Variable floue ou linguistique

La logique floue permet de tenir compte de la nature imprécise, grâce à des termes flous ou linguistiques comme par exemple les termes (petit, moyen, grand). Chaque terme représente un sous-ensemble de valeurs numériques et caractérise ainsi la variable floue. Le domaine sur lequel ces termes et ces variables sont définis constitue l'univers de discours, dans l'exemple présenté dans figure II.7 Température (petite, moyenne, grande) est une variable linguistique [32].

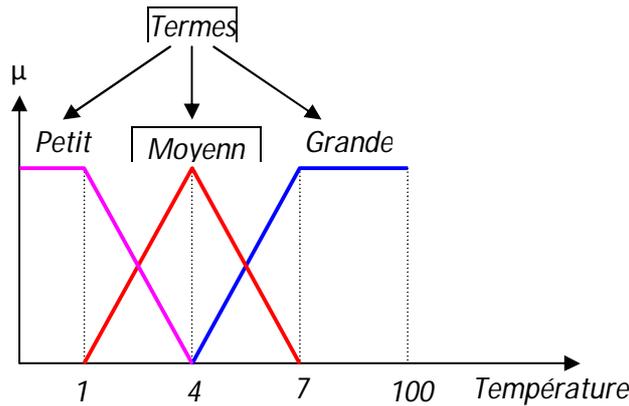


Figure II.7 : Partition floue de l'univers de discours de la variable linguistique.

II.6.2.1 Fonctions d'appartenance

On définit une fonction d'appartenance à un ensemble flou A comme une application qui accorde à tout élément x de l'univers $U (A \subseteq U)$ un degré d'appartenance entre 0 et 1 pour lequel x appartient à cet ensemble. Cette application généralise le concept d'appartenance classique et est notée par : $\mu_A(x)$ [34].

Ces fonctions d'appartenance peuvent avoir plusieurs formes ou types (figure II.8), les formes supportées en général sont : la forme triangulaire, trapézoïdale, gaussienne ou sigmoïde. En plus ces fonctions ont d'autres points similaires telles que :

- **La hauteur :** $H(F) = \max(\mu_F(x))$ généralement, elle est égale à 1.
- **Le noyau :** $N(F) = \{x \in X / \mu_F(x) = 1\}$.
- **Le support :** $S(F) = \{x \in X / \mu_F(x) > 0\}$.

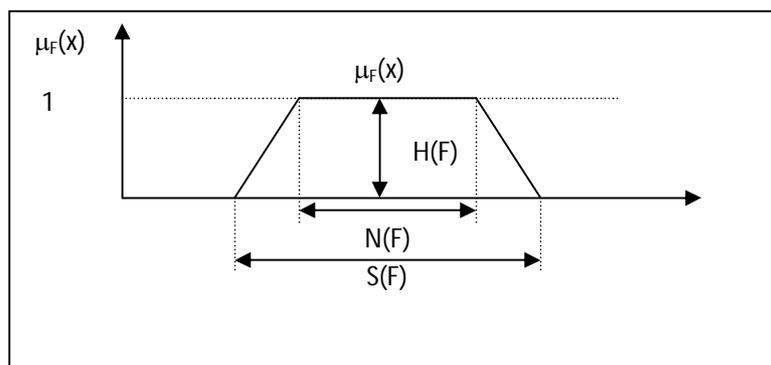


Figure II.8 : Caractéristiques d'un sous-ensemble flou.

La théorie des ensembles flous ne fournit pas assez d'outils d'aide pour la détermination et la forme de la fonction d'appartenance appropriée.

Exemple :

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme.

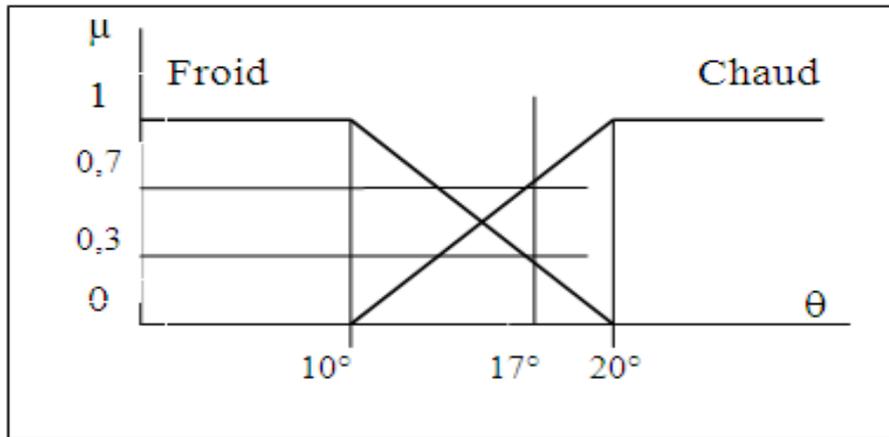


Figure II.9 : Partition floue.

D'après ce graphique, on peut constater que pour une valeur $\theta = 17^\circ$, le facteur d'appartenance à l'ensemble « froid » vaut $\mu_{\text{froid}} = 0,3$ et le facteur d'appartenance à l'ensemble « chaud » vaut $\mu_{\text{chaud}} = 0,7$.

Les formes les plus connues et les plus utilisées de ces fonctions sont : triangulaires, trapézoïdales et gaussiennes (figure II.10).

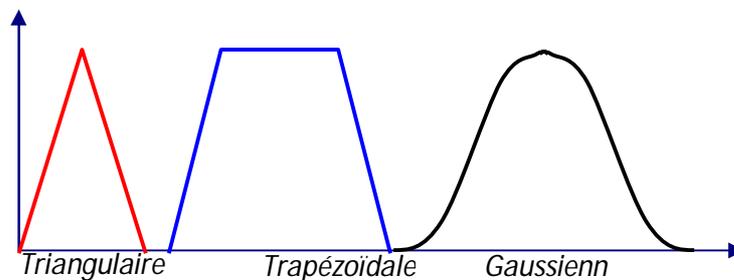


Figure II.10 : Formes de quelques fonctions d'appartenance.

La théorie mathématique sur les sous-ensembles flous définit de nombreuses opérations sur ces sous-ensembles et sur les fonctions d'appartenance qui rendent ces notions utilisables. Les opérations possibles sur les sous-ensembles flous sont les mêmes que dans le cas de la théorie ensembliste classique.

II.6.2.2 Opérateurs flous

Afin de pouvoir manipuler aisément les ensembles flous, nous redéfinissons les opérateurs de la théorie des ensembles classiques afin de les adapter aux fonctions d'appartenance propres à la logique floue permettant des valeurs strictement entre 0 et 1.

Contrairement aux définitions des propriétés des ensembles classiques qui sont toujours les mêmes, la définition des opérateurs sur les ensembles flous est choisie, à l'instar des fonctions d'appartenance. Voici les deux ensembles d'opérateurs pour le complément (NON), l'intersection (ET) et l'union (OU) utilisés le plus couramment [35]:

Dénomination	Intersection ET : $\mu_{A \cap B}(x)$	Réunion OU : $\mu_{A \cup B}(x)$	Complément NON : $\mu_{\bar{A}}(x)$
Opérateurs de Zadeh MIN/MAX	$\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$1 - \mu_A(x)$
Probabiliste PROD/PROBOR	$\mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$(\mu_A(x), \mu_B(x))$ - $\mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$1 - \mu_A(x)$

Avec les définitions usuelles des opérateurs flous, nous retrouvons toujours les propriétés de commutativité, distributivité et associativité des opérateurs classiques. Cependant, nous relevons deux exceptions notables.

II.6.3 Raisonnement en logique floue

Une implication floue est une relation R entre les deux ensembles X et Y quantifiant le degré de vérité de la proposition : Si (x est A) alors (y est B) Ou A et B sont des sous-ensembles flous de X et Y respectivement.

A l'instar des autres opérateurs flous, il n'existe pas de définition unique de l'application floue: le concepteur du système ou devra choisir parmi le large choix d'implication floue déjà définies, ou bien la définir à la main [35].

En logique floue on peut définir plusieurs implications :

- **reichenbach** : $\mu_{RR}(x, y) = 1 - \mu_A(x)[1 + \mu_B(y)]$
- **willmott** : $\mu_{RW}(x, y) = \max[1 + \mu_A(x), \min(\mu_A(x), \mu_B(y))]$
- **rescher-gaines** : $\mu_{RW}(x, y) = \{1 \text{ si } \mu_A(x) \leq \mu_B(x), \text{ et } 0 \text{ sinon}\}$
- **kleene-dienes** : $\mu_{RKD}(x, y) = \max(1 - \mu_A(x), \mu_B(y))$

- **Lukasiewicz** : $\mu(x, y) = \min(1 - \mu_A(x) + \mu_B(y), 1)$
- **mamdani** : $\mu_{RM}(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$
- **larsen** : $\mu_{RL}(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$

Le résultat de l'application d'une règle floue dépend donc de deux facteurs :

- La définition d'implication floue choisie.
- La définition de la fonction d'appartenance de l'ensemble flou de la proposition située en conclusion de la règle floue.
- Le degré de validité des propositions situées en prémisse.

Comme nous avons défini les opérateurs flous ET, OU et NON, la prémisse d'une règle floue peut très bien être formée d'une conjonction (ET) ou disjonction (OU) de propositions floues.

II.6.4 Systèmes d'inférence flous

La configuration de base d'un système d'inférence flou se compose de cinq blocks fonctionnels.

L'Inférence constitue le mécanisme d'élaboration de décision, elle donne la conclusion finale de toutes les règles activées en parallèle pour des entrées données. Pour un vecteur d'entrée $x = (x_1, \dots, x_n)^t$.

L'inférence floue passe par les étapes suivantes :

1. Calcul des degrés d'appartenance de chaque entrée aux différents sous ensembles flous :

$$\mu_{A_j}(x_j) \text{ pour } j=1 \text{ à } i=1 \text{ à } N$$

2. Calcul de la valeur de vérité de chaque règle, pour $i=1$ à N :

$$\alpha_i(x) = \min_j (\mu_{A_j}(x_j)) \text{ pour } j=1 \text{ à } n$$

3. Calcul de la contribution de chaque règle :

$$\mu(y) = \min (\alpha_i(x), \mu_B^i(y))$$

4. Agrégation des règles :

$$\mu(y) = \max_i (\mu_B^i(y))$$

Comme le résultat obtenu est un ensemble, il n'est exploitable par le processus que s'il est donné sous forme crisper (numérique) pour qu'il puisse être utilisé. On doit donc « défuzzifier » la commande. Plusieurs méthodes sont proposées telles que la méthode de la moyenne des maximums ou du centre de gravité que nous allons utiliser tout au long de notre travail [36].

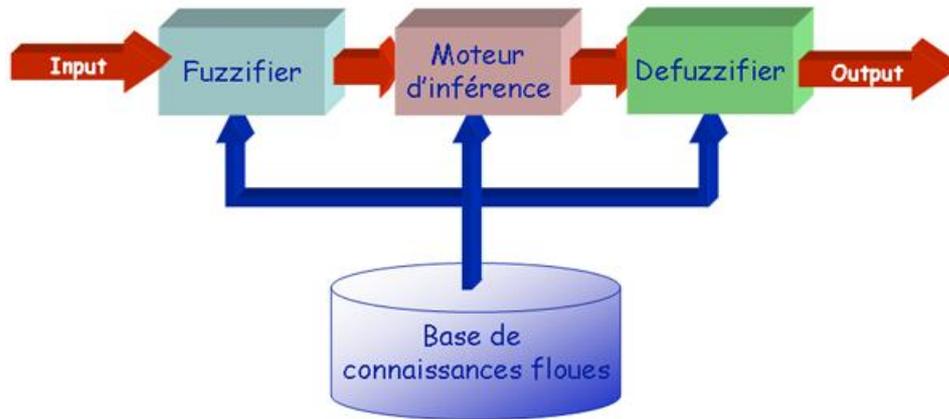


Figure II.11 : Système d'inférence floue.

II.6.4.1 Fuzzification

L'interface de fuzzification permet de convertir les valeurs numériques des variables d'entrées en variables floues des fonctions d'appartenance de forme triangulaire, trapézoïdale, gaussienne ou sigmoïdale.

Les opérateurs utilisés dans le système flou agissent sur des sous-ensembles flous. Par conséquent, il est nécessaire de transformer les variables non floues provenant du mode extérieur en des sous-ensembles flous. Pour se faire, on utilise un opérateur dit de fuzzification qui associe à une mesure de la variable x_0 une fonction d'appartenance particulière $\mu_{x_0}(x)$.

Le choix de l'opérateur de fuzzification dépend de la confiance que l'on accorde aux mesures effectuées. Ainsi si la mesure x_0 est exacte, les sous ensemble floue X_0 doit être représenté par un fait précis.

Par conséquent, on utilise comme opérateur de fuzzification la transformation dite de singleton. La fonction d'appartenance du sous-ensemble flous X_0 est alors définie par:

$$\mu_{x_0} : U \rightarrow U, \mu_{x_0}(x) = 1 \text{ si } x = x_0; \mu_{x_0}(x) = 0 \text{ si } x \neq x_0$$

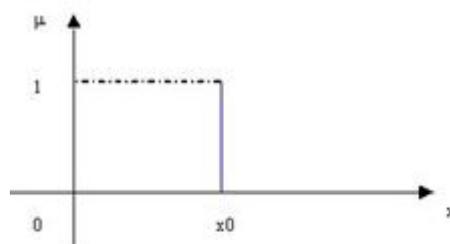


Figure II.12 : Méthode de fuzzification pour une mesure exacte.

