

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique



Université AMAR TELIDJI

Faculté de Technologie

Département : Génie Mécanique

Mémoire de MAGISTER

Option : Sciences Des Matériaux

Par :

HACHANI Ahmed

THEME

Etude de la cinétique de croissance des couches de borures

réalisées sur un Acier XC38 par la technique des poudres

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mr : Sebaa Mohamed	“Professeur”	Président
Mr : Cheknane Ali	“Professeur”	Examineur
Mr : Lefkeir Ibn Khaldoun	“Professeur”	Examineur
Mr : Allaoui Omar	“Maitre de Conférences A”	Rapporteur

Promotion Septembre 2012

*À la mémoire de mon père,
Mon ami Ferhat Mabrouk,
Et à tous ceux que l'on a aimés Nous partager
Ces bons Moments*

Remerciement

Mes premiers remerciements s'adressent à Mr Omar Allaoui pour avoir accepté de diriger ce travail, je le remercie pour ses encouragements, sa patience et sa sincérité.

Je remercie également mon Co-promoteur Mr Karim Rayane pour son aide précieuse et sa contribution dans la partie programmation, je le remercie pour sa disponibilité dont il a toujours fait preuve à mon égard.

Je remercie Mr Mohammed Sebaa pour avoir accepté de présider ce jury, j'adresse aussi mes remerciements à Messieurs Ibn Khaldoun Lefkaier et Ali Cheknane pour avoir accepté d'être les examinateurs de mon mémoire.

Je tiens à remercier Mr Mohammed Mékhanet pour m'avoir élucidé les premières notions de base des réseaux de neurones.

J'aimerais aussi remercier Mr Ahmed Hireche qui a mis à ma disposition les documents nécessaires pour mener à bien ce travail ; faisant ainsi une grande preuve d'amitié.

En fin j'exprime ma sincère reconnaissance à mon ami Ahmed Geuddouh, je le remercie pour son soutien et son encouragement qu'il m'a apporté tout le long de ce travail.

Une dernière pensée pour tous mes proches particulièrement ma mère mon épouse et mes deux petits enfants Youcef Essedik et Ismail Saber.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE 1 PHENOMENE DE DIFFUSION

1.1	Introduction.....	3
1.2	Domaine d'utilisation.....	3
1.2.1	Domaine mécanique.....	3
1.2.2	Domaine électrique.....	4
1.3	Type de diffusion	
1.3.1	Autodiffusion.....	5
1.3.2	Interdiffusion.....	6
1.4	Mécanisme de diffusion.....	6
1.4.1	Mécanisme lacunaire.....	6
1.4.2	Mécanisme interstitiel.....	7
1.4.3	Mécanisme interstitiel combiné au mécanisme lacunaire.....	8
1.4.4	Mécanisme de groupe mettant en jeu plusieurs atomes.....	8
1.5	Fondement de la diffusion.....	8
1.5.1	Flux de diffusion et loi de Fick.....	9
1.5.2	La diffusion et la température.....	9
1.6	Equation de la diffusion	
1.6.1	Première loi de Fick.....	10
1.6.2	La diffusion en régime permanent.....	10
1.6.3	Deuxième loi de Fick.....	11
1.6.4	Equation de la fonction d'erreur.....	13
1.6.5	Exemple d'application.....	14
1.6.6	Modèle mathématique.....	15
1.6.7	Gain de masse	16

CHAPITRE 2 LA BORURATION

2.1	Généralité.....	18
2.2	Les propriétés mécaniques et épaisseur des couches borurée.....	19
2.2.1	Caractéristiques mécaniques des couches borurées.....	20
2.2.2	Epaisseur des couches borurées.....	20
2.3	Les procédés de boruration.....	21
2.4	La mise en œuvre.....	22
2.5	Traitement thermique de boruration	23
2.5.1	La finition.....	23
2.6	Caractérisation de la couche borurée dans un acier XC38.....	24
2.7	Données expérimentales.....	25
2.7.1	Relevé de mesures d'épaisseurs sur échantillon.....	25
2.7.2	Résultats expérimentaux.	26

CHAPITRE 3 INTRODUCTION AUX RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

3.1	Généralité.....	28
3.2	Le neurone biologique.....	28
3.3	Le neurone formel (artificiel).....	30
3.4	Fonctionnement d'un réseau de neurone artificiel.....	32
3.4.1	Le réseau à couche unique.....	34
3.4.2	Les réseaux multicouches.....	35
3.5	Utilisation des réseaux de neurones artificiels.....	36
3.5.1	Phase d'apprentissage.....	36
3.5.2	Phase de test.....	40
3.6	Exemple d'application.....	40

CHAPITRE 4 IMPLEMENTATION ET RESULTATS

4.1	Mode opératoire.....	45
4.2	Définition du nombre de neurone dans un réseau.....	46
4.3	Implémentation de réseau de neurones.....	47
4.4	Etapas d'apprentissage.....	47
4.5	Première expérience.....	49
4.5.1	inputs non normalisés.....	49
4.5.2	inputs normalisés	51
4.5.3	inputs Binaires	53
4.5.4	conclusion de la première partie.....	56
4.6	Deuxième expérience.....	57
4.6.1	inputs non normalisés.....	57
4.6.2	inputs normalisés.....	58
4.6.3	inputs binaires.....	60
4.6.4	conclusion de la deuxième partie.....	62
4.7	Troisième expérience.....	63
4.7.1	inputs non normalisés.....	63
4.7.2	inputs normalisés	64
4.7.3	inputs binaires.....	66
4.7.4	conclusion de la troisième partie.....	68
	CONCLUSION	69
	REFERENCES.....	70
	ANNEXE.....	72
	LISTE DES COURBES.....	118
	LISTE DES SYMBOLES.....	119

INTRODUCTION GENERALE :

La forme aciculaire des couches de borures formées sur les aciers rend difficile l'estimation de l'épaisseur obtenue.

La démarche classique de détermination des épaisseurs des couches borurées consiste à prélever plusieurs mesures d'épaisseur du front de diffusion (une dizaine de valeurs) et d'en calculer la moyenne arithmétique ; bien que cette valeur n'a pas un fondement mathématique rigoureux, néanmoins elle constitue jusqu'à présent une assez bonne approche pour la mesure de l'épaisseur de la couche diffuse.

L'approche entreprise tout au long de ce travail est de reprendre toutes les valeurs mesurées d'épaisseurs et de les présenter à un modèle de réseau de neurone pour construire le réseau ; on n'omet donc aucune valeur mesurée sur les échantillons mais elles sont toutes exploitées par le réseau de neurone.

Grâce à l'évolution des moyens informatiques connus de nos jours, la simulation numérique est devenue un outil de recherche scientifique indispensable, elle réduit le coût et le temps ; tout en particulier lorsque les essais expérimentaux exigent des moyens matériels considérables.

L'objectif de ce travail s'inscrit dans ce contexte; la prédiction des épaisseurs des couches borurées par les méthodes numériques connaît ces dernières années un intérêt croissant, toute fois la simulation des couches borurées par les réseaux de neurones demeure un terrain nouvellement conquis par quelques chercheurs. [1] [2]

Le premier chapitre dans notre travail est une étude sur le phénomène de la diffusion en générale et les lois mathématiques qui gouvernent ce phénomène.

Le second chapitre est consacré au cas particulier de la diffusion du Bore dans un acier XC38 cet acier auquel tous les travaux expérimentaux de boruration ont été réalisés au niveau du

laboratoire de génie des procédés à l'université de Laghouat, ces travaux vont servir à la validation des résultats de simulation.

Dans le troisième chapitre, nous avons fait une étude bibliographique sur les réseaux de neurones et leurs principes de fonctionnement, avec un exemple explicatif.

Le chapitre quatre est la partie essentielle de notre travail il comprend l'implémentation des réseaux de neurones et tous les résultats de simulation obtenus, ils sont représentés sous forme de tableaux et des courbes.

A la fin une conclusion résume tout le travail avec un commentaire.

CHAPITRE 1 PHENOMENE DE DIFFUSION

1.1 Introduction

Le phénomène de diffusion est un phénomène très général dans la nature, qui correspond à la tendance à l'étalement d'espèces, particules, atomes ou molécules grâce à une excitation énergétique apportée par la chaleur. Suivant le milieu dans lequel se déplacent ces espèces, l'étalement sera plus ou moins grand.

A température ambiante le phénomène de diffusion sera très important dans un milieu gazeux, plus faible dans un milieu liquide et pratiquement nul dans un milieu solide. Pour obtenir un phénomène de diffusion dans un solide ou un cristal, il faudra chauffer le matériau à des températures voisines de 1000°C.

Grace au gradient de concentration qui s'établi entre le milieu externe (soit le carbone, le bore...) qui a une concentration plus grande que celle du milieu solide le phénomène de diffusion aura lieu, le mouvement des atomes se fait de la concentration élevée vers la concentration la moins élevée.

Dans la suite, nous nous intéresserons essentiellement aux mécanismes de diffusion dans le milieu solide. Pour mieux comprendre l'aspect macroscopique du phénomène de diffusion, il faut avoir une idée des phénomènes et mécanismes mis en jeu à l'échelle atomique.

Les mécanismes ne seront possibles qu'à la condition que les espèces concernées soient suffisamment excitées (niveau d'énergie suffisant) pour statistiquement franchir les barrières d'énergie que constituent par exemple les barrières de potentiel atomique.

Ces barrières de potentiel vont dépendre des mécanismes mis en jeu. Par exemple un petit atome tel que le Bore pourra se "faufiler" entre les mailles du réseau cristallin et nécessitera donc une énergie plus faible pour se déplacer

En général :

La diffusion est le mouvement d'un atome d'une position de maille vers une autre position, la diffusion d'un atome n'est possible que si :

- ❖ Si il ya un espace adjacent
- ❖ Si l'atome à une énergie suffisante

1.2 Domaine d'utilisation :

1.2.1 Domaine mécanique :

Utiliser surtout pour améliorer les propriétés mécaniques des aciers spécialement les traitements de surface tel que la cémentation (carburation), boruration, nitruration,.....etc.

Traitement contre l'usure et contre les chocs mécaniques (ex : le traitement de surface des engrenages par carbone)

Résultats :

Dur à se déformer : les atomes du carbone « verrouille » les plans de la maille ;

Les atomes en noir (soude la structure) et empêchent les plans de se glisser

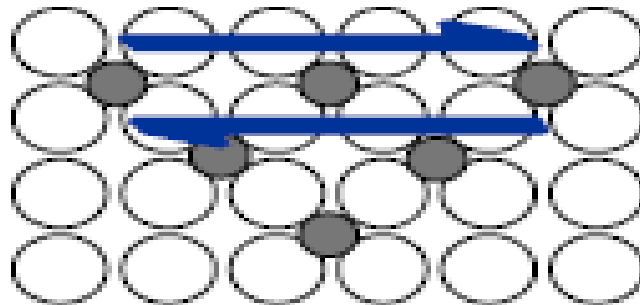


Figure 1.1 : Resistance à la déformation

Dur à se casser (fissurer) : les atomes de carbone mettent la surfaces en compression.