Ainsi, le sous ensemble flous X_0 réalisé par cette méthode de fuzzification ne comprend que l'élément x_0 .

Par contre, si la mesure de la variable est incertaine, par exemple à cause de bruit, les sous ensemble flous X_0 doit être représentée par un fait imprécis. On utilise alors une méthode de fuzzification qui associe à la variable mesurée x_0 une fonction d'appartenance telle que, par exemple:

$$\mu_{x_0}(x) = \max \left\{ 0 ; 1 - \frac{|x - x_0|}{\varepsilon} \right\}$$

La représentation graphique de cette fonction est représentée par la figure II.12 Ce sous-ensemble flou comprend donc la mesure x_0 avec une appartenance unité et les valeurs voisines de x_0 avec une appartenance inversement proportionnelle à l'écart avec x_0 .

La base du triangle (ε) est fonction de l'importance relative des erreurs de mesures. En effet, plus elles sont importantes, plus la mesure de la variable x_0 devient imprécise, et donc, plus le triangle doit s'élargir.

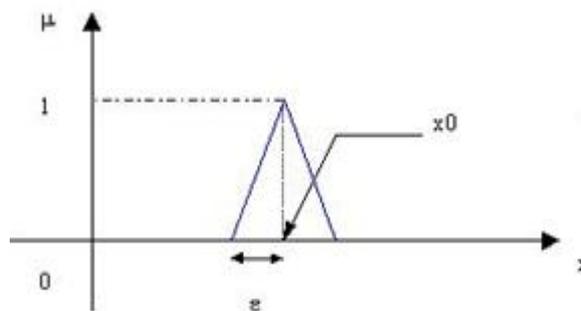


Figure II.13 : Méthode de fuzzification pour une mesure incertaine.

II.6.4.2 Base de données

La base de données contient les définitions des fonctions d'appartenance pour chaque variable de commande.

II.6.4.3 Base de règles floues

Une base de règles est un ensemble de règles conditionnelles floues de type « Si <condition> Alors <conclusion> », composées de deux parties : prémisse et conclusion. Elles peuvent être classées en trois types selon leur partie conclusion:

➤ Type 1 : (conclusion est constante)

$$R_i: \text{Si } X_1 \text{ est } A_1 \text{ ET } X_2 \text{ est } A_2 \dots \text{ET } X_n \text{ est } A_n \text{ Alors } Y \text{ est } W_i$$

➤ Type 2 : (conclusion est une fonction linéaire de premier ordre)

$$R_i: \text{Si } X_1 \text{ est } A_1 \text{ ET } X_2 \text{ est } A_2 \dots \text{ET } X_n \text{ est } A_n \text{ Alors } Y \text{ est } g(X_1, \dots, X_n)$$

➤ Type 3 : (conclusion est un ensemble flou)

$$R_i: \text{Si } X_1 \text{ est } A_1 \text{ ET } X_2 \text{ est } A_2 \dots \text{ET } X_n \text{ est } A_n \text{ Alors } Y \text{ est } B_k$$

Où X_n et Y_n sont respectivement les variables d'entrée et de sortie, A_n et B_k sont des sous-ensembles flous et W_i une constante.

II.6.4.4 Mécanisme d'inférence flou (unité de décision)

Le mécanisme d'inférence consiste à déterminer les règles floues activées (les règles dont le degré d'activation des prémisses est non nul) au niveau de chacune de ces règles ce degré va permettre de déterminer une valeur floue pour la variable de sortie apparaissant dans la partie conclusion. Il existe plusieurs méthodes d'inférence floue qui dépendent des applications et de la forme des fonctions d'appartenance le max-min c'est le plus utilisé [36] :

➤ **Méthode d'inférence max-min**

Devise en deux étapes : pour la première étape évaluer chacune des règles activées, en calculant la valeur de vérité prémisses les opérateurs ET et ALORS réalisés par la fonction min dans la deuxième étape sachant que pour un état donné plusieurs règles peuvent être validées ce qui implique des valeurs de μ différentes, il faut donc disposer d'une méthode de composition de ces règles cette méthode est appelée agrégation d'inférence par la méthode max-min prend le maximum de ces valeurs comme la fonction d'appartenance :

$$\mu_{res} = \max[\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n]$$

➤ **Méthode d'inférence max-prod**

Au niveau de la condition :

ET est représenté par la fonction min

OU est représenté par la fonction max

Au niveau de la conclusion :

OU est représenté par la fonction max et

ALORS est représenté par la fonction prod

➤ Méthode d'inférence somme-prod

Au niveau de la prémisse :

ET est représenté par la fonction prod

OU est représenté par la fonction somme

Au niveau de la conclusion ou est représenté par la fonction somme :

ALORS est représenté par, la fonction prod

II.6.4.5 Défuzzification

La défuzzification réalise la fonction inverse de la fuzzification ; il s'agit de convertir la grandeur floue inférée en une grandeur numérique. Cette opération se fait par plusieurs méthodes :

- Centre de gravité de la surface.
- Moyenne des maximaux.
- Plus petit des maximaux en valeur absolue.
- Plus grand des maximaux en valeur absolue.

L'agrégation des sous-ensembles de sortie vue précédemment conduit à un sous-ensemble unique U de sortie que l'on va utiliser pour obtenir une valeur numérique unique u_0 en sortie. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette opération, mais pas de procédure permettant de conclure sur le choix de la meilleure méthode. Les méthodes les plus couramment utilisées sont la méthode du centre de gravité ou celle de la moyenne des abscisses des maximums.

➤ Centre de gravité

Méthode de centre de gravité que nous allons utiliser tout au long de notre travail. Elle s'exprime par :

$$U = \frac{\sum_i^1 u_R(u_i) \cdot u_i}{\sum u_i}$$

➤ Moyenne des abscisses des maximums

U est la valeur moyenne des maximums des sous-ensembles flous qui composent U .

$$U = \frac{\sum u_i}{N}$$

II.7 Synthèse du flou et du neuronal

De par les caractéristiques et les qualités de chacune des deux théories, le flou d'une part et le neurone d'autre part, des recherches ont vu le jour dans le cadre de ces deux volets ouvrant ainsi de

grandes perspectives. Ce qui a poussé les chercheurs à faire une sorte de synthèse ou de combinaison des deux théories en exploitant les points forts de chacune d'elles, l'une par les caractéristiques et le mode de perception et d'utilisation des données floues et imprécises qu'elle traite et d'autre par sa notion d'apprentissage et de généralisation. En fusionnant ces deux approches, on peut, dans un premier temps, introduire des techniques de type neuronal, comme la notion d'apprentissage supervisé et dans un deuxième temps réaliser une fusion complète, par la transformation d'un système de règles floues en un véritable réseau neuronal [36].

II.8 CONCLUSION

La logique floue prend en considération des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou des expressions du langage naturel. Elle est donc un outil pour la manipulation et la représentation des connaissances imparfaitement décrites, ses objets sont modélisés par des ensembles flous support de base des notions vagues. La logique floue s'avère très simple à mettre en œuvre par rapport aux techniques de contrôle traditionnelles basées sur des modèles mathématiques. Cependant, les applications utilisant la logique floue ne sont pas fondamentalement plus performantes, elles sont tout simplement plus faciles à réaliser et à utiliser. C'est ainsi que des systèmes complexes peuvent devenir plus conviviaux et compréhensibles pour les personnes non expertes grâce à l'utilisation de la logique floue.

La logique floue reste, même si elle est déjà beaucoup utilisée, une technique nouvelle dont certains aspects sont encore inexploités. Elle est le sujet de nombreuses recherches et pourrait dans un futur proche devenir une technique incontournable pour l'amélioration de la communication Homme Machine.

Chapitre III

Modélisation mathématique

III.1 INTRODUCTION

La physique moderne présente le monde en termes d'équations mathématiques. Ces équations peuvent prendre différentes formes, qui déterminent la possibilité, l'efficacité et la profondeur des simulations que l'on peut effectuer.

Le recours à la simulation numérique permet d'explorer le comportement d'un modèle mais aussi d'obtenir des résultats qui seront comparés aux données expérimentales. Dans les deux cas le modèle peut être amélioré ou remis en question ; son domaine de validité peut être clairement perçu (D. Beaufiles) [28]. Les expériences simulées sont intéressantes à plusieurs titres. Il peut s'agir de redécouvrir, par une démarche inductive, le modèle sous-jacent, ou au contraire, le modèle étant connu de l'élève, l'appliquer à la résolution de problèmes liés au phénomène étudié (J.-Y. Dupont).

Donc, dans ce chapitre nous utilisons la deuxième loi de Fick pour modéliser la cinétique de la boruration des couches monophasées (Fe_2B) et on essaye de modéliser le processus de la boruration en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle à savoir la logique floue.

Dans cette partie la modélisation nécessite de comprendre le système binaire Fer-Bore.

III.2 ETAT STRUCTURAL DES ACIERS ET DE FER

Les aciers sont les métaux les plus répandus dans l'industrie et la construction mécanique d'une manière générale, on désigne ainsi les alliages Fer + Carbone [37].

L'acier, au sens strict, est une solution solide de carbone (moins de 2 %) dans le fer susceptible de durcir par trempe, Le terme « fer », que l'on emploie de nos jours, signifie en fait « acier » : il ne s'agit pratiquement jamais de « fer pur », il faut admettre que l'usage en a fait des synonymes alors qu'à l'origine, ces termes ne désignent pas le même produit. Pourtant, même les chimistes et les métallurgistes parlent souvent de « fer » quand il s'agit, en réalité, d'« acier ».

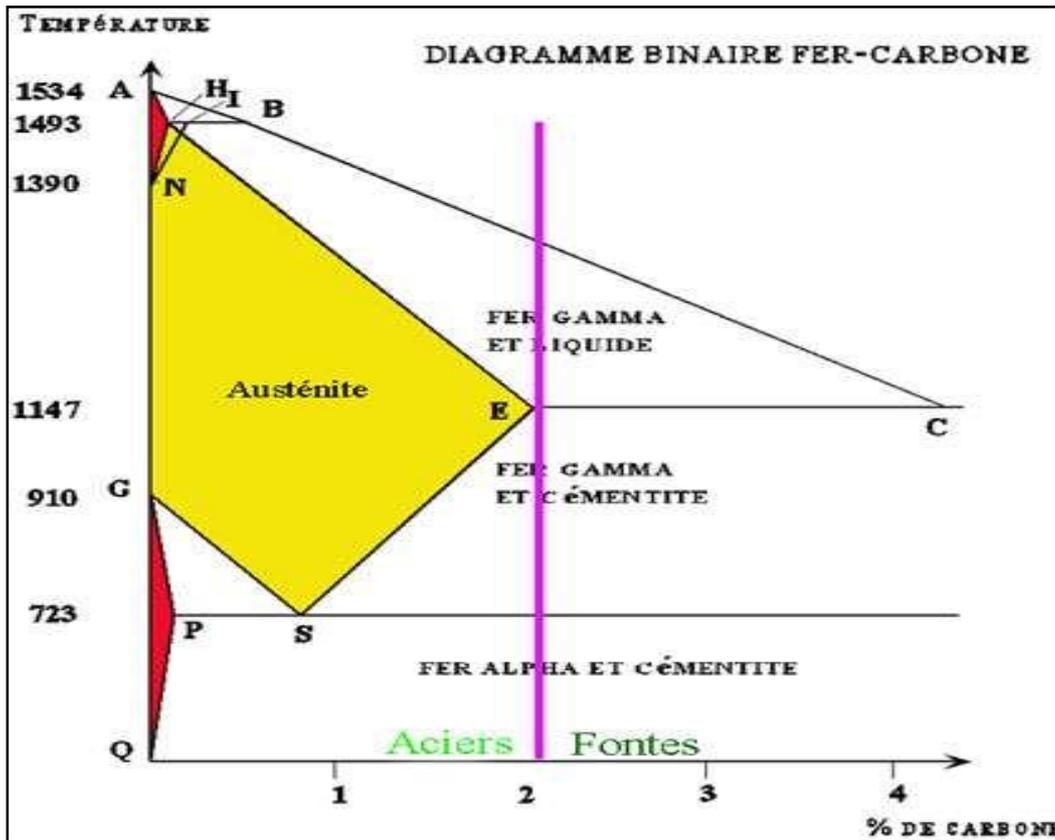


Figure III.1 : Diagramme binaire fer-carbone simplifié.

III.2.1 Concentration de carbone dans l'acier : Diagramme binaire fer-carbone

Le diagramme binaire très simplifié ci-dessus montre que si la concentration de carbone dépasse 2 %, il y a formation de l'eutectique qui contient 4,3 % de carbone, ce constituant (parfois nommé « lédéburite ») étant caractéristique des fontes. Le domaine des aciers est limité à moins de 2 %, moins encore si l'on considère un possible refroidissement rapide qui ramènerait le point E sur la gauche à 1,75 %. Il a aussi moins de 0,05 % de soufre et phosphore qui sont des impuretés indésirables [38,39].

III.2.2 Austénite, perlite, ferrite, cémentite et martensite

Il y a plusieurs solutions solides par insertion de carbone dans le fer (par opposition à solution par substitution) à savoir [39] :

- L'austénite : solution de carbone dans le fer γ (gamma). Cristallise dans le système cubique faces centrées CFC. La présence de nickel dans l'acier stabilise cette phase (donc augmente sa surface sur le diagramme) à tel point que si la teneur en nickel dépasse 18 %, on a de l'austénite jusqu'à température ambiante, si on refroidit de l'austénite à vitesse moyenne, on obtient de la troosite très dure avec des lamelles de ferrite et de la cémentite. Si on la refroidit plus vite, on a de la bainite en aiguilles et si on la refroidit très vite, on obtient de la martensite.