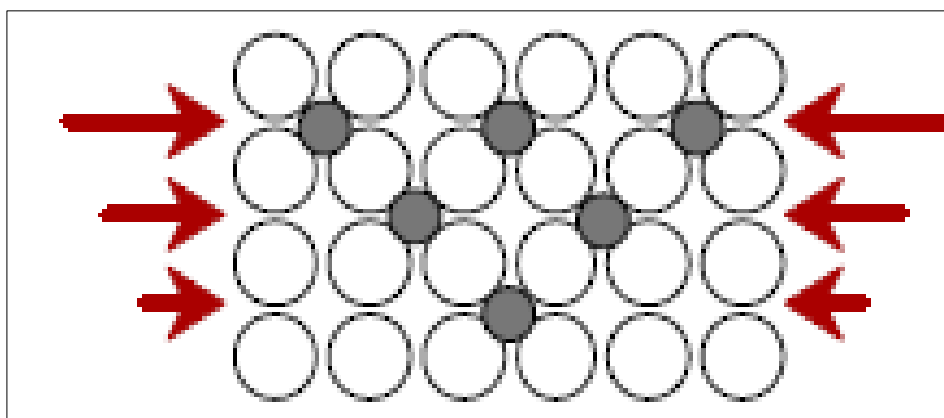


Figure : 1.2 : Resistance à la compression

1.2.2 Domaine électrique :

La diffusion est aussi utilisée dans le domaine électrique car Les cristaux dans leurs états naturels ne sont pas des cristaux parfaits, ils contiennent des défauts cristallins. On introduit des impuretés (dopant) de nature et en quantité contrôlées afin d'obtenir un cristal

qui s'approche de l'état parfait, cette technique est très utilisée dans le dopage des semi conducteurs, Le dopage d'un matériau consiste à introduire, dans sa matrice, des atomes d'un autre matériau [3]

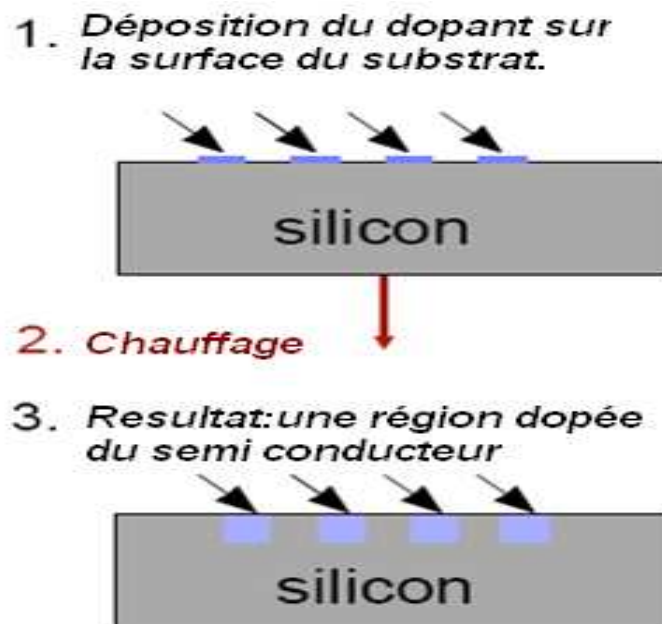


Figure 1.3 Dopage d'un semi-conducteur.

1.3 Types de diffusion :

1.3.1 Autodiffusion :

Dans un élément solide les atomes se déplacent aussi dans la même matrice [4]

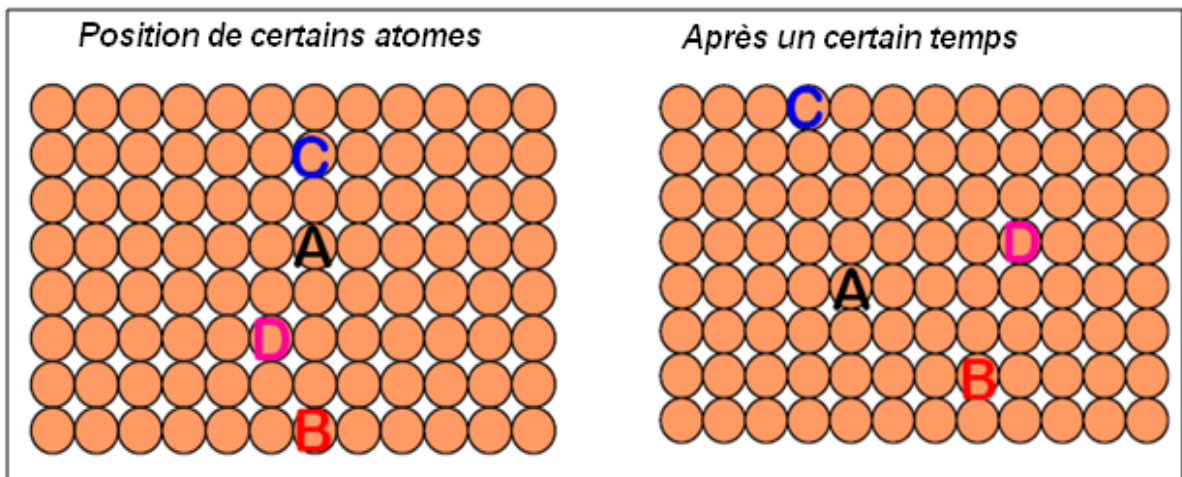


Figure 1.4 : Autodiffusion dans un même matériau

1.3.2 Interdiffusion :

Dans un alliage les atomes tendent de se déplacer des régions de haute concentration vers les régions de moins concentration

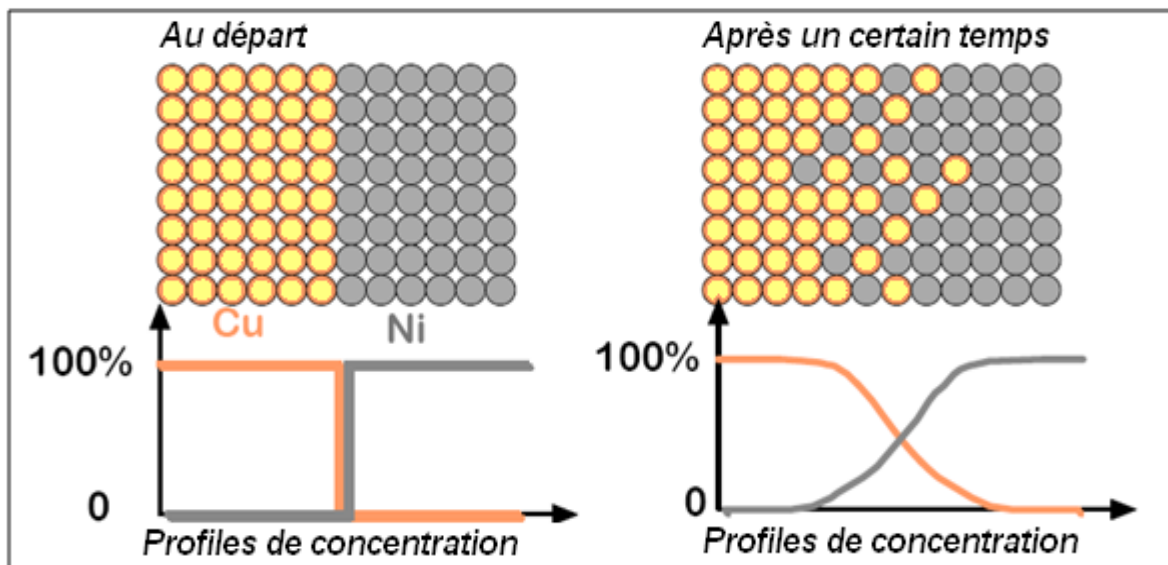


Figure 1.5: Profils de concentration avant et après diffusion

1.4 Mécanismes de diffusion :

Le processus de diffusion peut être divisé en trois mécanismes : mécanisme lacunaire, mécanisme interstitiel, mécanisme combiné et un mécanisme de groupe mettant plusieurs atomes en jeu [3]

1.4.1 Mécanisme lacunaire :

Correspondant à l'occupation d'une lacune ou vacance laissée par un atome du réseau cristallin qui peut, lui aussi se mouvoir en laissant des lacunes (voir animation 1 sur cd)

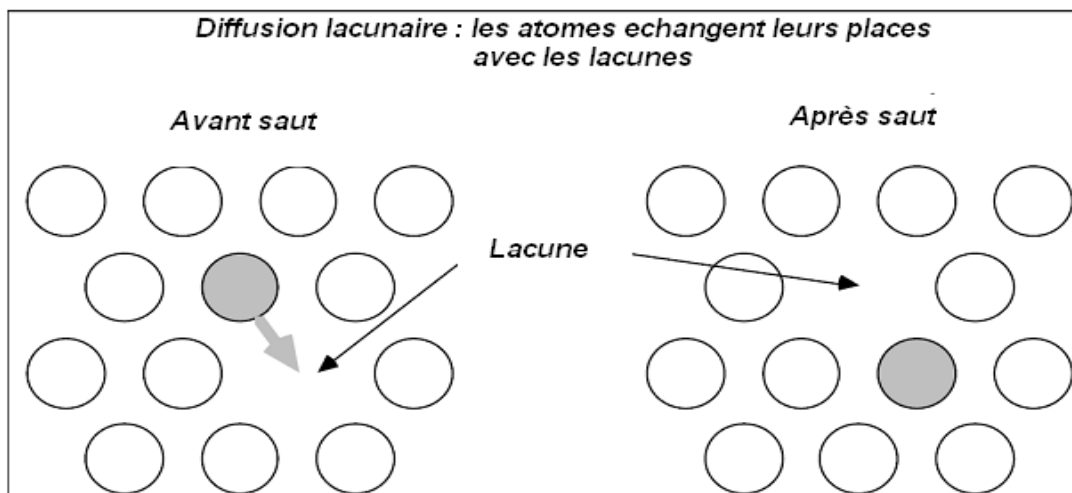


Figure 1.6 : Diffusion lacunaire

1.4.2 Mécanisme interstitiel :

Correspondant au déplacement des atomes entre les sites cristallins. Ce mécanisme sera prépondérant pour les petits atomes (voir animation 2 sur cd)

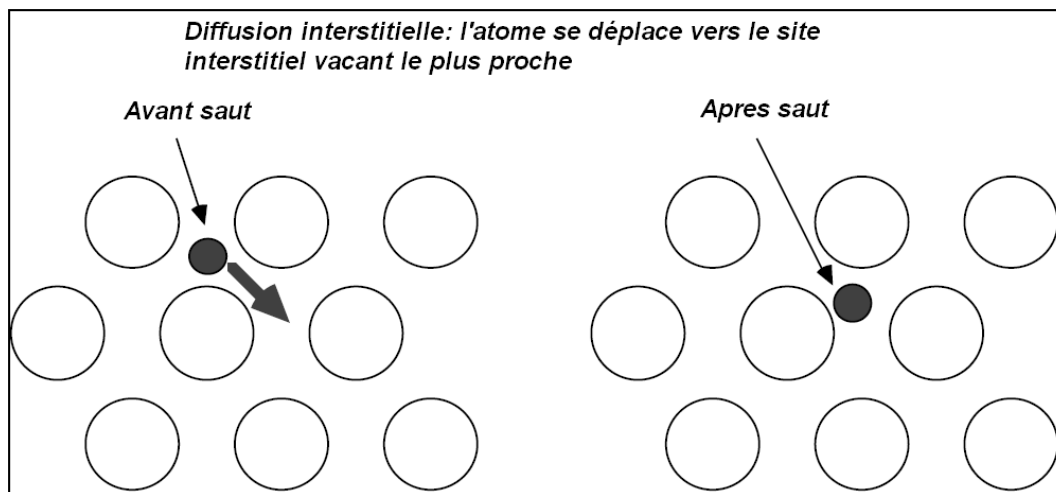


Figure 1.7 : Diffusion interstitielle

1.4.3 Mécanisme interstitiel combiné au mécanisme lacunaire :

Ce phénomène correspond à un placement en site substitutionnel d'un atome initialement positionné en site interstitiel tout en envoyant en site interstitiel l'atome en site cristallin d'origine. Ce phénomène correspond au "carreau sur place" du joueur de boules qui chasse la boule en lui prenant sa place (voir animation 3 sur cd)

1.4.4 Mécanisme de groupe mettant en jeu plusieurs atomes :

Ce mécanisme de placement en force est plutôt typique des gros atomes. (Voir animation 4 sur cd)

Ces mécanismes peuvent être modélisés indépendamment mais nécessiteraient des gros moyens de calcul pour simuler l'avancement d'une quantité importante d'atomes dopants dans un cristal. Il est donc plus facile de traiter le problème de façon macroscopique et statistique, ce que nous allons faire dans la suite.

1.5 Fondement de la diffusion :

Les modèles de processus de diffusion sont généralement conçus pour simuler le profil de la concentration d'un ou plusieurs composants en fonction de temps, le profil de

Concentration est un tracé en fonction de la distance qui correspond aux conditions initiales et aux conditions aux limites qui obéissent aux lois de diffusion. [4]

Ces profils de concentration peuvent être mesuré expérimentalement en utilisant un microsonde électronique pour effectuer des mesures de concentration progressivement le long de la longueur d'un échantillon, les profils de concentration expérimentales prises sur un couple de diffusion sont comparés à un modèle de simulation, comparons les profils de concentration simulées et expérimentales est une façon d'évaluer la précision d'un modèle de diffusion et la base de données de diffusion employées.

Les profils de concentration peuvent aussi être utilisés pour créer des bases de données de diffusion.

1.5.1 Flux de diffusion et la loi de Fick :

Deux lois fondamentales de la diffusion ont été formulées au 19ème siècle par Adolph Fick Ces lois peuvent être utilisées pour modéliser une variété de problèmes de diffusion dans les systèmes binaires. [4]

1.5.2 La diffusion et la température :

L'expression mathématique générale du coefficient de diffusion D est donnée par la relation suivante :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right) \quad (1)$$

D : Coefficient de diffusion

D_0 : Coefficient indépendant de la température

Q_d : Énergie d'activation [J/mol ou eV/atom]

T : Température absolue en [K]

R : Constante des gaz parfaits [8,314 J/mol.K]

Le coefficient de diffusion augmente si la température augmente, D 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 1100°C

D_a est un coefficient indépendant de la température

Q_a : est l'énergie d'activation est la quantité d'énergie nécessaire pour lancer un processus, on doit souvent faire face à une barrière énergétique (c'est-à-dire apporter un minimum d'énergie pour le démarrage) cette énergie nous renseigne aussi sur la facilité ou la difficulté d'une espèce (un solide) de se diffuser à l'intérieur d'un solide, si Q_a est grande cela veut dire que la diffusion se fait difficilement, si s'est le contraire c'est-à-dire Q_a à une valeur très petite la diffusion se fait facilement, pratiquement l'énergie d'activation d'un mécanisme substitutionnel est plus grande que celle d'un mécanisme interstitiel donc le mouvement des atomes entre les interstices est plus facile par rapport à un autre mécanisme.

$$Q_d(\text{sub}) > Q_d(\text{int})$$

1.6 Equations de diffusion

1.6.1 Première loi de Fick:

La première loi de Fick exprime le flux entant que :

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

L'équation montre que le flux des atomes résulte d'une variation de concentration C , avec la distance x (à savoir le gradient de concentration) D est le coefficient de diffusion ou dit encore la diffusivité de l'alliage.

Le coefficient de diffusion est un indicateur de la facilité avec laquelle une substance se diffuse au sein d'une autre par le phénomène de diffusion, il est désigné par la lettre majuscule D et a comme unité $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ L'unité de flux dépend des unités de concentration C ,

ce qui en unité (SI) est normalement apparaît sous la forme Kg / m^2 ou mol / m^2 bien que d'autres unités sont utilisées avec des unités de masse, le flux est donné par $\text{Kg} / \text{m}^2 / \text{S}$ et avec les unités de mole $\text{mol} / \text{m}^2 / \text{S}$ ou en fraction molaire.

Pour que le processus de diffusion se produise un gradient de concentration est nécessaire, ce processus est régi par les lois de Fick la première loi relie le flux de diffusion J (nombre

d'atome qui traversent une unité de surface par unité de temps) au gradient de concentration à l'aide d'un coefficient D appelé coefficient de diffusion.

La première loi de Fick traduit la tendance à l'étalement ; le flux d'atomes est proportionnel au gradient de concentration de ces atomes.

1.6.2 La diffusion en régime permanent :

Dans ce régime le profil de concentration est linéaire, il est en fonction de la distance seulement, il ne varie pas avec le temps au cours du processus de diffusion, comme illustre les deux figures suivantes :

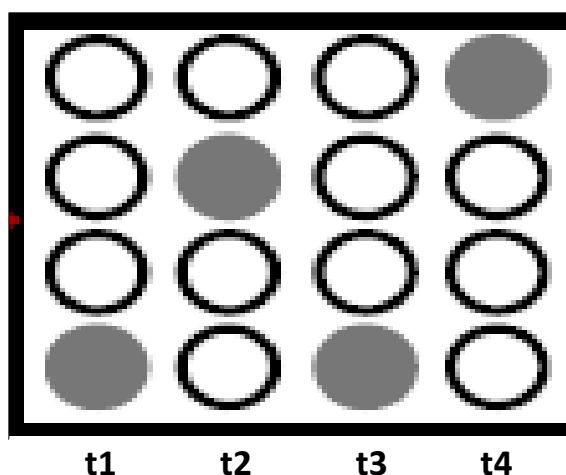
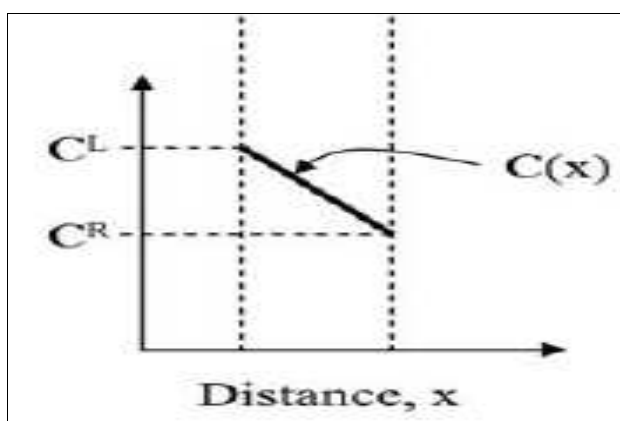


Figure 1.8 : profile linéaire du régime permanent

Figure 1.9 : indépendance de la concentration du temps

La concentration des atomes en noir à $t_1 = t_2 = t_3 = t_4$ est la même, un atome (en noir) à chaque laps de temps, le flux de la matière diffuse est indépendant du temps.

Si le profile de concentration est linéaire on peut écrire (voir Fig.1.8) :

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_L - C_R}{x_L - x_R} = \text{constante} \quad (3)$$

1.6.3 Deuxième loi de Fick:

Soit un cristal sous forme d'un cube parallélépipède étendu dans une seule direction (axe des x), l'espèce diffuse se déplace du côté gauche du parallélépipède vers le côté droit.

Nous définissons deux plans parallèles dans ce parallélépipède P_1 et P_2 , séparés par une distance élémentaire dx .

L'espèce diffuse va se déplacer dans cet espace, parmi les atomes de ce soluté il y a des atomes qui vont se loger dans les sites vacants de la matrice, d'autres vont se substituer avec les atomes de la structure mère, et d'autres vont se faufiler dans les sites interstitiels entre les atomes de la matrice.

Donc dans ce mouvement de la matière diffuse il va y avoir une accumulation de cette matière entre les deux plans P_1 et P_2 .