- La perlite : eutectoïde formé par le fer et le carbone à 723 degrés.
- La ferrite α et δ : solution de carbone dans le fer qui cristallise dans le système cubique centré. Ces deux ferrites cristallisent dans le système cubique centré CC. Le chrome dans l'acier stabilise la phase alpha.
- La cémentite, de formule Fe_3C , est formée de 12 atomes de fer pour 4 de carbone ; sa structure est orthorhombique et elle a la propriété de se décomposer avant de fondre, ce qui empêche de connaître toute la partie à droite du point C dans le diagramme binaire.
- La martensite : constituant dur des aciers qui cristallise en plaquettes ou en aiguilles et qui prend naissance par refroidissement brutal de l'austénite qui empêche une diffusion du carbone dans le fer ; la martensite est très dure mais très fragile.

III.3 DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER -BORE

La diffusion du bore dans le fer forme une solution solide, il se dissout dans les sites interstitiels de la phase γ et en substitution dans la phase α . Toutefois le bore est très peu soluble dans le fer comme indiqué dans le tableau III.1.

Température (°C)	710Fe(α)	906 Fe (α)	906 Fe (γ)	1149 Fe (γ)
Bore en solution pp m(par masse)	2	82	21	210

Tableau III.1 : La solubilité du bore dans le fer à différentes températures.

Pour mieux comprendre la formation des solutions solides du bore dans le fer, on doit se référer au diagramme d'équilibre binaire Fe-B qui est représenté dans chapitre I (figure I.3).

III.4 CINETIQUE DES COUCHES BORUREES

III.4.1 Modèle mathématique de la diffusion des couches monophasées

Dans notre travail l'évolution de la concentration de bore en γ -Fe suit de résoudre la version unidimensionnelle de la deuxième loi de Fick donnée par (III.1) :

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i(x,t)}{\partial x^2} \tag{III.1}$$

Les coefficients de diffusion D_i obéissent à une loi d'activation thermique de type Arrhenius de la forme suivante :

$$D_i = D_i^0 \exp\left(-\frac{Q_i}{RT}\right) \tag{III.2}$$

Avec :

Q_i : L'énergie d'activation pour la diffusion ($KJ. mol^{-1}$)

R : Constant de gaz idéal = $8.32 (J mol^{-1} K^{-1})$

T : La température(K)

La ou D_i est le coefficient de diffusion efficace pour la phase i , avec $i = (Fe_2B$ ou $\gamma -Fe)$,

Le facteur pré-exponentiel D_i^0 , dépend fortement de la température ; quasi-nul à la température ambiante, ce coefficient est de l'ordre de l'unité en micron carré par heure pour des températures de l'ordre de 1143K.

L'énergie d'activation Q_i , dépend de la nature de l'élément diffusant et de la nature du cristal dans lequel il diffuse ainsi que de son orientation cristallographique.

$C_i(x, t)$: La concentration du bore en profondeur x , après le temps t de diffusion. Le modèle est basé sur l'hypothèse que le traitement de boruration est un processus lié à l'équilibre thermodynamique du matériau.

La figure III.2 montre la variation de la concentration de bore en fonction de la profondeur pour les deux phases Fe_2B et $\gamma -Fe$, à une température fixée à une dimension.

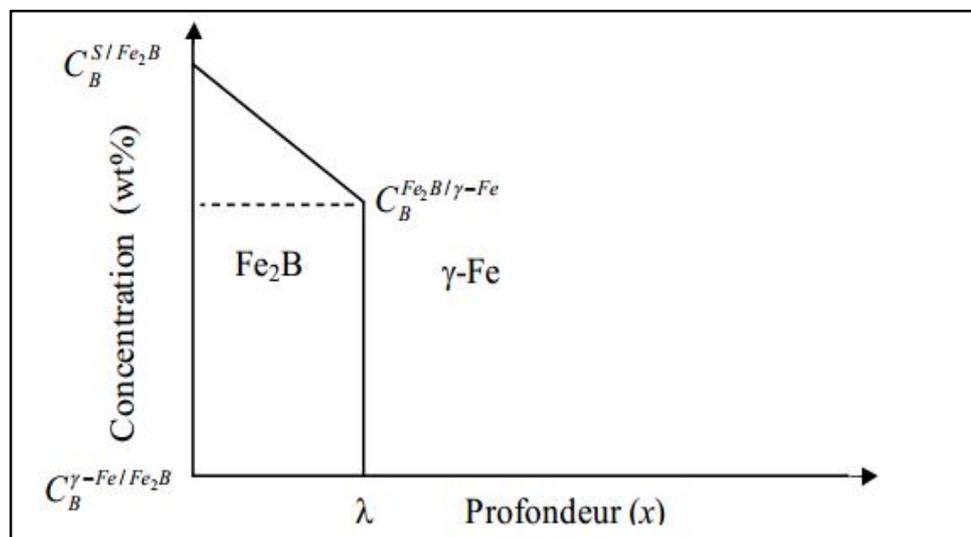


Figure III.2 : La concentration de bore en fonction de la profondeur (diffusion de bore).

Dans la figure III.2 on a : C_B^{S/Fe_2B} : Concentration de bore à l'interface surface/ Fe_2B .

$C_B^{Fe_2B/\gamma-Fe}$: Concentration de bore à l'interface Fe_2B /austénite.

$C_B^{\gamma-Fe/Fe_2B}$: Concentration de bore à l'interface austénite / Fe_2B .

Dans la figure III.2, la valeur λ présente l'épaisseur de la couche borurée Fe_2B .

La concentration de bore en phase Fe_2B variant entre $C_B^{Fe_2B/\gamma-Fe}$ et C_B^{S/Fe_2B} .

Pendant le processus de la boruration les atomes de bore se diffusent graduellement dans le substrat suivant le temps de traitement [13].

Une solution générale de (III.1) est donnée par (III.3), pour la phase i , tel que $i = (Fe_2B$ ou $\gamma-Fe)$, cette solution a été présentée par Kirkaldy [40]:

$$C_i(x,t) = A_i + B_i \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_i t}}\right) \quad (III.3)$$

Avec $i = (Fe_2B, \gamma - Fe)$

La où erf est la fonction d'erreur de Gauss, A_i et B_i sont des constantes à déterminer selon les conditions initiales et les conditions aux limites.

Dans ce modèle de diffusion on considère que :

- L'interface $(Fe_2B/\gamma - Fe)$ se développe parallèlement à la surface.
- L'équilibre thermodynamique local est atteint à l'interface $(Fe_2B/\gamma - Fe)$.
- La croissance de la couche borurée obéit à la loi parabolique, et la couche borurée est mince par rapport à l'épaisseur de l'échantillon.
- L'effet de porosité n'existe pas dans la surface du matériau.
- Le volume spécifique est le même pour toutes les phases $(Fe_2B/\gamma - Fe)$.
- Les coefficients de diffusion de bore dans les différentes phases ne changent pas avec le changement de la concentration de bore.

Pour déterminer les constantes A_i et B_i de l'équation (III.3), il faut respecter les conditions suivantes :

1- Initial :

$t=0, x > 0 \quad C(x, 0) = 0$ (t : temps, x : profondeur).

$x=0, t>0 \quad C(0, t) = C_B^{S/Fe_2B}$ (la concentration de bore en surface reste constante).

2- A l'interface $Fe_2B/\gamma-Fe$: $C_{Fe_2B}(\lambda, t) = C_B^{Fe_2B/\gamma-Fe}$

$$C_{\gamma-Fe}(\lambda, t) = C_B^{\gamma-Fe/Fe_2B}$$

3- $x = \infty$: $C(\infty, t)$ (la concentration de bore devient nul).

Vu les conditions ci-dessus (initial et au limite) on peut déterminée les constantes A_i et B_i avec $i = (Fe_2B/\gamma - Fe)$ Pour simplifie l'écriture on remplace $i = (Fe_2B, \gamma - Fe)$ par $i = (1, 2)$:

$$A_{(Fe_2B)} = C_B^{(S/Fe_2B)} \quad B_{Fe_2B} = \frac{C_B^{Fe_2B/\gamma-Fe} - C_B^{S/Fe_2B}}{\text{erf}\left(\frac{k/2}{\sqrt{D_\gamma - Fe}}\right)} \quad (III.4)$$

$$A_{(\gamma-Fe)} = \frac{C_B^{(\gamma-Fe/Fe_2B)}}{\text{erf}\left(\frac{k/2}{\sqrt{D_\gamma - Fe}}\right)} \quad B_{\gamma-Fe} = \frac{C_B^{(\gamma-Fe/Fe_2B)}}{\text{erf}\left(\frac{k/2}{\sqrt{D_\gamma - Fe}}\right)} \quad (III.5)$$

III.4.1.1 Concentration de bore dans chaque phase

A partir de l'équation (III.4) et (III.5), les concentrations de bore dans chaque phase est comme suit :

Pour la phase Fe_2B

$$C_{Fe_2B}(x, t) = C_B^{S/Fe_2B} + \frac{C_B^{Fe_2B/\gamma-Fe} - C_B^{S/Fe_2B}}{\text{erf}\left(\frac{k/2}{\sqrt{D_{Fe_2B}}}\right)} \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2D_i t}}\right) \quad (III.6)$$

Pour la phase $\gamma-Fe$

$$C_{\gamma-Fe} = + \frac{C_B^{\gamma-Fe/Fe_2B}}{\text{erf}\left(\frac{k/2}{\sqrt{D_{\gamma-Fe}}}\right)} \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2D_i t}}\right) \quad (III.7)$$

L'équation de bilan de matière donnée par la loi de Fick (III.8) [17], a été employée pour décrire le décalage de l'interface ($Fe_2B/\gamma-Fe$) par une distance (λ), du a la différence des flux entrants et sortants sur la couche concernée [19] :

$$w \frac{d\lambda}{dt} = (J_{Fe_2B} - J_{\gamma-Fe})_{x=\lambda} \quad (III.8)$$

Les flux des atomes en phase i est donnée par la formule (III.9) :

$$J_i = -D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad (III.9)$$

En utilisant la formule (III.9) on a :

$$\begin{aligned}
 J_1 &= -D_1 \left[\frac{C_B^{Fe_2B/\gamma-Fe} - C_B^{S/Fe_2B} \frac{C_B^{Fe_2B/\gamma-Fe} - C_B^{S/Fe_2B}}{\operatorname{erf}\left(\frac{\lambda}{\sqrt[2]{D_1 t}}\right)}}{\sqrt[2]{D_1 t}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{x^2}{4D_1 t}\right)} \right] \\
 J_2 &= -D_1 \left[\frac{C_B^{\gamma-Fe/Fe_2B}}{\operatorname{erf}\left(\frac{\lambda}{\sqrt[2]{D_1 t}}\right)} \right] \frac{1}{\sqrt[2]{D_1 t}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{x^2}{4D_1 t}\right)}
 \end{aligned} \tag{III.10}$$

On détermine suivant les équations la fonction qui permet de donner les constantes cinétiques pour les différentes températures(III.11) :

$$\left\{ \begin{aligned} w \frac{d\lambda}{dt} &= (J_{Fe_2B} - J_{\gamma-Fe})_{x=\lambda} \\ \lambda &= k\sqrt{t} \end{aligned} \right\} \tag{III.11}$$

$$\left\{ \begin{aligned} w &= \frac{1}{2} M_1 + M_2 \\ M_1 &= (C_B^{S/Fe_2B} - C_B^{Fe_2B/\gamma-Fe}) \\ M_2 &= (C_B^{Fe_2B/\gamma-Fe} - C_B^{\gamma-Fe/Fe_2B}) \end{aligned} \right.$$

Avec :

k : Constante cinétique.

J_i : Flux des atomes de bore en phase.

λ : Position de l'interface (l'épaisseur de la couche borurée Fe₂B)

t : temps du processus.

En simplifie (III.11) en trouve la fonction :

$$f(k) = M_0 k + \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) \left[\frac{P_1}{\operatorname{erf}\left(\frac{k}{\sqrt[2]{D_1}}\right)} e^{-\left(\frac{k^2}{4D_1}\right)} + \frac{P_2}{\operatorname{erf}\left(\frac{k}{\sqrt[2]{D_2}}\right)} e^{-\left(\frac{k^2}{4D_2}\right)} \right] \tag{III.12}$$

Tel que :

$$M_0 = w/2 ; \quad p_1 = D_1 M_1 \left(\frac{1}{2\sqrt{D_1}} \right); \quad p_2 = D_2 M_2 \left(\frac{1}{2\sqrt{D_1}} \right);$$

Cette fonction (III.12), permet de calculer les constantes cinétiques (k) et les épaisseurs de la couche borurée (λ).

III.4.2 Modèle de prédiction de la logique floue

III.4.2.1 Modèle logique floue

La logique floue est ‘un domaine de l’intelligence artificielle, elle se rapproche du raisonnement humain.

Contrairement à des calculs rigides, qui se basé sur des ensemble bien définis, elle utilise des ensemble flous ou imprécis. Elle s’appuie sur la théorie mathématique des ensembles floue qui est une extension de la théorie de l’ensemble [35].