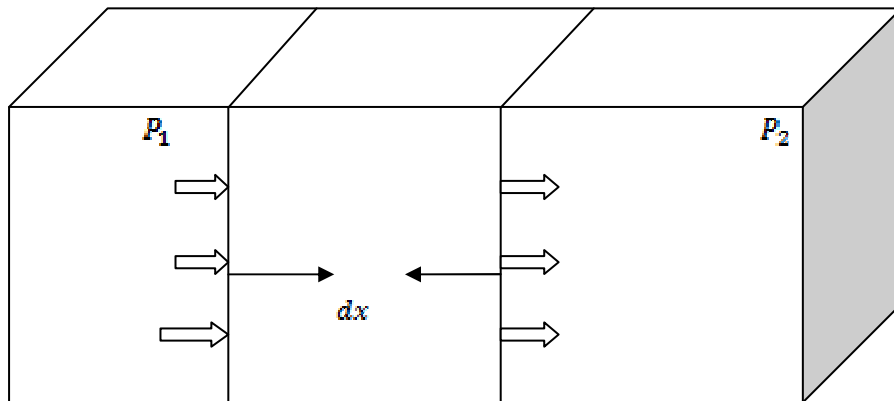


Figure 1.10 : diffusion linéaire descriptive

Le taux d'accumulation d'atome = le taux de changement de flux

Le taux d'accumulation de la matière diffuse entre ces deux plans P_1 et P_2 est défini comme la variation de concentration par rapport au temps par unité de volume élémentaire soit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} \times A \times dx \quad (4)$$

Où A : est la surface de chaque plan P_1 et P_2

et dx est la distance élémentaire de déplacement du soluté

Le taux de changement de flux est défini par le taux de transport du soluté par unité de surface soit :

$$A[J(x) - J(x + dx)] \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} \times A \times dx = A[J(x) - J(x + dx)]$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} \times dx = [J(x) - J(x + dx)]$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{[J(x) - J(x + dx)]}{dx}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \lim_{dx \rightarrow \infty} \frac{J(x + dx) - J(x)}{dx}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x} \quad (6)$$

En substituant l'expression du flux de la première loi de Fick on obtient

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Si le coefficient de diffusion est constant ($D = \text{constant}$)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

Cette dernière expression est appelée la deuxième loi de Fick

1.6.4 Equation de la fonction d'erreur :

La solution de la deuxième loi de Fick peut être écrite comme suit :

Où A et B sont des constantes qui peuvent être calculé a partir de deux concentration quelconque d'un profile de concentration, et Z une variable sans (dimension) définit par :

$$Z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (9)$$

Et $erf(Z)$ est la fonction erreur qui est défini par :

$$erf(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z \exp(-\eta^2) d\eta \quad (10)$$

L'intégrale de la fonction erreur n'a pas de solution algébrique simple, mais les tableaux obtenus par les méthodes numériques sont disponibles dans les manuels et sur internet.

Tableau des valeurs de la fonction d'erreur

z	$erf(z)$	z	$erf(z)$	z	$erf(z)$
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.9340
0.025	0.0282	0.60	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.6420	1.5	0.9661
0.10	0.1125	0.70	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.1680	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.20	0.2227	0.80	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.30	0.3286	0.90	0.7970	2.0	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.40	0.4284	1.0	0.8427	2.4	0.9993
0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.50	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999

Tableau1 : Valeur empirique de la fonction d'erreur où $Z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$

1.6.5. Exemple d'application :

Soit un alliage Fe-C ayant une concentration au cœur de 0.25% en poids et 1.20% à la surface après cémentation, quel temps de traitement faut-il pour avoir une épaisseur de 0.5mm a une concentration de 0.8% ?

On donne : D coefficient de diffusion du carbone dans le Fer $1,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

Cherchons la valeur de Z de la fonction d'erreur (voir relation 12) : $\frac{c(x,t) - c_0}{c_s - c_0} = 1 - erf(z)$

$C(x, t) = 0.8\%$; $C_0 = 0.25\%$; $C_s = 1.20\%$; $x = 0.5\text{mm}$

$$\frac{0.8-0.25}{1.2-0.25} = 1 - \operatorname{erf}(z) \rightarrow \operatorname{erf}(z) = 0.4211$$

Vérifiant si cette valeur existe sur le tableau1, si non il faut faire une interpolation linéaire entre les valeurs les plus proches de cette valeur.

Donc cette valeur n'existe pas , l'interpolation nous donne :

$$\frac{Z-0.35}{0.40-0.35} = \frac{0.4211-0.3794}{0.4284-0.3794} \rightarrow Z = 0.3926 \text{ avec } Z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \rightarrow t = \frac{x^2}{4z^2D}$$

Après application numérique le temps de maintien est : $t = 7.04$ heures

1.6.6 Modèle mathématique :

L'équation différentielle (7) est appelée la deuxième loi de Fick, le phénomène de diffusion est gouverné par cette équation différentielle. [5]

La deuxième loi de Fick admet une solution analytique si D (le coefficient de Diffusivité) ne varie pas avec le temps, il est en fonction de la température $D=D(T)$.le modèle mathématique est :

$$C(x, t) = A \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) + B \quad (11)$$

Où A, B sont des constantes à définir des conditions aux limites et aux conditions Initiales, cette équation est appelée modèle mathématique, ce modèle sera introduit dans un code de calcul dans le but de la simulation numérique.

Le profil de concentration répond aux conditions aux limites et aux conditions initiales suivantes :

$$\left. \begin{aligned} C(0, t) &= C_s \\ C(\infty, t) &= C_0 \end{aligned} \right\} \text{Conditions aux limites}$$

$$C(x, 0) = 0 \text{ } \left. \right\} \text{condition initiale}$$

Le schéma suivant illustre ces conditions :

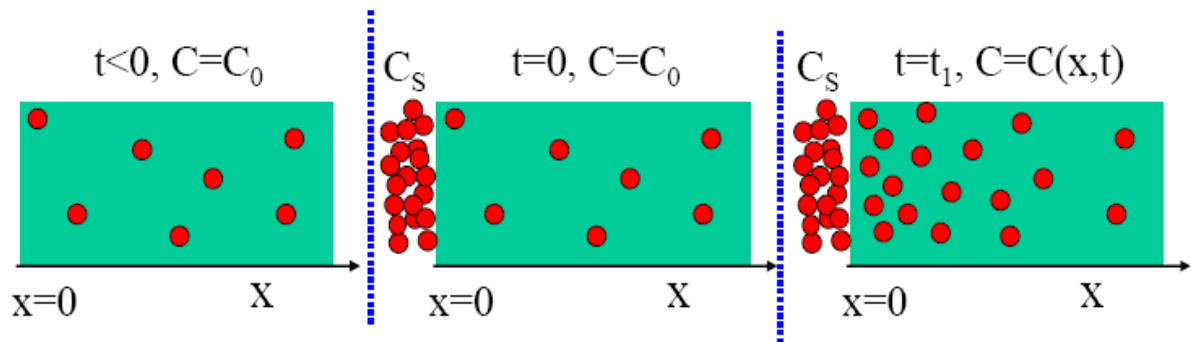


Figure 1.11 : conditions aux limites et conduction initiales

La résolution de l'équation différentielle de Fick qui soumise à ces conditions donne:

$$\frac{c(x,t) - c_0}{c_s - c_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (12)$$

Le profil de concentration vari selon le temps de maintien, chaque temps de maintien a une allure, la figure suivante illustre trois courbes de concentration.

L'épaisseur de la couche diffuse correspond au temps de maintien quand le temps est important l'épaisseur le sera aussi.

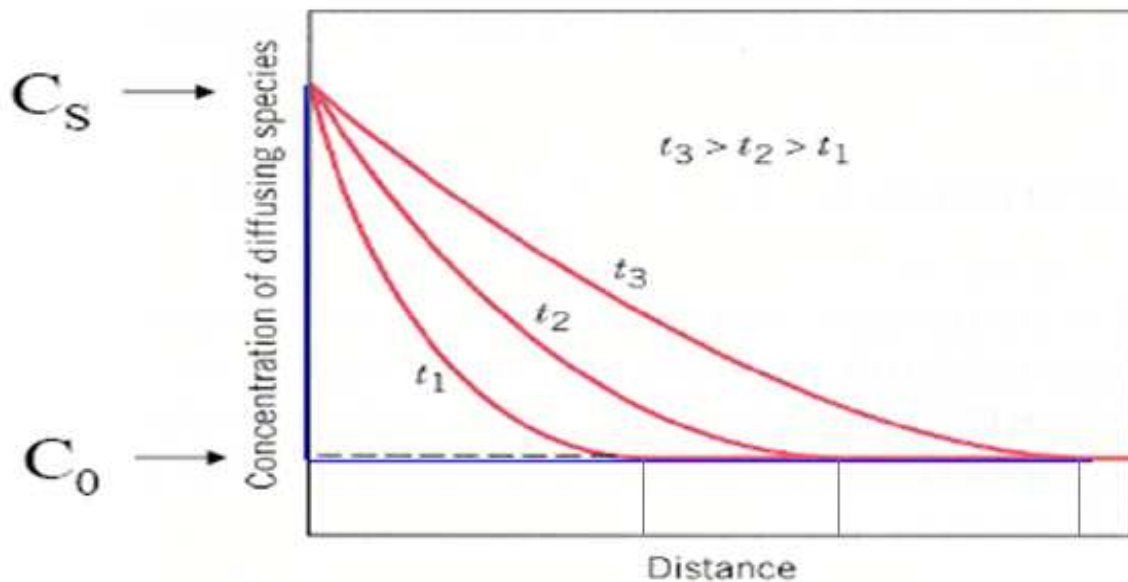


Figure 1.12 : Profils de concentration

1.6.7 Gain de masse : [5]

$$C(x, t) = A \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) + B \quad (13)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = A \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

On pose $u = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \rightarrow \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{2\sqrt{Dt}}$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = A \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) = A \frac{\partial}{\partial u} \operatorname{erf}(u) \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-\eta^2) d\eta$$

$$\rightarrow \frac{d}{du} \operatorname{erf}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2}$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = A \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} \frac{1}{2\sqrt{Dt}} = A \frac{2}{\sqrt{\pi D}} e^{-u^2} \frac{1}{\sqrt{t}}$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = A \frac{2}{\sqrt{\pi D}} \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (14)$$

Le gain de masse peut être exprimé par :

$$G(t, T) = \rho \int_0^t \left[-D \frac{\partial C}{\partial x} \right]_{x=0} dt \quad (15)$$

Avec $A = C_0 - C_s$ d'après les conditions aux limites et les conditions initiales.

Remplaçant l'expression(14) dans (15), on obtient

$$G(t, T) = 2\rho(C_s - C_0) \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (16)$$

$$[G] = g / cm^2$$

CHAPITRE 2 LA BORURATION :

2.1 Généralité :

La boruration est un traitement thermochimique dont le but, semblable à ceux de la cémentation et de la nitruration, est de procurer aux pièces métalliques des duretés superficielles très élevées. [6]

C'est une saturation de la couche superficielle de l'acier en bore par diffusion de ce dernier en milieu pulvérulent (qui est à l'état de poudre) et à une température supérieure à AC_3 , le bore permet d'obtenir des borures, de type FeB et Fe_2B , qui assurent une dureté très élevée (1800 à 2000 HV) ,une bonne tenue à l'usure et à la corrosion.

La boruration est effectuée dans des bains de chlorures fondus ($NaCl, P\alpha Cl_2$) auxquels on ajoute du Ferro-bore (20%) ou du carbone de bore (10%) pulvérulent.

La boruration peut être aussi effectuée par électrolyse des sels fondus contenant du bore, le bain de bore $Na_2B_2O_7$ fondu, sert de cathode, dans ce dernier on place les pièces .la température de saturation est de 930 à 950°C et la durée de séjour est de 2 à 6 heures.

La boruration est appliquée aux pièces employées dans l'industrie pétrolière, bagues de pompe de boue, les matrices et les estampes pour le formage à chaud .la boruration est un procédé que peuvent subir tous les aciers, car elle confère aux pièces une grande résistance à l'abrasion et à l'usure.

La boruration est un procédé de diffusion thermochimique .la surface d'une pièce est enrichie en bore à des températures de traitement entre 800 et 1000°C. En conséquence directe se forment des couches homogènes des borures. La dureté élevée, mais également la structure particulière de la couche, produisent une très grande résistance à l'usure.

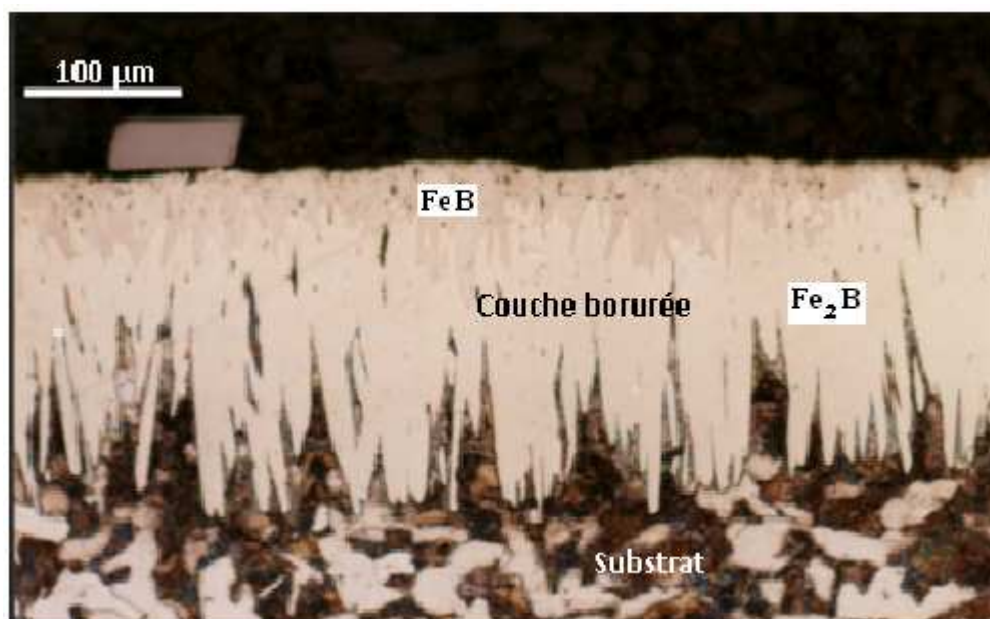


Figure 2.1 : Forme typique des couches borurées obtenues sur les aciers.

2.2 Les propriétés mécaniques et épaisseur des couches de borure :

Les duretés obtenues par la boruration sont très élevées de l'ordre de 2000 Vickers, et ceci sur tous les aciers, qu'ils soient alliés ou non d'où le grand intérêt de la boruration. Une remarque est cependant à faire au sujet des aciers très alliés. Sur ceux-ci, la couche borurée peut manifester une certaine fragilité avec risque d'écaillage sous l'effet de chocs ou lors de la trempe. Cette fragilité provient d'une modification dans le développement en profondeur de la zone borurée. [7]

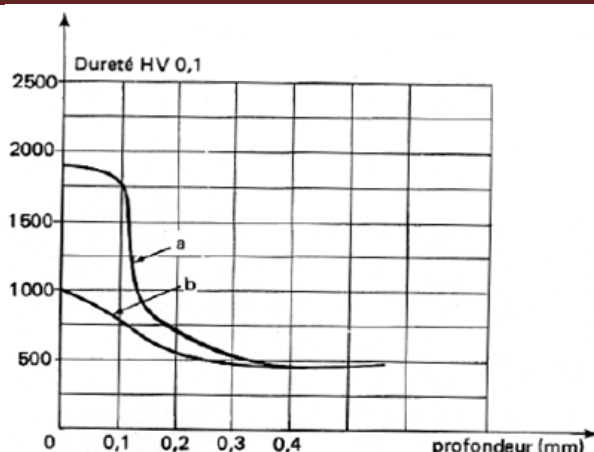


Fig. 2.2 Allure des courbes de dureté en fonction de la profondeur de pénétration sur acier traité, **a** : après boruration **b** : après cémentation

La figure 2.2 nous montre clairement les valeurs élevées de la dureté de boruration par rapport à la cémentation

2.2.1 Caractéristiques mécaniques des couches borurées :

❖ Valeurs de dureté élevées :

- Alliages ferreux : 1600 à 2100 HV
- Alliages à base de nickel : 2800 HV
- Titane jusqu'à : 4000 HV

❖ Adhérence optimale.

❖ Coefficients de dilatation comparables pour tous les alliages ferreux.

❖ Bonne résistance à la température.

2.2.2 Épaisseur des couches borurées :

L'épaisseur de la zone durcie est essentiellement fonction de la durée du traitement et de la température à laquelle ce traitement est effectué. Accroître l'un ou l'autre de ces facteurs augmente l'épaisseur de zone durcie ; cependant, une épaisseur trop importante

fragilise la zone durcie et une température de traitement dépassant 1050°C provoque le frittage du ciment.

Aussi selon les aciers traités, les nécessités de traitement thermique ultérieur, les conditions d'utilisation des pièces mécaniques réalisées, les épaisseurs recherchées sont pratiquement comprises entre 20 et 100 microns. Exceptionnellement des épaisseurs supérieures à 100 microns peuvent être utilisées lorsque les pièces sont exposées à des phénomènes d'abrasion mais sans aucun choc mécanique.

L'épaisseur de la couche peut être réglée pendant la durée du traitement .elle varie de 5 à 10 μm pour des pièces de construction, où il faut diminuer la tendance à la soudure à froid, jusqu'à des valeurs de 300 μm pour des pièces, où une diminution de l'usure est demandée. Le choix du matériau en dépendra. généralement, l'épaisseur de la couche atteignable diminue si le taux d'alliage augmente.

2.3 Les procédés de boruration:

Différents procédés permettent la diffusion du bore dans les métaux. Signalons les procédés de boruration les plus connus:

- Boruration en milieu gazeux :

Les gaz apportant le bore sont des halogénures de bore (le diborane et le triméthyl) ;

- Boruration en milieu liquide
 1. Soit en présence de sels fondus avec électrolyse, le bain étant constitué de borax,
 2. Soit en présence de sels fondus sans électrolyse (boruration thermochimique), les sels étant alors constitués de mélanges de chlorures ou de chlorures et de fluorures additionnés de carbure de bore,
 3. Soit en solution aqueuse de borax.

Ces procédés ne permettent cependant pas encore des traitements industriels ; aussi nous attacherons-nous à décrire essentiellement la boruration en milieu solide par le carbure de bore, seule méthode industrielle actuellement utilisée.

- Boruration en milieu solide : la boruration en milieu solide par les carbures de bore, est la seule méthode industrielle actuellement. Nous attacherons-nous à décrire l'essentielle de cette méthode.

2.4 La mise en œuvre (boruration en milieu solide) :

Une mise en œuvre semblable à la cémentation en caisse, ce traitement de boruration ne nécessite pas l'utilisation de fours particuliers ; la seule condition demandée étant une bonne régulation de température et une répartition bien homogène de celle-ci. Il est à noter également qu'une atmosphère inerte n'est pas indispensable à la bonne exécution du traitement. Toutefois, elle réduit l'oxydation extérieure des caisses de boruration.

Le ciment est constitué par de la poudre ou des granules à base de carbure de bore auxquels est mélangé un fluoroborate jouant le rôle d'activateur. La boruration s'effectue à une température de l'ordre de 900°C. La température et le temps de maintien à cette température sont déterminés en fonction de l'épaisseur de la zone borurée souhaitée. Lors du chargement des caisses, il y a lieu d'observer les précautions d'usage afin d'éviter les déformations des pièces en cours de traitement. Les espaces entre chaque pièce seront soigneusement garnis de ciment et les pièces longues seront traitées debout.

Comme pour tous les traitements thermo-chimiques, des épargnes peuvent être réalisées en entourant les parties de pièce à protéger soit avec des granules de carbure de silicium, soit plus simplement en employant un cache métallique.

Les vitesses de montée en température et le refroidissement n'ont aucune influence sur le traitement mais peuvent en avoir sur la déformation des pièces.

2.5 Traitements thermiques de boruration:

La boruration s'effectuant à une température de l'ordre de 900°C, il est inutile de réaliser un traitement thermique avant l'opération de boruration. Celui-ci serait détruit lors de la montée en température. Le traitement thermique, s'il est nécessaire, doit être effectué après boruration. Le chauffage devra être fait en bains de sels ou en atmosphère neutre et la trempe, à l'huile la trempe à l'eau étant à proscrire. Eviter la boruration d'aciers dont la température d'austénitisation est supérieure à 1100°C la couche borurée risquant d'être détériorée par la fusion locale du fait de la formation d'un eutectique.[5]

2.5.1 La finition :

La boruration provoque une augmentation du volume, qui correspond à environ 25 à 30% de l'épaisseur de la couche.

C'est pourquoi, lors du traitement de pièces terminées, il faut les avoir construites légèrement plus petites. La profondeur de rugosité obtenue est d'environ 4 μm . La boruration conférant des duretés très élevées, il faut éviter, dans la mesure du possible, toute opération de rectification après traitement. Aussi, les pièces à borurer devront être entièrement terminées avant traitement.

Après boruration, un hônege ou polissage au diamant ou au métal dur est possible. Pour éviter un écaillage, les angles et arêtes doivent avoir un rayon qui soit au moins égal à l'épaisseur de la couche afin de réduire les variations dimensionnelles et les déformations des pièces fortement sollicitées, nous vous conseillons vivement d'effectuer un recuit de détente avant la finition.

En raison de la bonne tenue en température des couches de borure, les pièces de construction peuvent être trempées ou subir une trempe-revenu après la boruration. Ce qui permet d'obtenir des pièces avec d'une part une bonne résistance et d'autre part une bonne rigidité. Les aciers de cémentation peuvent être enrichi en carbone pour améliorer l'adhésion de la couche de borure, puis borurée et enfin trempés. En plus de la résistance élevée de la surface, le comportement ductile à cœur est préservé.