Ce modèle est basé sur :

- La division en sous-ensembles flous différents (température, temps de traitement, épaisseur de la couche borurée) qui appartiennent au processus de traitement de boruration.
- Détermine la base des règles qui va caractériser le fonctionnement désiré du système.
- Transformer les variables réelles, c’est à dire celles qui ont une réalité physique, en variables floues, on appelle cette étape la fuzzification, permet de convertir les valeurs numériques des variables d’entrées en variables floues des fonctions d’appartenance.
- Utilisé ces variables floues dans un mécanisme d’inférence qui crée et détermine les variables floues de sortie en utilisant les opérations sur les fonctions d’appartenance.
- La défuzzification qui réalise la fonction inverse de la fuzzification ; il s’agit de convertir la grandeur floue inférée en une grandeur numérique. Cette opération ce fait par plusieurs méthodes (centre de gravité, moyenne des maximaux,...).

La configuration de base d'un système d'inférence flou se compose de cinq blocs fonctionnels

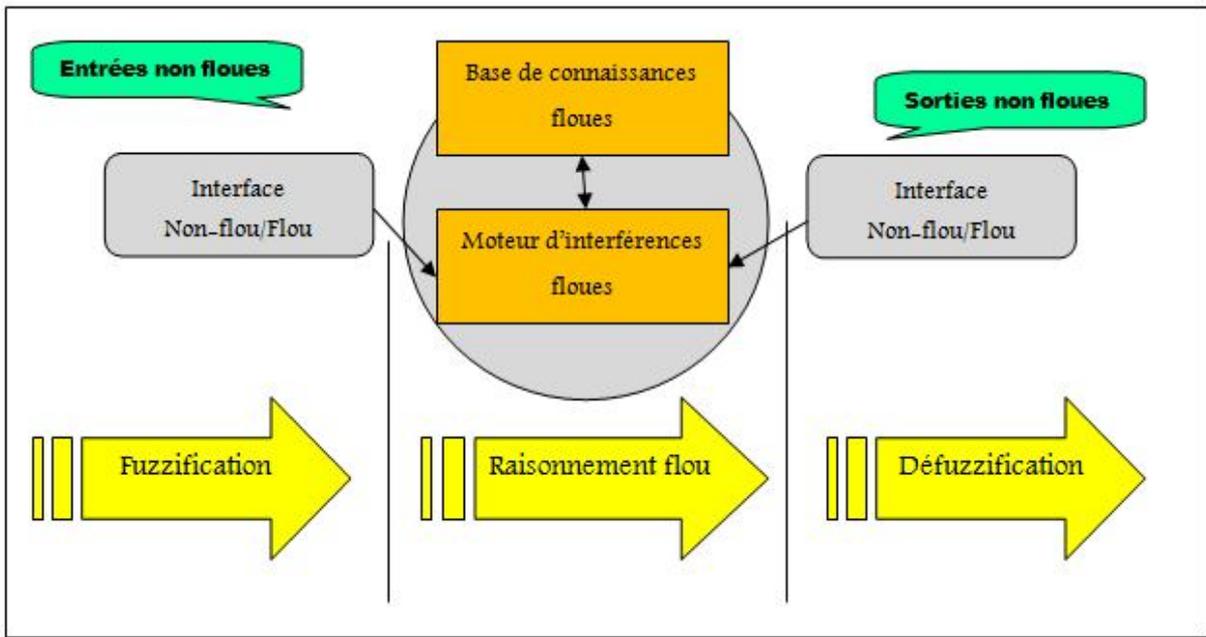


Figure III.3: Système d'inférence floue.

Les sous-ensembles floues proposés dans cette étude sont reportés sur la figure III.4.

L'entrée du système est basée sur deux sous-ensembles flous (temps et la température de boruration), et un ensemble flou pour les résultats de notre processus (l'épaisseur de la boruration).

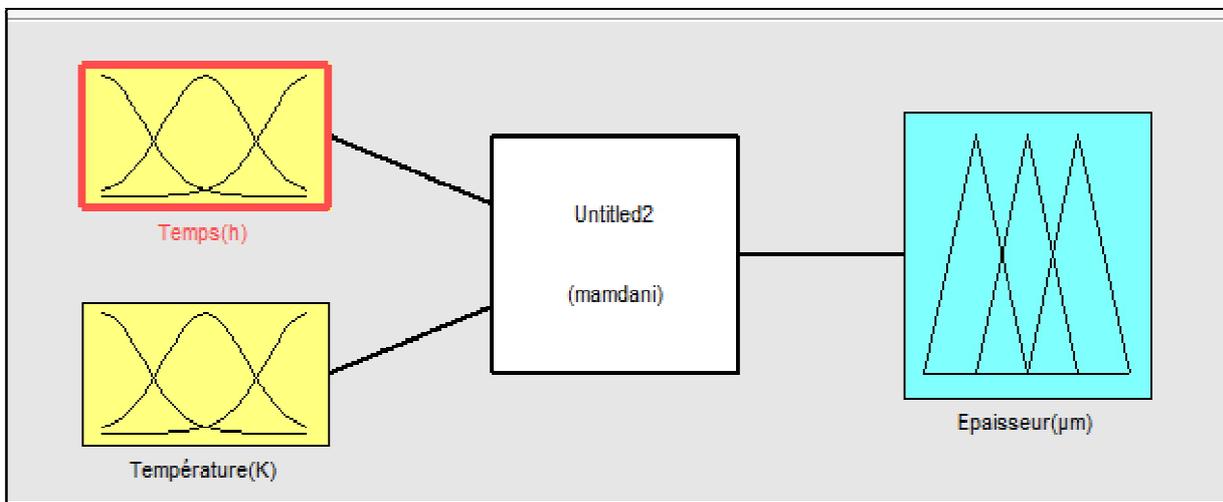


Figure III.4 : Le système de la logique floue utilisé pour la modélisation.

III.4.2.2 Ensembles flous

Les fonctions d'appartenance peuvent avoir diverses formes, dans cette étude on utilise des sous-ensembles flous triangulaires [36].

Le sous-ensemble flou qui représente le temps est schématisé sur la figure (III.5), le temps de boruration est entre 0h et 10h.

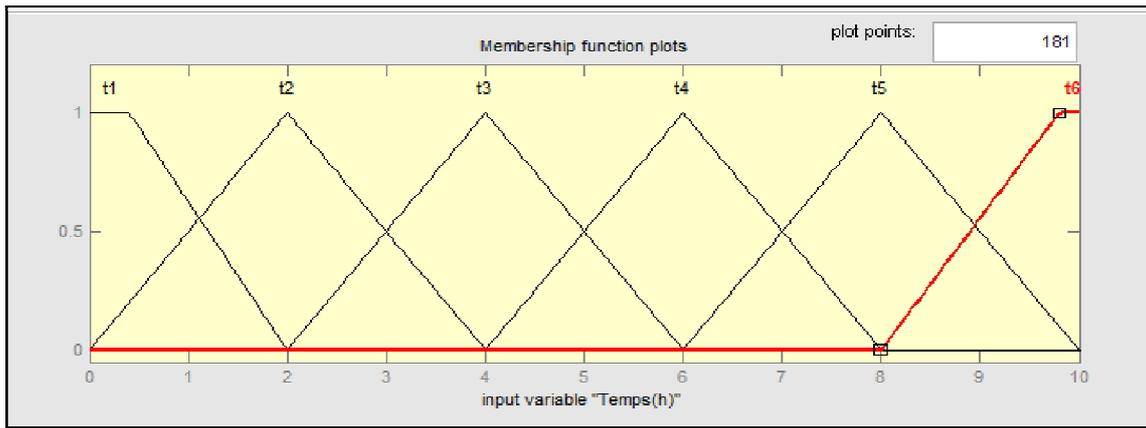


Figure III.5 : Ensemble flou temps.

La figure III.5, représente les intervalles de temps, chaque intervalle représente un ensemble flou nommé t_i ($i=1..6$).

Le sous-ensemble flou qui représente la température est schématisé sur la figure (III.6), la température de boruration est entre 1000K et 1250K.

Les températures sont partitionnées en des intervalles, chaque intervalle représente un ensemble flou nommé T_i ($i=1..11$).

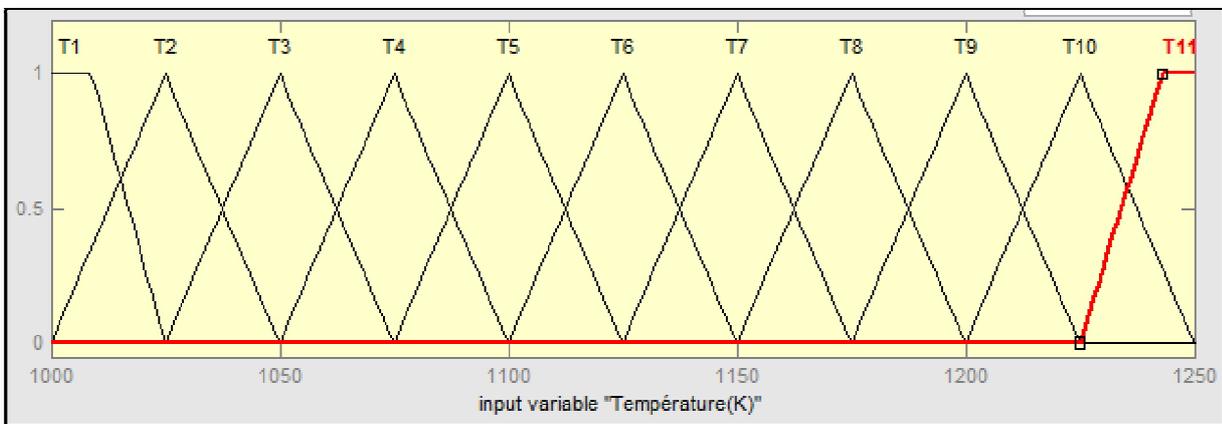


Figure III.6 : Ensemble flou température.

L'épaisseur de la couche borurée obtenue sera elle-aussi exprimée comme l'appartenance à des ensembles flous, sous la forme d'un réel positif.

Les sous-ensembles flous proposés pour calculer l'épaisseur de la couche borurée sont sous forme triangulaire, d'après les résultats expérimentaux l'épaisseur est généralement entre 0 et 250 μm .

Dans la figure III.7 l'épaisseur de la couche borurée est représentée par des sous-ensembles flous e_i ($i=1..21$).

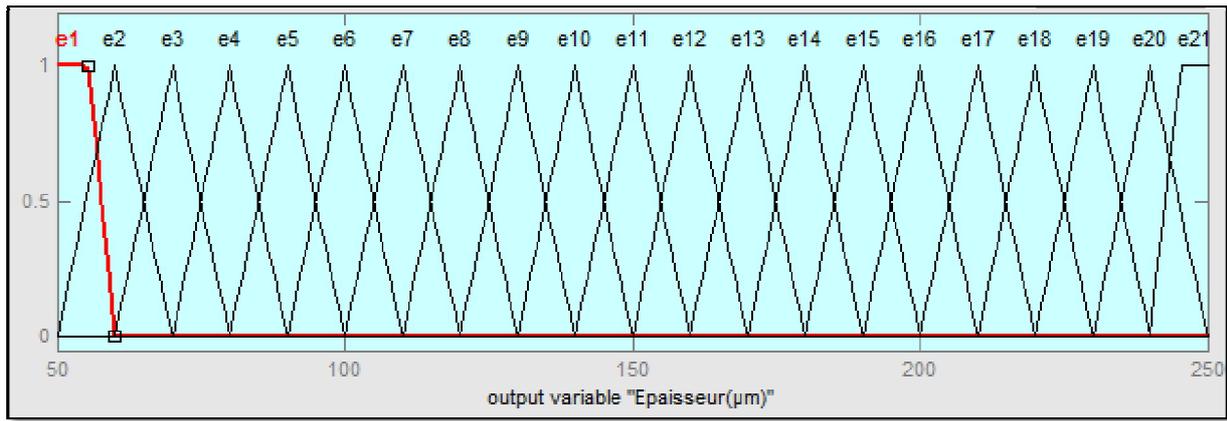


Figure III.7 : Ensemble flou épaisseur de la couche borurée.

Le problème est donc de calculer dans quelles propositions les valeurs de vérité floue des deux paramètres d’entrée vont contraindre la valeur du paramètre de sortie.

Ces influences sont exprimées par des règles symboliques qui décrivent la relation désirée entre les paramètres d’entrées et celui de sortie : pour une température de boruration donnée l’épaisseur de la couche borurée doit être proportionnelle au temps de boruration.

En l’absence de théorie de telle règle peuvent être établies initiativement par exemple :

Si la température est moyenne et le temps est moyen **Alors** l’épaisseur est moyenne.

On pourra ensuite raffiner les règles empiriquement pour les adapter aux conditions physique du système sous contrôlé.

Dans cette étude chaque paramètre a sa propre échelle de valeurs, avec des classes de valeurs symbolisées de manière intuitive et ses propres fonctions d’appartenance. Ceci facilite les réglages indépendants de chaque paramètre et de chaque classe au cours de la mise au point du modèle.

Les règles linguistiques qui relier l’entre avec la sortie de notre modèle est représenté sur le tableau 01 :

Les règles	Temps	Température	Epaisseur
1	t3	T2, T5, T1	e8, e15, e17
2	t4	T2, T5, T9, T5, T9	e10, e16, e22, e17, e20
3	t5	T2, T5, T9, T1, T5, T5, T5	e15, e17, e23, e12, e18, e20, e19

Tableau III.2 : Les règles linguistiques qui relier l’entre avec la sortie.

III.5 CONCLUSION

Ces deux modèles de diffusion proposés dans ce travail sont simples. On peut les considérer comme un outil conventionnel approprié pour la simulation de la cinétique de boruration pour une seule phase Fe_2B (monocouche) et pour deux phases $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$.

En utilisant l'approche de la logique floue, la cinétique de croissance des couches Fe_2B générées sur la surface de l'acier C15 par le procédé de boruration thermo-chimique.

Avec cette approche, il est possible déterminer l'influence des paramètres participant au processus tel que la température, le temps de traitement et la concentration de bore sur l'épaisseur de la couche borure, et la cinétique de la boruration.

La connaissance de ces paramètres permet de bien contrôler le processus.

Chapitre IV

Résultat et Discussions

IV.1 INTRODUCTION

Durant les trois dernières décennies, des progrès remarquables ont eu lieu dans la vitesse de traitement des ordinateurs, leur capacité de stockage, de manipulation et de présentation de grandes quantités de données et d'informations, ainsi que dans la capacité des ordinateurs à communiquer avec d'autres ordinateurs sur les réseaux.

La preuve de ces progrès peut être trouvée dans les bureaux actuels d'ingénierie où les puissances des ordinateurs utilisés sont de plus en plus importantes [41].

Le nombre de codes de calcul utilisés par les ingénieurs est en constante augmentation. Cette tendance est due en partie à la série croissante des tâches pour lesquelles les ingénieurs utilisent maintenant des ordinateurs.

Étant donné que les langages informatiques sont généralement conçus pour résoudre un certain nombre de problèmes de génie, le choix du bon langage pour accomplir la tâche est d'une importance capitale.

IV.2 ENVIRONNEMENT DE CALCUL

Dans cette partie nous avons utilisé l'environnement de programmation Matlab, Matlab est un logiciel commercial de calcul interactif. Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou de systèmes linéaires, etc.

L'utilisation de MATLAB est avantageuse pour résoudre un problème qui peut être idéalement représenté par des matrices, en se servant des opérations de l'algèbre matricielle linéaire et de la représentation relativement simple des graphiques en deux et trois dimensions [42].

Dans ce chapitre nous utilisons le modèle développé dans le chapitre 3 pour simuler la cinétique de la boruration, pour le code de calcul nous avons utilisé l'environnement de programmation (Matlab 9).

Un programme informatique écrit en Matlab version 9 a été développé dans le but de faire une comparaison entre les valeurs expérimentales des constantes du taux de croissance et les valeurs simulées avec la technique de l'intelligence artificielle (la logique floue). Ce code de calcul utilise comme entrées : [la température, le temps de traitement, les concentrations limites inférieure et supérieure du bord, les coefficients de diffusion du bore dans Fe₂B].

Pour valider les résultats de la simulation on a utilisé des données expérimentales des couches monophasées, ce qui est valable pour notre travail concernant la cinétique de Fe₂B.

IV.3 VALIDATION EXPERIMENTALE DU MODELE

Pour vérifier la validité du modèle mathématique développé dans le chapitre 3, nous avons utilisé des données expérimentales réalisées par Andrijan et al [43].

IV.3.1 Acier utilisé

L'acier utilisé dans ce travail est un acier au carbone C15, sa composition chimique est tabulée comme il est illustré dans le tableau IV.1.

	C	Si	Mn	P	S	Cu
Composition Chimique (% poids)	0,17	0.24	0.38	0.023	0.005	0.04

Tableau IV.1 : Composition chimique de l'acier utilisé en % de masse.

IV.3.2 Procède expérimentale :

La boruration d'un acier au carbone C15 a été effectué dans des poudres, les échantillons sont placés dans des caisses en acier remplies de poudre de boruration (Carbure de bore B₄C) et introduites dans des fours à moufle.

Trois températures de boruration sont utilisées 870 °C, 920 °C et 970 °C avec des durées de Juste avant la boruration, les échantillons ont subi un polissage mécanique avec du papier au carbure de silicium pour éliminer toute contamination pouvant empêcher la diffusion de bore.

IV.3.3 Mesure de l'épaisseur

L'observation des échantillons au microscope optique et au microscope électronique à balayage nous révèle la présence d'une seule phase Fe₂B.

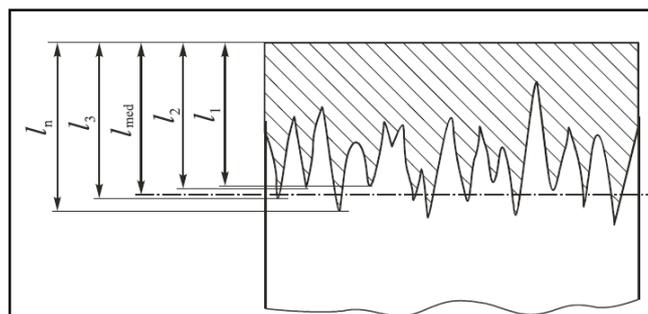


Figure IV.1 : Détermination de l'épaisseur de la couche de borure [43].

Quelques échantillons ont été sélectionnés pour des observations avec un microscope optique. La mesure par microscopie optique (observation en coupe) proposée par Kunst [20] dans laquelle à partir des deux pics les plus profonds et des deux pics les moins profonds, on prend la moyenne de ces quatre aiguilles (e) comme valeur de l'épaisseur de la couche borurée à cet endroit (figure IV.1).

L'épaisseur moyenne des couches de borure obtenues sur l'acier C15 était de 69,9 à 239,2 μm .

IV.4 RESULTATS ET DISCUSSION

IV.4.1 Modèle mathématique de la diffusion

Notre code de simulation basé sur le modèle de diffusion des couches monophasées développé au chapitre précédent, permet de calculer les constantes du taux de croissance pour différentes températures. Avec ces constantes, il est possible de déterminer l'épaisseur de la couche borurée. La comparaison des résultats expérimentaux et théoriques nous permet de confirmer la validité du modèle utilisé.

Les données de la diffusivité de bore et les différentes concentrations sont présentés dans le tableau IV.2. Ces données ont été employées dans notre code de simulation.

Les données de la cinétique et les énergies d'activation du bore pour la boruration de fer ont été prise de la référence [43], les coefficients de diffusion de bore dans la phase Fe_2B et $\gamma\text{-Fe}$.

Diffusivité de bore (m^2/s) :
Phase Fe_2B : $D_B^{(\text{Fe}_2\text{B})} = 3,17 \cdot 10^{-4} \exp\left(-\frac{194,80 \cdot 10^3}{RT}\right)$
Phase $\gamma\text{-Fe}$: $D_B^{(\gamma\text{-Fe})} = 4,4 \cdot 10^{-8} \exp\left(-\frac{81,5 \cdot 10^3}{RT}\right)$
Avec $R=8,32 \text{ j/k.mol}$
Concentration de bore (wt. %)
En surface $C_B^{(S/\text{Fe}_2\text{B})} = 15,00 \text{ wt}\%$
à l'interface ($\text{Fe}_2\text{B}/\gamma\text{-Fe}$) : $C_B^{(\text{Fe}_2\text{B}/\gamma\text{-Fe})} = 8,83 \text{ wt}\%$
à l'interface ($\gamma\text{-Fe}/\text{Fe}_2\text{B}$) : $C_B^{(\gamma\text{-Fe}/\text{Fe}_2\text{B})} = 35 \cdot 10^{-4} \text{ wt}\%$

Tableau IV.2 : Les données utilisées pour la simulation.

IV.4.1.1 Constantes du taux de croissance

Les valeurs des constantes du taux de croissance simulées ainsi que les valeurs expérimentales de Andrijana et al [43] sont donné dans le tableau IV.3.

Température(K)	Constante du taux de croissance ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1/2}$)	
	Expérimental [43]	Simulation
1143	0.621	0.613
1193	0.993	0.942
1243	1.427	1.438

Tableau IV.3 : Valeurs expérimentales et simulées de la constante k.

Ce tableau (tableau IV.3) montre une comparaison entre les données expérimentales de Andrijana et al [43] et celles obtenues par simulation (Pour une concentration de bore à la surface égale à 15.00 wt% (% en mass)). Les résultats sont en accord avec les données expérimentales.

Les constantes du taux de croissance simulées permettent de trouver l'épaisseur de la couche borurées Fe_2B et prédire les concentrations de bore pour chaque phase. D'après ces résultats on remarque que la constante du taux de croissance augmente avec l'augmentation de la température.

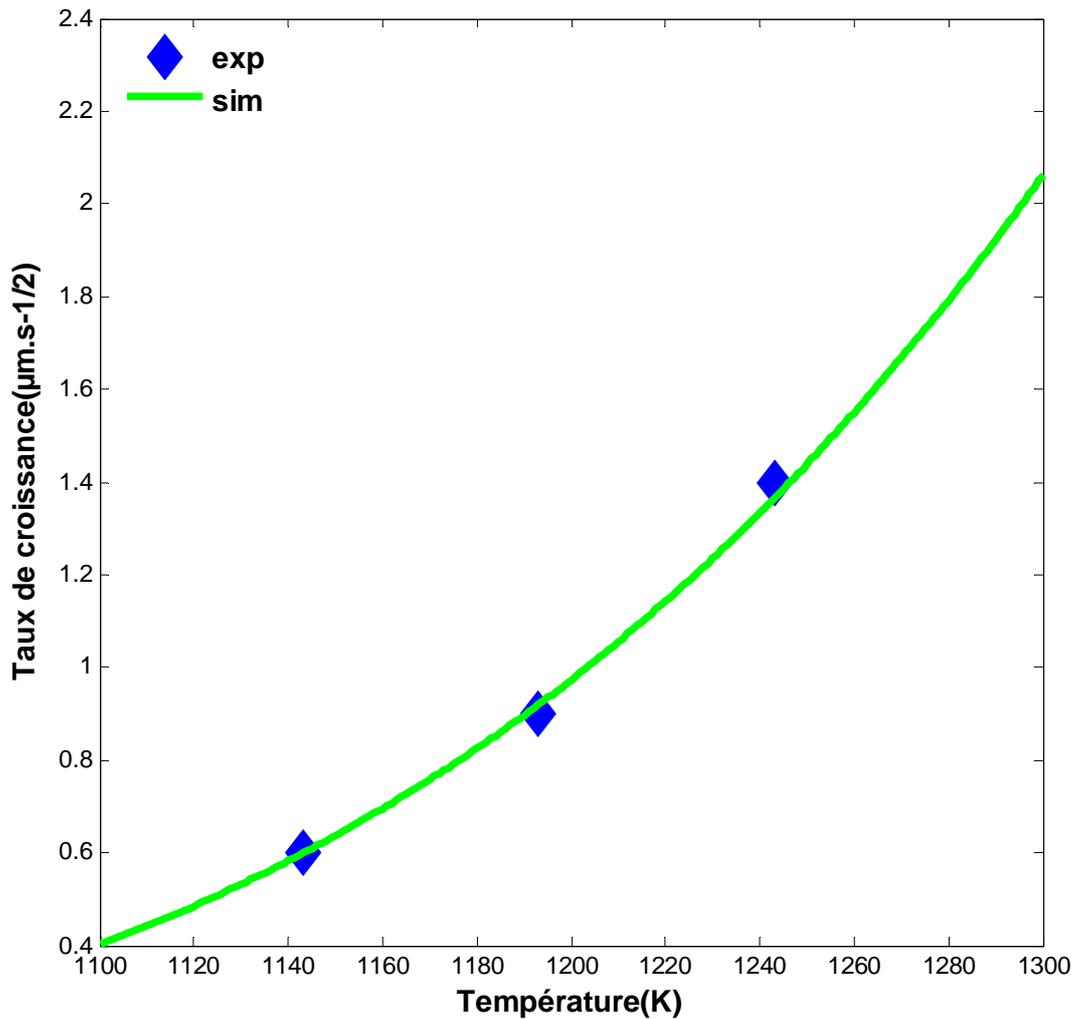


Figure IV.2 : Variation de la constante du taux de croissance en fonction de la température pour la phase Fe_2B .

D'après la figure IV.2 les constantes du taux de croissance de la couche suivent une loi exponentielle. La figure présente l'évolution des constantes cinétiques pour la couche de borure en fonction de la température, pour la phase Fe_2B la constante cinétique augmente avec l'augmentation de la température. On remarque qu'il y a une bonne concordance entre la simulation et l'expérimental.

IV.4.1.2 Détermination de l'épaisseur de la couche borurée

Nous pouvons déterminer l'épaisseur de la couche borurée à partir de la constante du taux de croissance déterminée précédemment. La figure IV.3 représenté l'épaisseur de la couche borurée (Fe_2B) pour une concentration de bore en surface égale à 15.00 wt%. La courbe de la simulation coïncide avec les données expérimentales.