2.6 Caractérisation de la couche borurée dans un acier XC38

La formation de borure de fer FeB et Fe_2B se produit à travers la diffusion de bore dans l'acier doux (XC38 dans notre expérience)

La couche FeB est vers l'extérieur avec un réseau cristallin (orthorhombique) et une concentration de 16,23 wt% de bore. La deuxième couche Fe_2B , qui est vers l'intérieur avec un réseau cristallin (tétraгонаl) et avec une concentration de 8,83wt% de bore.

L'épaisseur de la couche borurée est déterminée à travers le processus de température et la durée de traitement ainsi que la composition chimique de l'acier et la concentration de bore dans le bain de boruration.

La configuration des deux couches FeB et Fe_2B , n'est pas privilégiée dans les applications industrielles en raison de la haute intensité de contrainte situés à l'interface FeB / Fe_2B , en fait, la couche Fe_2B , est souhaitable a cause de son coefficient de dilatation thermique qui correspond a celui du substrat et permet au développement de contrainte de compression au niveau du surface du substrat.

La formation des deux couches FeB et Fe_2B , peut être contrôlée par l'abaissement du potentiel de boruration du milieu. La formation de fissures est souvent observée à l'interface FeB / Fe_2B des deux couches a cause de la différence du coefficient de dilatation thermique. Ces fissures conduisent souvent à l'écaillage et l'effritement lorsqu'une charge mécanique est appliquée.

En contrôlant les paramètres du procédé de traitement du bore, en particulier en limitant le potentiel de bore du support de boruration, la phase Fe_2B , peut être systématiquement réalisée au cours du processus de boruration.

En réalité, l'effet de la phase FeB , peut être atténuée, la phase FeB , peut se transformer en phase Fe_2B , à travers un traitement thermique à des températures élevées (950-1100°C) par conséquent en prolongeant la durée de boruration, on peut d'abord transformée la phase FeB , en phase Fe_2B . dans ce traitement, il est essentiel de veiller à ce que le bore dans le mélange de boruration est épuisé alors qu'il existe un potentiel de bore insuffisant pour la formation de la phase FeB . [8]

2.7 Données expérimentales

Les données expérimentales qui ont servi comme support de validation de ce travail ont été réalisées au niveau du laboratoire des génies des procédés à l'université d'Ammar Telidji de Laghouat ces résultats sont recueillis dans le tableau suivant (voir tableau 1).

L'acier utilisé dans ces expériences est toujours l'acier doux XC38 dans trois bains différents de Borax B_4C - Al- SiC avec des températures allons de 800 jusqu'à 1050°C avec un pas de 50°C chaque température à trois temps de maintien 2 – 4 et 6 heures après chaque temps de maintien on relève dix mesures d'épaisseurs, ces épaisseurs vont nous servir comme des cibles (Targets) ou bien (les outputs) pendant l'implémentation de notre réseau de neurones les données d'entrées ou (les inputs) seront les températures de traitements et les temps de maintien. Toutes ces valeurs seront introduites sous forme matricielle, d'où l'ensemble des données doivent comporter le même nombre de colonne.

2.7.1 Mesure de l'épaisseur des couches borurées :

La méthode proposée par Kunst, consiste à mesurer sur un microscope optique ou à balayage 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 une valeur moyenne de l'épaisseur de la couche borurée à cet endroit (Figure 2.3). L'opération est effectuée dans trois endroits différents, et la valeur moyenne des trois mesures est considérée comme épaisseur de la couche borurée de l'échantillon. [9]

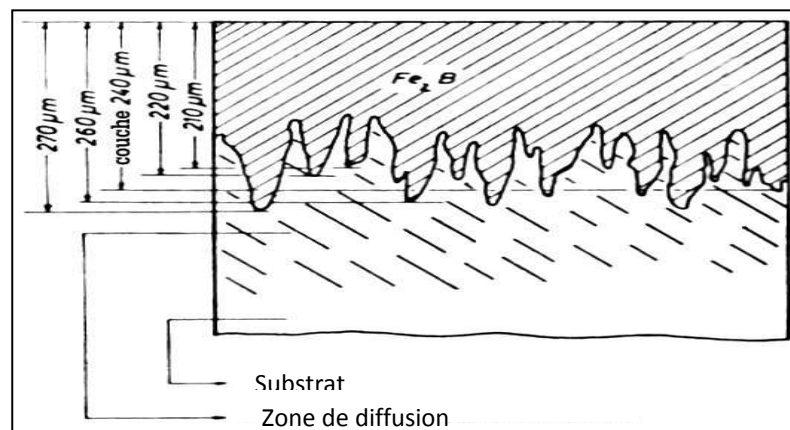


Figure 2.3 : La méthode de mesure de l'épaisseur de la couche borurée.

2.7.2 Résultats expérimentaux :

Le tableau ci-après représente tout le travail expérimental réalisé au niveau du laboratoire des génies des procédés à l'université de Laghouat, ces résultats vont nous servir comme support de validation pour tous les travaux de simulation.

Le tableau comporte trois colonnes chaque colonne désigne un bain différent ;

- La première colonne comporte le borax-B4C
- La deuxième colonne comporte le borax-Al
- Et enfin la troisième colonne le borax-SiC

Borax-B ₄ C : 800							Borax-Al : 850							Borax-SiC : 900						
2	22	23	21	16	20	25	2	22	23	18	15	20	25	2	5	7	8	10	8	15
	26	28	29	35	30			29	28	31	34	30			25	22	27	18	20	
4	36	42	45	48	37	50	4	37	47	44	48	39	55	4	20	18	22	25	30	35
	68	57	55	59	53			76	60	72	62	65			50	45	42	46	52	
6	70	62	57	69	71	75	6	68	55	52	72	62	80	6	30	35	38	42	40	50
	87	85	81	89	79			96	92	98	105	100			70	65	62	60	58	
Borax-B ₄ C : 850							Borax-Al : 900							Borax-SiC : 950						
2	32	36	34	42	31	45	2	28	36	34	40	33	45	2	18	21	22	20	23	30
	55	52	60	51	57			62	55	52	53	57			40	42	39	38	37	
4	60	52	56	63	52	70	4	70	65	60	66	62	85	4	55	50	54	48	55	65
	88	85	92	77	75			110	105	97	100	115			85	75	80	70	78	
6	80	78	85	75	91	95	6	90	84	92	95	88	110	6	80	75	82	85	78	100
	113	125	105	100	98			130	136	128	125	132			125	120	122	115	118	
Borax-B ₄ C : 900							Borax-Al : 950							Borax-SiC : 1000						
2	65	48	55	62	53	70	2	55	45	54	52	50	65	2	33	30	32	30	28	45
	90	86	87	78	76			88	80	81	75	70			60	65	62	58	52	
4	96	102	85	100	99	110	4	97	102	88	100	95	120	4	80	78	82	75	85	105
	129	137	125	110	117			140	144	134	148	152			136	134	132	120	128	
6	126	135	105	100	132	145	6	137	135	120	130	140	170	6	118	125	120	125	124	160
	185	175	155	172	165			208	205	215	195	215			198	200	205	195	190	
Borax-B ₄ C : 950							Borax-Al : 1000							Borax-SiC : 1050						
2	90	82	78	95	92	105	2	88	82	90	76	92	100	2	58	62	60	56	57	80
	130	110	120	125	128			120	125	115	112	100			112	110	95	100	90	
4	120	142	135	118	145	170	4	135	140	148	130	150	180	4	112	120	128	135	125	160
	210	200	205	212	213			222	215	205	225	230			205	200	188	202	185	
6	168	155	150	175	172	200	6	187	178	165	195	190	245	6	175	172	180	185	192	245
	220	225	248	242	245			290	300	315	305	325			292	302	312	310	330	

Tableau 1 : Valeurs expérimentales des épaisseurs de la couche de borure

CHAPITRE 3 INTRODUCTION AUX RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

3.1 Généralités

Les réseaux de neurones artificiels ou formels sont des modèles inspirés par de petites unités de traitement que l'on trouve dans le cerveau humain. Ces unités sont des cellules cérébrales appelées neurones. Ces réseaux sont, à l'origine, une tentative de modélisation mathématique du cerveau humain. Ils sont considérés comme un système d'intelligence artificielle fondé sur le fonctionnement des neurones du système nerveux; leur but est de simuler la façon dont un cerveau traite l'information, apprend et retient. [10]

Les premiers travaux datent de 1943 et sont l'œuvre de MM. *Mac Culloch et Pitts*. Ils présentent un modèle assez simple pour les neurones et explorent les possibilités de ce modèle.

Nous allons commencer cette section par la définition d'un neurone biologique et d'un neurone formel. Par la suite nous exposerons le fonctionnement des neurones formels et des réseaux de neurones artificiels

3.2. Le neurone biologique :

La neurologie dit que le cerveau humain est formé d'un nombre incalculable de cellules spécialisées appelées neurones. Il y a différents types de neurones, mais tous peuvent être ramenés à l'exemple de la figure 3.1 et la description qui suit:

Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former ce que l'on nomme les dendrites.

Le corps principal de la cellule reçoit des signaux des autres neurones à travers les dendrites. Le neurone accumule les signaux et quand il atteint un certain seuil, il se déclenche en

déchargeant un signal le long d'une connexion appelée axone vers d'autres cellules à travers des jonctions appelées synapses. Ces synapses sont à leurs tours reliés aux dendrites d'autres cellules. Une synapse, est ainsi, considérée comme la jonction entre deux neurones.

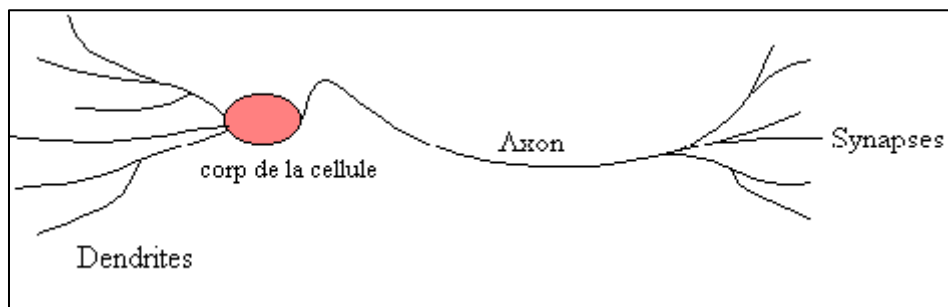


Figure 3.1 : schéma simplifié d'un neurone biologique.