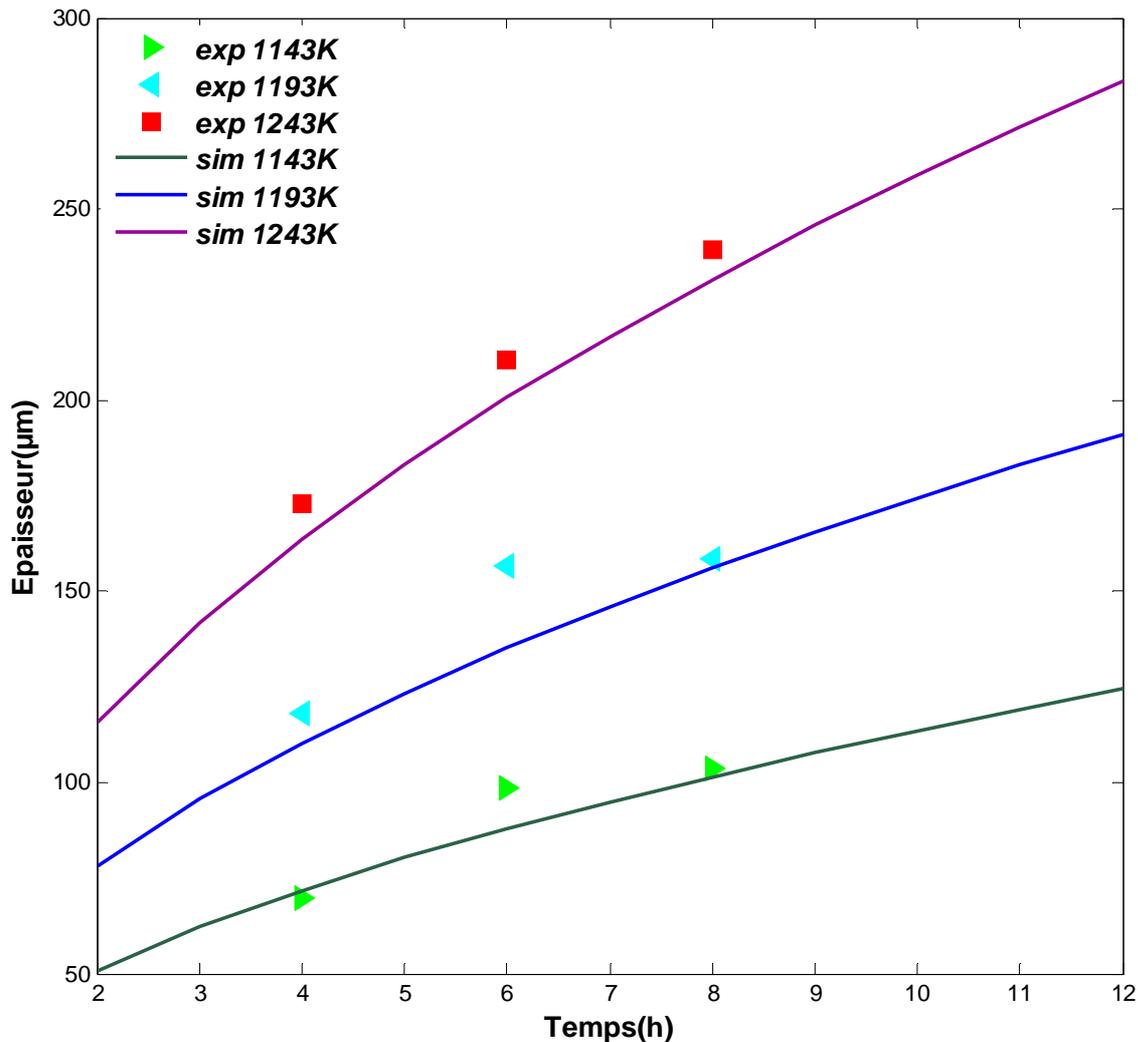


Figure IV.3 : Évolution de l'épaisseur de la couche borurée Fe_2B en fonction de temps.

Nous avons calculé aussi la variation de l'épaisseur de la couche borurée en fonction de la concentration de bore en surface à une température de 1143 k (figure IV.4). On remarque que l'augmentation de la concentration de bore en surface permet d'obtenir des épaisseurs plus élevées. La concentration de bore en surface ayant une influence important sur la cinétique de la couche borurée (Fe_2B).

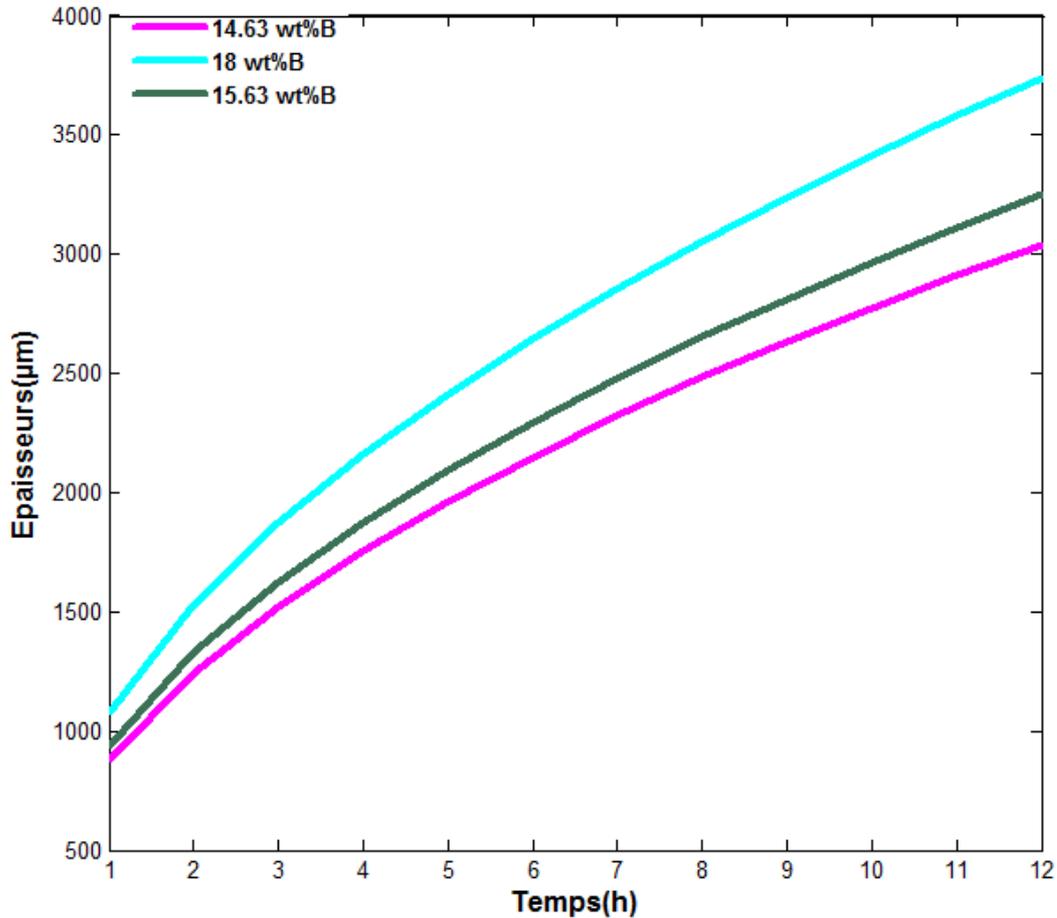


Figure IV.4 : Evolution de l'épaisseur de la couche borurée en fonction de la concentration de bore en surface à 1143k.

IV.4.1.3 Concentration de bore pour chaque phase

Le programme de simulation permet de donner des indications sur la variation de la concentration de bore en fonction de la profondeur.

Les figures IV.5, IV.6 présentent la concentration de bore pour les différentes phases Fe_2b , γ - Fe_2B , pour une concentration de bore en surface 15.00 wt.%, la concentration de bore diminue graduellement suivant la profondeur de pénétration.

Pour la phase Fe₂B :

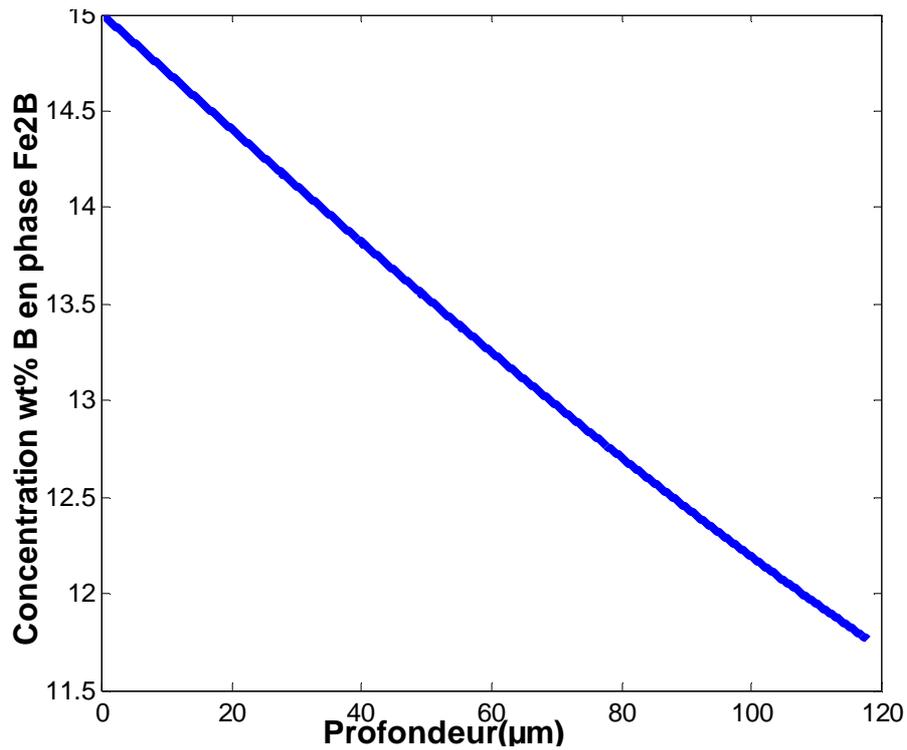


Figure IV.5 : Concentration de bore en phase Fe₂B (T=1193k pour 8 h de traitement).

Pour la phase γ-Fe :

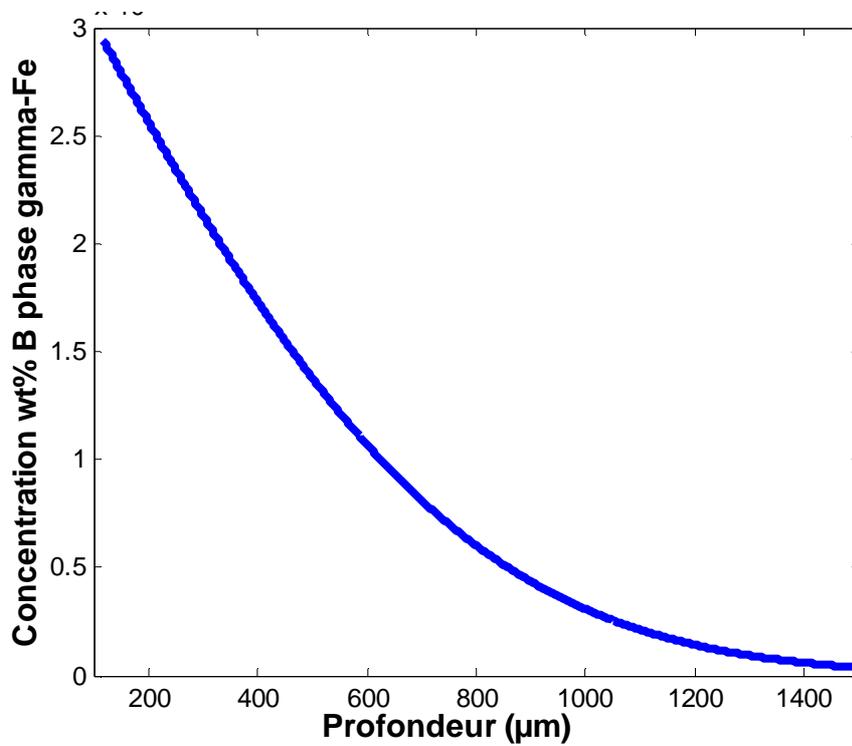


Figure IV.6 : Concentration de bore en phase γ-Fe (T=1193k pour 8 h de traitement).

IV.4.1.4 Gain de masse

Les figures IV.7 représentent le gain de masse en fonction du temps pour la phase Fe_2B , et montre que le gain de masse augmente avec l'augmentation de la température et du temps de traitement.

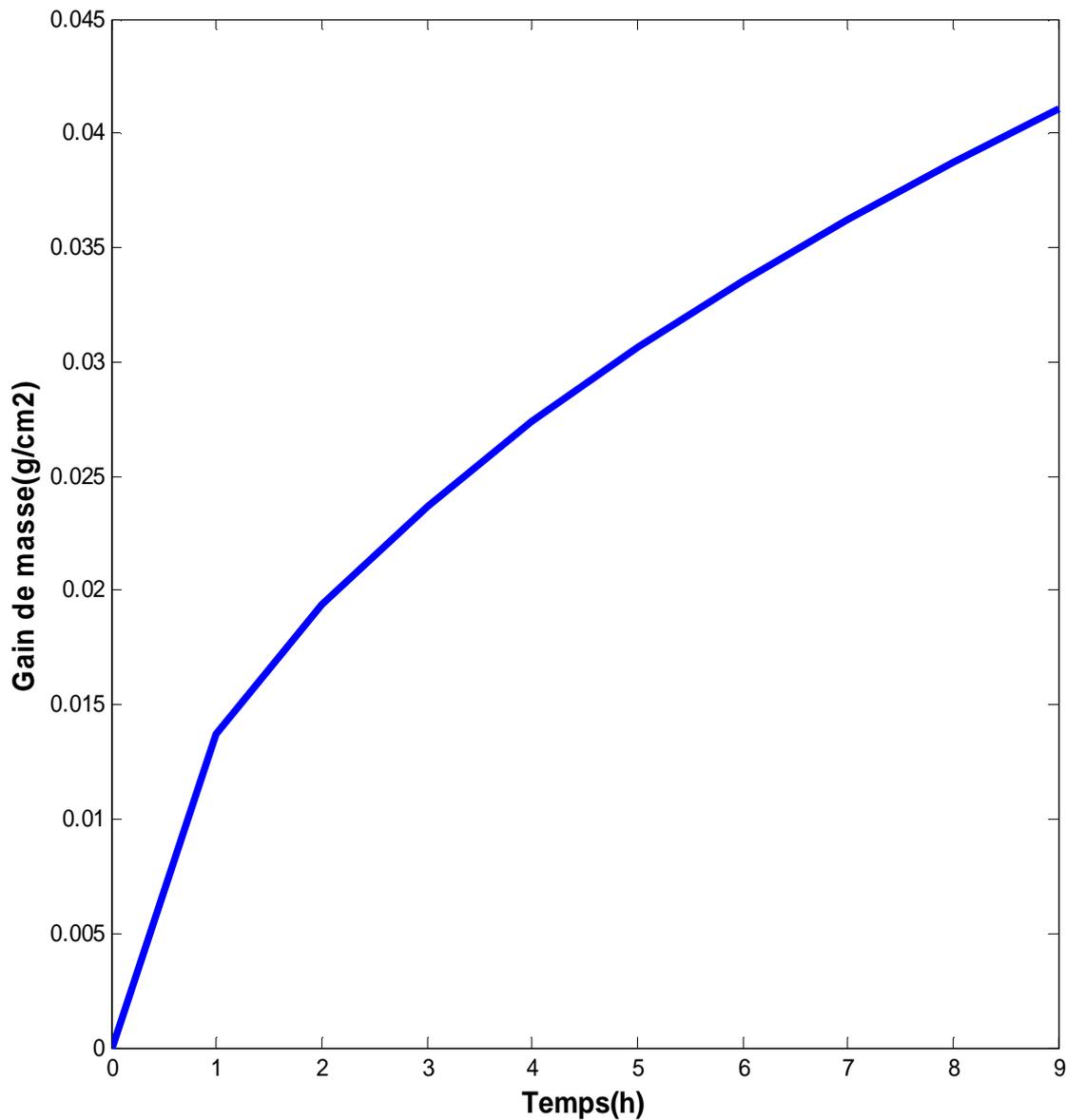


Figure IV.7 : Gain de masse en fonction de temps ($T=1273\text{k}$)

IV.4.2 Modèle de la logique floue

Dans cette partie, nous présentons les résultats relatifs au modèle de la logique floue que nous avons comparé aux résultats expérimentaux de la boruration de l'acier C15 [43].

Ensuite nous avons comparé les résultats obtenus avec le modèle mathématique de la diffusion avec les résultats de la simulation de l'approche de la logique floue (la comparaison des résultats obtenus par les deux modèles).

IV.4.2.1 Application du modèle de la logique floue

Nous reportons sur le tableau IV.4 les épaisseurs de la couche borurée obtenues par le modèle de la logique floue et celles obtenues expérimentalement. Nous constatons la bonne concordance entre les données expérimentales et celles obtenues avec l'approche de la logique floue aux différentes températures.

Température/Times (h)	Epaisseur de la couche Fe ₂ B (μm)					
	Expérimentale [43]			Sim logique floue		
	4h	6h	8h	4h	6h	8h
1143 k	69.9	98.4	103.9	70	90	100
1193 k	117.9	156.7	158.3	120	152	180
1243 k	172.7	210.6	239.2	180	210	240

Tableau IV.4 : Comparaison des valeurs des épaisseurs de la couche borurée obtenues expérimentalement et celles obtenues par modèle de la logique floue.

La figure IV.8 représente la simulation de l'épaisseur de la couche borurée en utilisant le modèle de la logique floue détaillé précédemment (chapitre III).

Comme exemple dans cette fenêtre on a pour :

La durée de traitement $t=4h$ et Température de traitement $T=870^{\circ}C$, le résultat est l'épaisseur de la couche borurée de $70\mu m$.

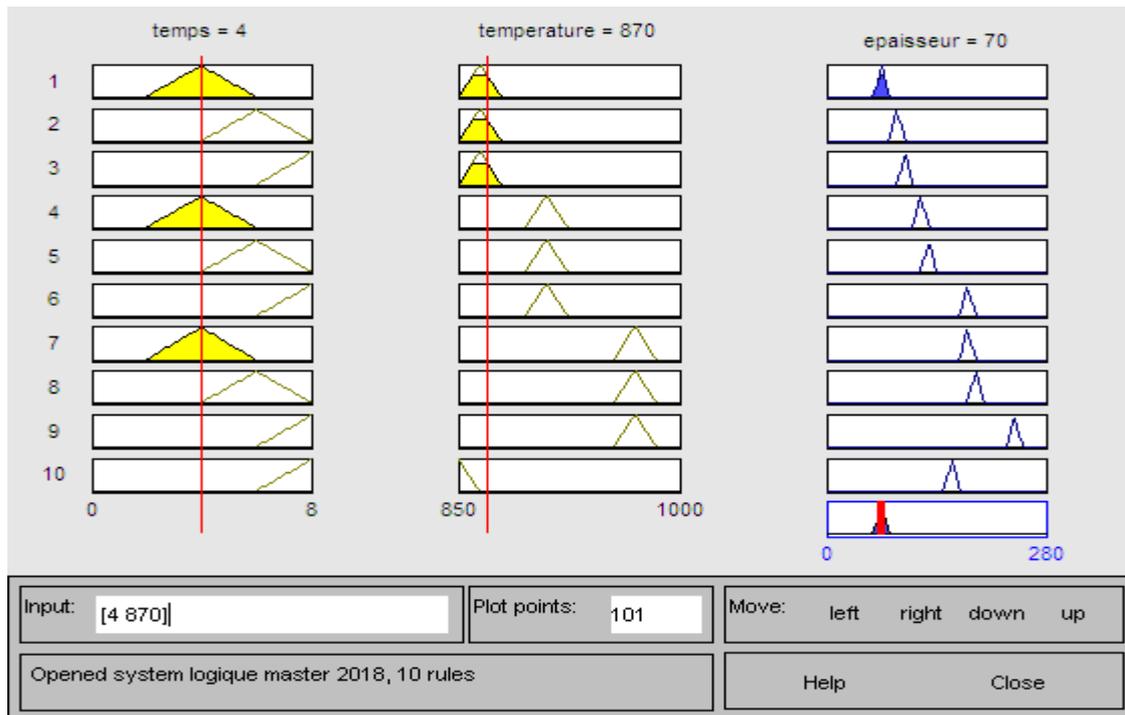


Figure IV.8: Interface de calcul de l'épaisseur.

La figure IV.8 représente l'évolution de l'épaisseur de la couche borurée en fonction du temps et de la température. Nous remarquons que l'épaisseur augmente avec l'augmentation du temps de traitement et de la température, le graphe permet de déterminer l'épaisseur pour différents paramètres.

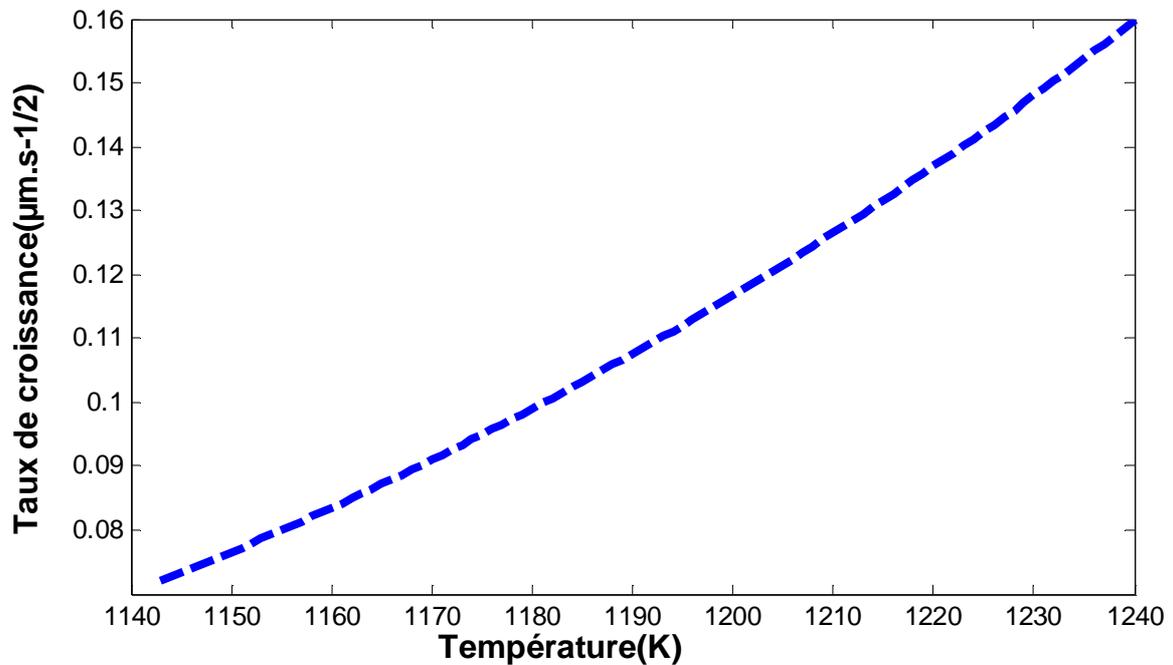


Figure IV .9 : Constante du taux de croissance K en fonction de la température.

Température(K)	Constante du taux de croissance ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1/2}$)	
	Expérimental [43]	Simulation avec la logique floue
1143	0.621	0.58
1193	0.993	1.00
1243	1.427	1.40

Tableau IV.5 : Valeurs expérimentales et simulées de la constante k.

De la figure IV.10 nous remarquons que l'épaisseur augmente avec l'augmentation du temps de traitement et de la température, le graphique permet de déterminer l'épaisseur pour différents paramètres.

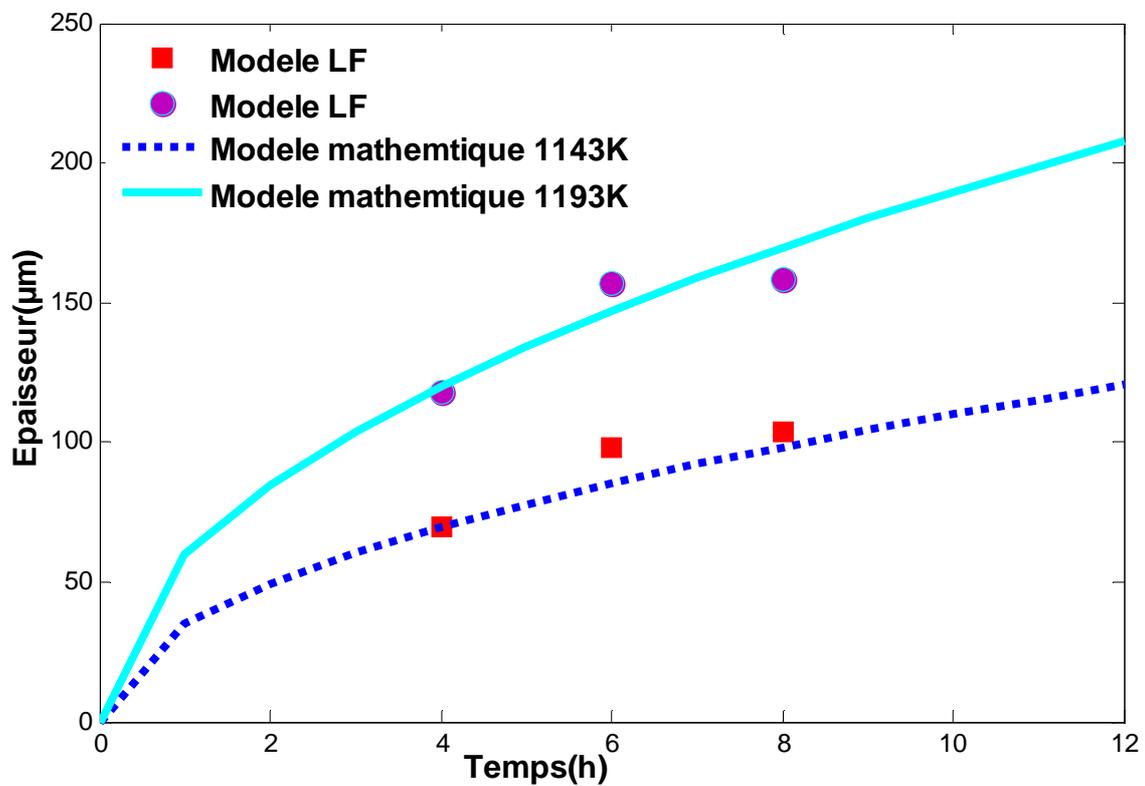


Figure IV.10: Comparaison entre les deux modèles, modèle mathématique et modèle LF.

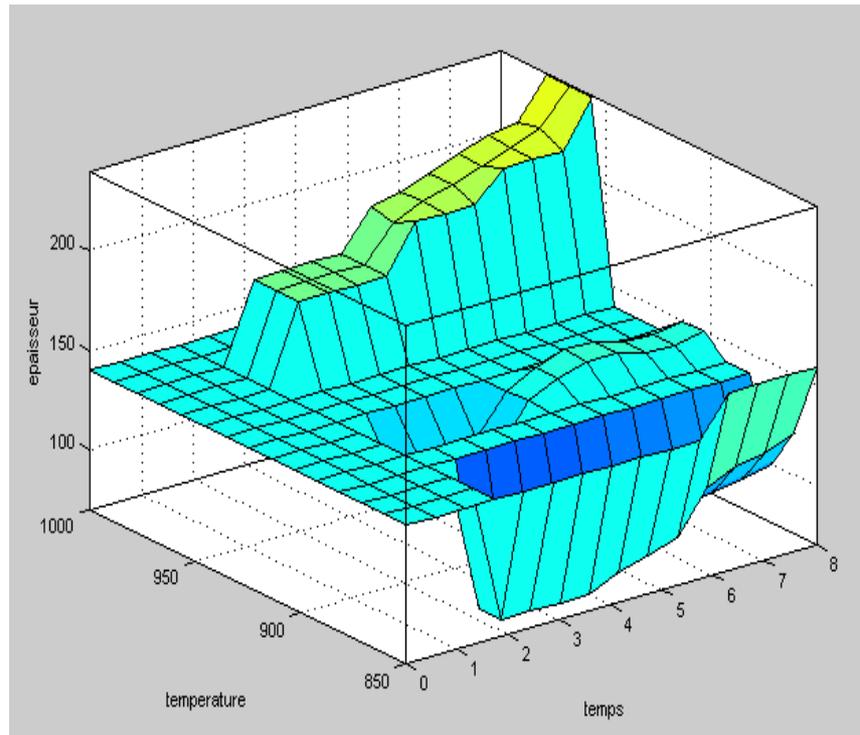


Figure IV.11: Représentation en trois dimensions des résultats de modèle LF.