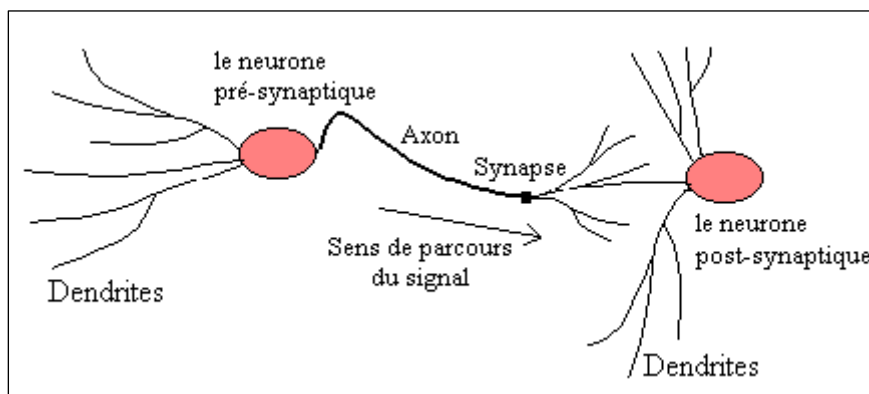


Figure 3.2 : le neurone pré-synaptique et le neurone post-synaptique.

Dans le cerveau humain, les neurones sont connectés en un réseau très complexe avec d'innombrables interconnexions.

Schématiquement, les dendrites représentent les entrées du neurone et son axone sa sortie.

Lorsqu'il y a échange d'information entre deux neurones, il y a un neurone qui émet un signal et un autre qui reçoit ce signal. Le neurone émetteur est appelé neurone pré-synaptique, et le neurone récepteur est appelé neurone post-synaptique.

3.3. Le neurone formel (artificiel) :

Le neurone formel est une représentation formelle ou une modélisation d'un neurone biologique. On peut définir un neurone artificiel comme un processeur élémentaire qui reçoit un nombre variable d'entrées en provenance d'autres neurones. A chacune de ces entrées est associé un poids w qui représente la force de la connexion.

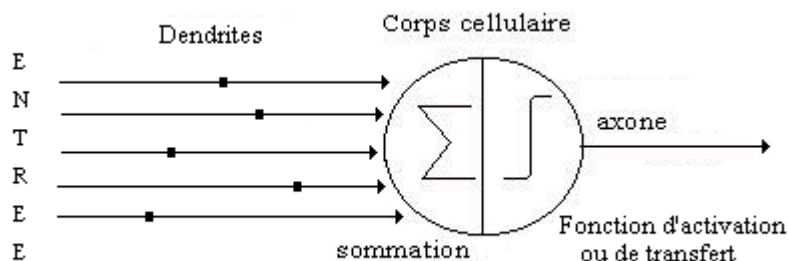


Figure 3.3: Modélisation d'un neurone artificiel.

On peut aussi définir, mathématiquement, un neurone formel comme une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées entrées du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa sortie.

Un neurone est, dans ce cas, considéré comme un opérateur mathématique, dont on peut calculer la valeur numérique. Il est souvent représenté graphiquement comme l'illustre la figure 3.4.

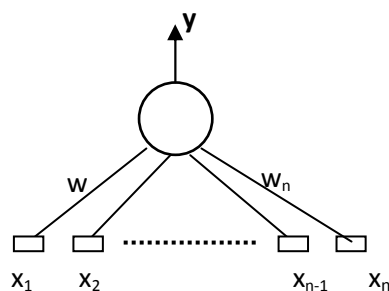


Figure 3.4 : Représentation graphique d'un neurone formel.

$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n; w_1, w_2, \dots, w_n)$ est une fonction linéaire ou non linéaire, bornée. Les x_i sont les variables d'entrée et les w_i sont les poids.

En théorie, chaque processeur élémentaire est doté d'une seule sortie. Mais en pratique, lorsqu'on a besoin de relier plusieurs neurones entre eux, l'axone n'est pas représenté dans les réseaux artificiels. Ainsi, un neurone artificiel peut-être connecté directement à plusieurs autres neurones.

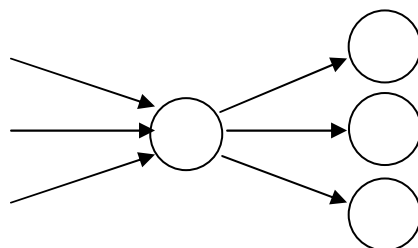


Figure 3.5: Modélisation de liaison entre plusieurs neurones artificiels

Le modèle biologique fait intervenir une notion temporelle qui est difficile à intégrer dans un modèle simple. Cette notion est, alors, remplacée par une simple sommation des signaux arrivant au neurone (les entrées du neurone). Cette sommation est passée à une fonction d'activation ou de transfert qui est utilisée pour déterminer la sortie du neurone.

Au vu de cette définition d'un neurone formel, on peut concevoir un réseau de neurone artificiel comme un système interconnecté d'éléments de traitement, chacun possédant un nombre limité d'entrées et une sortie. Ces éléments simples de traitement communiquent entre eux en s'envoyant des signaux à travers un très grand nombre de connexions pondérées par des poids. Ces derniers sont capables "d'apprendre" à partir d'entrées calibrées susceptibles de produire, avec des ajustements, du temps et des répétitions, des sorties appropriées. Les réseaux de neurone sont utilisés dans des domaines tels que la reconnaissance de formes, la corrélation d'événements.

L'idée principale des réseaux de neurones "modernes" est la suivante :

On se donne un *neurone formel*, appelé aussi *perceptron*, qui est capable de réaliser quelques calculs élémentaires. On relie ensuite entre eux un nombre important de ces neurones et on

essaye de déterminer la puissance de calcul du *réseau* ainsi obtenu. Il est important de noter que ces neurones manipulent des données *numériques* et non pas symboliques.

Deux visions s'affrontent donc, d'un côté les tenants de la modélisation biologique qui veulent respecter un certain nombre de contraintes liées à la nature du cerveau, de l'autre les tenants de la puissance de calcul qui s'intéressent au modèle en lui-même, sans aucun lien avec la réalité biologique. Chaque réseau doit passer par une phase d'apprentissage pour lui donner une expérience qui lui sera utile lors de son exécution.

3.4. Fonctionnement d'un réseau de neurones artificiels :

Nous avons vu dans la section précédente, qu'un réseau de neurones artificiels est un ensemble de neurones qui sont interconnectés. Le comportement d'un réseau est donc défini par le comportement collectif des neurones qui le composent. Avant d'aborder ce comportement collectif, nous allons exposer le comportement d'un seul neurone.

Un neurone formel utilise des entrées qui sont des grandeurs réelles x_i pour produire une sortie y , à l'aide d'une fonction de transfert. On peut distinguer dans ce processus deux phases:

- 1- On calcule la somme pondérée des entrées selon l'expression $a = \sum w_i x_i$
- 2- On utilise une fonction de transfert pour calculer la valeur de l'état du neurone qui sera transmise aux neurones en aval.

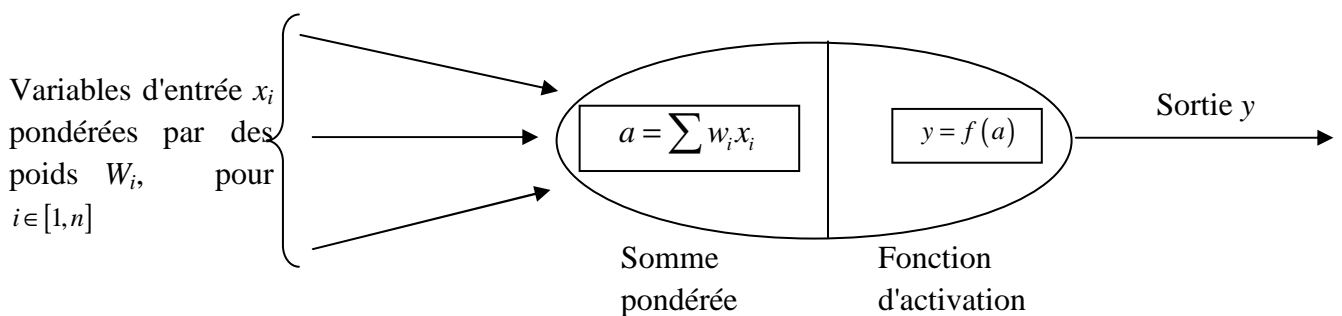


Figure 3.5: Représentation du fonctionnement d'un neurone artificiel

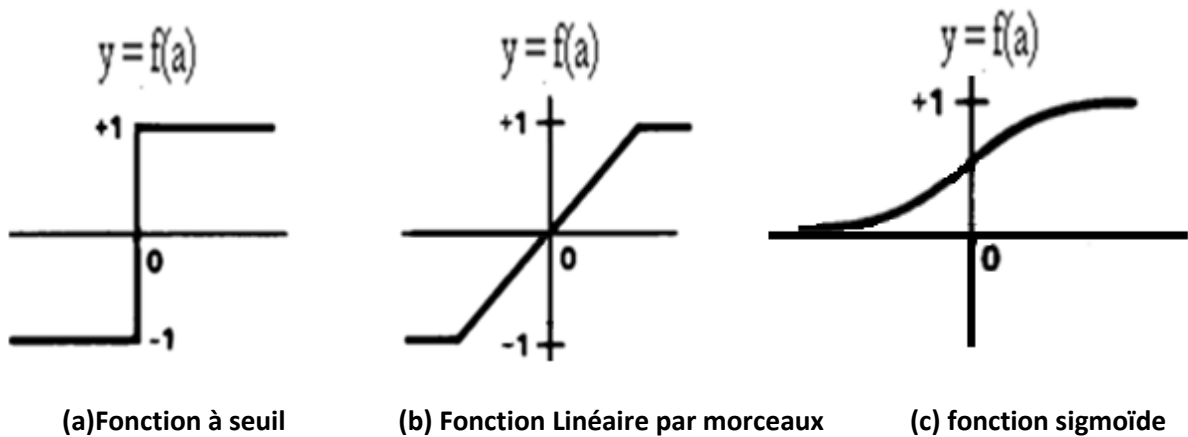


Figure 3.6: Différent type de fonctions de transfert pour un neurone artificiel.