IV.5 CONCLUSIONS

En utilisant le modèle de simulation basé sur l'approche de la logique floue présenté précédemment, nous avons mis au point un programme de simulation qui permet de calculer l'épaisseur de la couche bourrée Fe_2B et étudie la cinétique de la boruration.

Nous constatons à travers ce travail qu'il est possible d'élaborer des modèles mathématiques pour traiter le processus de la boruration. La simulation numérique de la cinétique de boruration donne de bons résultats. La comparaison des résultats expérimentaux avec nos calculs théoriques nous permet de confirmer la validité des modèles utilisés. Avec ces approches numériques, on peut déterminer l'influence des différents paramètres mis en jeu tels que la température, la concentration de bore et la durée du processus de boruration. Les résultats obtenus dans ce travail montrent bien l'influence de ces paramètres.

L'utilisation de la logique floue représente une alternative au sein de la modélisation de la croissance des couches des borures de fer. En résumé pour le premier modèle physique (2^{ème} loi de Fick), nous utilisons plusieurs paramètres (temps, température, concentration dans les interfaces, concentration à la surface et coefficient de la diffusion de bore pour chaque phase). L'intervalle de validité de ce modèle est limité à des températures variant de 700 °C à 1050 °C. Par contre pour le deuxième modèle mathématique (la logique floue), nous utilisons seulement la température, le temps et les données expérimentales.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La boruration est un traitement thermo-chimique de la surface peut être appliqué à une gamme étendue des matériaux (acier inoxydable, métaux ferreux et non ferreux, cermets, etc.). Ceci permet d'obtenir des couches très résistantes à la corrosion et à l'usure abrasive et adhésive. Le fonctionnement de cette technique est basé sur la diffusion des atomes de bore dans la surface. Ces atomes réagissent avec le matériau et forme un certain nombre de borures.

La simulation numérique est un moyen performant d'analyse et de compréhension des phénomènes physico-chimiques intervenants dans ce type de traitement.

À travers de ce travail nous avons étudié par simulation numérique la cinétique de la boruration avec un modèle basé sur l'approche de l'intelligence artificielle (la logique floue) pour estimer l'influence des différents paramètres participant dans ces processus.

La simulation avec cette méthode (la logique floue) donne de bons résultats. La comparaison des résultats expérimentaux avec nos calculs théoriques nous permet de confirmer la validité du modèle utilisé.

Avec cette simulation on peut déterminer l'influence des différents paramètres mis en jeu telle la température, la concentration de bore et la durée du processus de boruration.

La méthode de la logique floue est très utile lorsque l'on se trouve confronté à des systèmes qui ne sont pas, ou difficilement modélisable.

De même, cette méthode est très avantageuse si l'on possède un bon niveau d'expertise humaine. En effet, il faut fournir au système flou toute une base de règle exprimé en langage naturel pour permettre de raisonner et de tirer des conclusions. Plus l'expertise humaine d'un système est importante et plus on est capable d'ajouter des règles d'inférences au système.

Les modèles développés dans ce travail sont bien appropriés pour des applications pratiques.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **L. Avril**, « Elaboration de revêtements sur acier inoxydable simulation de la fusion par irradiation laser caractérisation structurale », mécanique et tribologique.
- [2] **R. Lévêque, M. Colombie**, « Traitements et revêtements des métaux » Technique et ingénierie, Dunod, Avril (2016).
- [3] www.cd2e.com , traitement de surface /CD2E.(2017).
- [4] <http://www.bel-tec.be>, La diffusion thermique et les processus de durcissement.(2018).
- [5] www.asminternational.org,(2018).
- [6] **UITS**, « les traitements thermiques et thermochimiques superficiels », Technologies des surfaces, (2017).
- [7] **I. Campos-Silva, M. Ortiz-Domínguez, O. Bravo-Bárceñas, M.A. Doñu-Ruiz, D. Bravo-Bárceñas, C. Tapia-Quintero, M.Y. Jiménez-Reyes**, Surf. Coat. And Technol. 205 p. 403,(2010).
- [8] **C. Bindal, A.H.Ucisik, J.Aust**, « Characterization of borides formed on impurity-controlled chromium-based low alloy steels », Ceramic Soc. 34, 287-892(1998).
- [9] <https://www.a3ts.org/association-a3ts/traitements-thermiques/traitement-surface>, (2018).
- [10] **N. Ueda, T. Mizukoshi, K. Demizu, T. Sone, A. Ikenaga and M. Kawamoto**, « Boriding of nickel by the powder-pack method » , Surf.coat.technol, 126, 25-30,(2000).
- [11] **B. Mebarek, D. Madouri , A.Zanoun, A.Belaidi**, « Simulation model of monolayer growth kinetics of Fe₂B phase » Matériaux & Techniques 103, 703 (2015).
- [12] **A. Newkirk, Boron, Metallo-Boron Compounds and Boranes, R M Adams** (New York, London Sydney: Interscience publishers, (1964).
- [13] **O. Allaoui, N. Bouaouadja, G. Sainderran**, Surf. Coat. and Technol. 201 (2006).
- [14] **A. Graf von Matuschka, Boronizing, Carl Hanser Verlag**, Munich, FRG, (1980).
- [15] **S.A. Bouaziz**, « Réalisation d'une boruration thermochimique dans un bain de sels (Na₂B₄O₇ – SiC) de l'acier inoxydable utilisé comme implant » thèse de doctorat, ENSET d'Oran, (2010).
- [16] **V.G. Permyakov, V. F. Loskutov, I. Kh. Trush and V. N. Pisarenko**, « Boriding of Tool Steels in Commercial Boron Carbide » Met.Sci.Heat Treat.16, 160-162,(1974).
- [17] **B. Mebarek, S.A.Bouaziz, A.Zanoun**, Simulation model to study the thermochemical boriding of stainless steel "AISI 316" (X5CrNiMo17-12-2) » Matériaux & Techniques, (2012).
- [18] **H. Kunst, O.Schaaber**, « Observation en surface boronization of steel » , Härterei-tech-Mittellungen, 22,275–292(1967).

- [19] **M. Keddam, S.M. Chentouf**, « A diffusion model for describing the bilayer growth (FeB/Fe₂B) during the iron powder-pack boriding », *Appl.Surf.Sci*, 252 ,393–399, (2005).
- [20] **H. Kunst**, « technique des matières plastique (KUNSTSTOFFE) », 11,726-730, (1972).
- [21] **A. Graf von Matuschka**, “Boronizing “, Carl Hanser Verlag, Munich,FRG, (1980).
- [22] **O. Allaoui**, « Boruration sans électrolyse des aciers dans des sels fondus et caractérisation des couches borurées obtenues » thèse de magister, Ecole Nationale Polytechnique d’Alger (1995).
- [23] **G.V. Samsonov, A.P. Epik**, Boride coatings, Coatings of high-temperature materials, Plenum press, New York (1966).
- [24] **C.Mehdi, C. Nicolas, L.Romain**, Ing I, BLANC Jérôme.
- [25] tpe-intelligence-artificielle.e-monsite.com/.../définition-de-l-intelligence-artificiel, (2013).
- [26] **C.Touzet**, Introduction au connexionnisme, (1992).
- [27] **O. Boisard**- Cours d’Intelligence Artificielle – (2018).
- [28] **J.Antoine** de l’Équipe-Projet INRIA OPALÉ, « Modélisation et simulation : lorsque l’ingénierie devient numérique », Avignon, BTS 1e année (CPI, MAI, IRIS), ING 2e année,(2012)
- [29] **F.Daikh**, « Contribution des approches de l’intelligence artificielle pour la stabilisation robuste des systèmes non linéaires » thèse de doctorat, Université d’Oran1 A. Ben Bella, (2015).
- [30] **O.Ezratty**, Les avancées de l’intelligence artificielle, (<http://www.oezratty.net>)(2016).
- [31] **L.Mohand , S.Rouidi**, Diagnostic Neuro-flou « Application à la machine Asynchrone »
- [32] **A.Dahdouh**, « Etude comparative entre la commande par logique floue » mode de glissement et PID classique appliquées au système Hydraulique CE105, Master commande des systèmes électriques, département Génie électrique, Université de M’sila,(2014).
- [33] **L.Benameur**, « Contribution à l’optimisation complexe par des techniques de swarm intelligence, thèse de Doctorat, Université Mohamed V Agdal Rabat Maroc, ingénieur spécialité informatique et télécommunications, (2010).
- [34] **H. Bouzid**, « application de la technique de la logique floue pour la prédiction de l’amorçage des intervalles d’air pointes plans, Master Génie électrique », mémoire d’ingénieur d’état en informatique, Université kasdi merbah ouargla, (2012).
- [35] **F. Dernoncourt**, Mémoire de Master, « Raisonement, La Logique Floue : entre raisonnement humain et intelligence artificielle », Mémoire de Master, Paris, (2011).
- [36] **B. Mebarek**, « Apporte des réseaux Neuro-flou dans le suivi de cible dynamique » mémoire d’ingénieur d’état en informatique, Université Ibn Khaldoun Tiaret, (2005).
- [37] www.air-formation.com/(2018).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [38] **A.Bonomi,R.Habersaat**, « Electrochemical boriding of nitriding steel in molten salts », Surface technology , 6,313-319,(1978).
- [39] **M.C.Paucirova, P.Felner, J.Kristin**, « Chemical and phase compositions of boride layers grown on steel bases in molten salts » Chemistry Papers, 40,153-166, (1986).
- [40] **J.S.Kirkaldy**,« Diffusion in multicomponent metallic, systems,» I, Can.J.Phys, 36,917,926,(1958).
- [41] **F. Baba hamed**,« Polycopié Le calcul scientifique appliqué au Génie Civil sous MATLAB », Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran, (2018).
- [42] http://perso-laris.univ-angers.fr/~delanoue/istia/calcul_numerique/td1.pdf, (2018).
- [43] **A. Milinović, D. Krumes, R. Marković**, « an investigation of boride layers growth kinetics on carbon steels », Technical Gazette 19, 1, 27-31.(2012)

RÉSUMÉ

Malgré l'importance des procédés de boruration dans le domaine industriel, il n'y a pas de modèles bien détaillés sur la cinétique de la couche borurée.

L'objectif principal de ce travail est l'étude numérique de la cinétique de boruration d'un acier au carbone, premièrement, nous avons vue de la technique de la boruration et les différents domaines d'application et la technique de l'intelligence artificielle (la logique floue), deuxièmes, nous avons donne deux modèles appliqués à la boruration, un modèle mathématique basé sur la loi de Fick et un modèle basé sur l'approche de la logique flou et enfin, nous avons proposé d'étudier la boruration d'un acier C15 et comparons les résultats expérimentaux avec nos calculs théoriques nous permettons de confirmer la validité du modèle utilisons.

Mots clés : Boruration, Fe_2B , modèle, simulation, logique floue.

ABSTRACT

Despite the importance of boriding processes in the industrial field, there are no very detailed models on the kinetics of the borured layer. The main objective of this work is the numerical study of the kinetics of boridation of carbon steel; first, we have seen the technique of boriding and the different fields of application and the technique of artificial intelligence. (fuzzy logic), second, we gave two models applied to boriding, a mathematical model based on Fick's law and a model based on the approach of fuzzy logic and finally, we proposed to study boriding of a C15 steel and compare the experimental results with our theoretical calculations allow us to confirm the validity of the model used.

Key words: Boruration, Fe_2B , model, simulation, fuzzy logic.

ملخص

على الرغم من أهمية عمليات البورنة في المجال الصناعي ، إلا انه لا توجد نماذج مفصلة تتعلق بحركية الطبقة

البوريدية.الهدف الرئيسي من هذا العمل هو الدراسة الرقمية لحركية بورنة الصلب الكربوني.

في بداية الأمر قمنا بعرض مفصل لتقنية البورنة و مجالات الاستخدام المختلفة لها ،وبعد ذلك تطرقنا لتقنية الذكاء الاصطناعي المتمثلة في المنطق الضبابي . في المرحلة الثانية، قمنا باقتراح نموذجين لمحاكاة عملية البورنة ، النموذج الأول يتمثل في نموذج رياضي يعتمد على قانون فيك ، أما الثاني فهو قائم على الذكاء الاصطناعي (المنطق الضبابي) وأخيرا في نهاية هذا العمل قمنا بالتحقق من صحة النموذجين باستعمال معطيات تجريبية الصلب ومقارنة النتائج التجريبية مع حساباتنا النظرية تسمح لنا بتأكيد صلاحية النموذجين.

الكلمات المفتاحية : البورنة، Fe_2B ، نموذج، محاكاة ، منطق ضبابي.