Il existe plusieurs formes possibles pour la fonction de transfert. Parmi les fonctions les plus couramment utilisées on peut citer:

- la fonction à seuil est illustrée par le cas (a) de la figure 3.6. Dans ce cas la sortie y du neurone est définie par:

$$y = f(a) = \begin{cases} +1 & \text{si } a > S \\ -1 & \text{si } a \leq S \end{cases}$$

- la fonction linéaire par morceau est illustrée par le cas (b) de la figure 3.6. Dans ce cas la sortie y du neurone est définie par:

$$y = f(a) = \begin{cases} +1 & \text{si } a > S_2 \\ k \cdot a & \text{si } a \in [S_1, S_2] \\ -1 & \text{si } a \leq S_1 \end{cases}$$

- la fonction sigmoïde est illustrée par le cas (c) de la figure 3.6. Dans ce cas la sortie y du neurone est définie par:

$$y = f(a) = \frac{1}{1 + e^{-(a\lambda)}}$$

Si on "relie" un neurone au monde extérieur par l'intermédiaire de capteurs, il peut réaliser une simple analyse de ce qu'il "perçoit". Si on représente les valeurs observées par le neurone sous forme d'un vecteur, le neurone réalise alors un découpage de son espace d'entrée (l'espace vectoriel auquel appartient le vecteur d'observation) en deux zones :

- la zone *d'activité* dont les vecteurs donnent une sortie égale à 1 que l'on peut définir par:

$$Z_{\text{activité}} = \{(x_1, \dots, x_n) \in R^n / y = f(x_1, \dots, x_n) = 1\}$$

- et la zone *d'inactivité* dont les vecteurs donnent une sortie égale à -1 que l'on peut définir

par: $Z_{\text{inactivité}} = \{(x_1, \dots, x_n) \in R^n / y = f(x_1, \dots, x_n) = -1\}$

Un neurone formel ne réalise donc rien d'autre qu'une somme pondérée suivie d'une transformation qui peut être linéaire ou non-linéarité. Ce qui fait la force d'un réseau de neurones artificiels, c'est l'association de très grand nombre de neurones pour réaliser des fonctions plus compliquées et qui peuvent être utiles pour des applications diverses.

Un perceptron est une autre appellation pour un neurone simulé dans un programme informatique. Les neurones artificiels peuvent être organisés en réseau de plusieurs manières. On peut avoir un réseau à une seule couche (perceptrons en couche unique) ou un réseau à couches multiple (perceptrons en multicouche)

3.4.1. Le réseau à couche unique:

Un réseau de neurones à perceptrons en couche unique est formé de neurones artificiels qui ne sont pas interconnectés mais qui reçoivent tous le même vecteur d'entrées pondérées par des poids différents et qui produisent chacun une sortie unique.

Ainsi dans un tel réseau, si m représente le nombre de neurones et n le nombre d'entrées, on a:

- les entrées qui sont notées x_1, x_2, \dots, x_n

- les poids qui sont notés $w_{11}, \dots, w_{1n}, w_{21}, \dots, w_{2n}, \dots, w_{m1}, w_{mn}$

- les sorties qui sont notées y_1, y_2, \dots, y_m

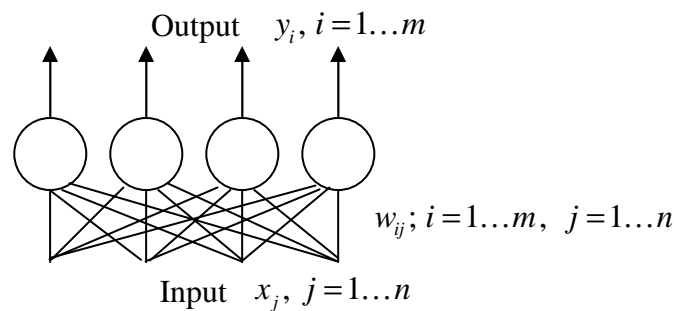


Figure 3.7: Représentation d'un réseau à perceptrons en couche unique

3.4.2 Les réseaux multicouches :

Le réseau à perceptrons en multicouches (noté *MLP* pour **M**ulti **L**ayer **P**erceptrons en anglais) découle de l'idée qui consiste à grouper des neurones dans plusieurs couche. On place ensuite bout à bout ces couches et on connecte complètement les neurones de deux couches adjacentes ainsi qu'il est illustré dans la figure 3.8. Les entrées des neurones de la chaque couche sont donc en fait les sorties des neurones de la couche adjacente. Les neurones de la première couche sont reliés au monde extérieur et reçoivent tous le même vecteur d'entrée (c'est en fait l'entrée du réseau). Ils calculent alors leur sorties qui sont transmises aux neurones de la deuxième couche, etc. Les sorties des neurones de la dernière couche forment la sortie du réseau.

Généralement, un réseau est constitué de trois couches (il est rare où on aura besoin de plus), appelées couche d'entrée (input layer), couche cachée (hidden layer) et couche de sortie (output layer). L'entrée à tout le réseau est présenté à la couche d'entrée, puis il est transmit aux couches supérieures. La couche de sortie nous fournit le résultat du réseau.

Au terme de ces définitions on peut remarquer que lorsqu'une connexion existe entre deux neurones, elle possède un poids. Ce poids indique si la liaison est forte ou faible. D'autre part il faut remarquer que l'information qui est contenue dans le réseau, est représentée par les différents poids des connections entre les nœuds.

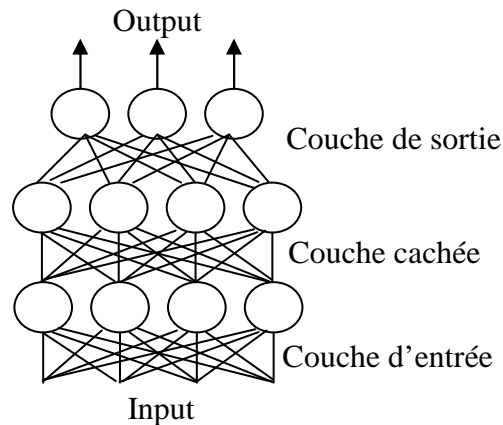


Figure 3.8: Représentation d'un réseau multicouche.

3.5 Utilisation des réseaux de neurones artificiels :

Lorsqu'on développe un réseau de neurones artificiels on passe par deux étapes. La première étape, qui est une phase d'apprentissage, consiste à entraîner le réseau cette phase permet de déterminer les différents poids w_{ij} . La deuxième étape, qui est la phase d'exploitation, consiste à utiliser le réseau pour calculer ou prédire une valeur résultat.

3.5.1 Phase d'apprentissage :

L'apprentissage est une phase de développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Comme dans toute phase d'apprentissage, on fait appel à des exemples de comportement. L'apprentissage consiste à faire coïncider les sorties effectives du réseau avec des sorties désirées.

Dans le cas des réseaux de neurones artificiels, en plus de la description du modèle, on spécifie souvent le type d'algorithme d'apprentissage. Dans la majorité des algorithmes actuels:

- Les variables modifiées pendant l'apprentissage sont les poids des connexions.

- L'apprentissage s'effectue à travers la modification des poids du réseau dans l'optique d'accorder la réponse du réseau aux exemples de base et à l'expérience.
- Il est souvent impossible de décider à priori des valeurs des poids des connexions d'un réseau par une application donnée.

Au niveau des algorithmes d'apprentissage, on peut distinguer deux grandes classes

- L'apprentissage supervisé : Dans ce cas les exemples d'apprentissage se présentent sous forme de couples de valeurs formés d'une entrée et d'une sortie associée. Ceci veut dire qu'à chaque fois qu'on présente au réseau une entrée on lui donne le signal de sortie associé à cette entrée.
- L'apprentissage non supervisé : Dans ce cas, on ne dispose que de valeurs d'entrée. Ceci veut dire qu'on fournit au réseau une entrée de base sans lui donner la sortie qui correspond à cette entrée (généralement on ne connaît pas cette sortie). Le réseau décide de lui même sur la manière à organiser les entrées en des classes qui correspondent chacune à un espace de sortie. Cela suppose bien sur que les exemples ayant les mêmes caractéristiques provoquent la même sortie.

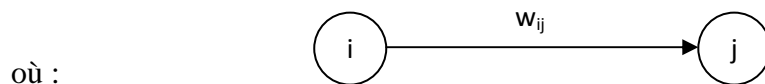
La plupart des réseaux de neurones sont entraînés en utilisant une méthode d'apprentissage supervisée.

Dans la phase d'apprentissage on est emmené à choisir une règle d'apprentissage. Il existe actuellement une multitude de règles, on cite parmi celle ci:

- **Règle de correction d'erreurs** : Cette règle s'inscrit dans le paradigme d'apprentissage supervisé, c'est -à-dire dans le cas où l'on fournit au réseau une entrée et la sortie correspondante. Si y est la sortie calculée par le réseau, et d la sortie désirée, le principe de cette règle est d'utiliser l'erreur $(d - y)$, afin de modifier les connexions et de diminuer ainsi l'erreur globale du système. Le réseau va donc s'adapter jusqu'à ce qu' y soit égal ou presque égal à d . Ce principe est notamment utilisé dans le cas du réseau multicouche[11]
- **Règles de Hebb** : Cette règle d'apprentissage est la plus ancienne (1949). Elle est basée sur le comportement des neurones biologiques. Cette règle modélise le fait que si deux

neurones, de part et d'autre d'une synapse, sont activés de façon synchrone et répétée, la force de la connexion synaptique va être croissante. Il est à noter ici que l'apprentissage est localisé, c'est-à-dire que la modification d'un poids synaptique w_{ij} ne dépend que de l'activation d'un neurone i et d'un autre neurone j auquel il est connecté. [12]

Cette règle s'applique aux connexions entre neurones, comme le représente le schéma suivant :



i : le neurone en amont

j : le neurone en aval

w_{ij} : le poids de la connexion

La modification de poids dépend de la co-activation des neurones pré-synaptique et post synaptique, ainsi que montre la table 3.1. x_i et x_j sont respectivement les valeurs d'activation des neurones i et j , ∂w_{ij} (dérivée partielle du poids) correspond à la modification de poids réalisée.

x_i	x_j	∂w_{ij}
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Table 3.1 : la loi de Hebb

-la rétro-propagation du gradient de l'erreur: cet algorithme est utilisé dans les réseaux de type multicouche, formé d'une couche d'entrée, d'une couche de sortie, et au moins une couche cachée. Le réseau ne doit pas contenir de récursivité dans

les connexions, et il ne doit pas avoir de connexions entre neurones d'une même couche. Le principe de la rétro-propagation consiste à présenter au réseau un vecteur d'entrées, de procéder au calcul de la sortie par propagation à travers les couches, de la couche d'entrée vers la couche de sortie en passant par les couches cachées. Cette sortie obtenue est comparée à la sortie désirée, une erreur est alors obtenue. A partir de cette erreur, est calculé le gradient de l'erreur qui est à son tour propagé de la couche de sortie vers la couche d'entrée, d'où le terme de rétro-propagation. Cela permet la modification des poids du réseau et donc l'apprentissage. L'opération est réitérée pour chaque vecteur d'entrée et cela jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit vérifié. La figure 3.9 donne une illustration de cette règle. Les lignes en pointillés représentent le parcours de l'erreur de la couche de sortie vers la couche d'entrée. [12]

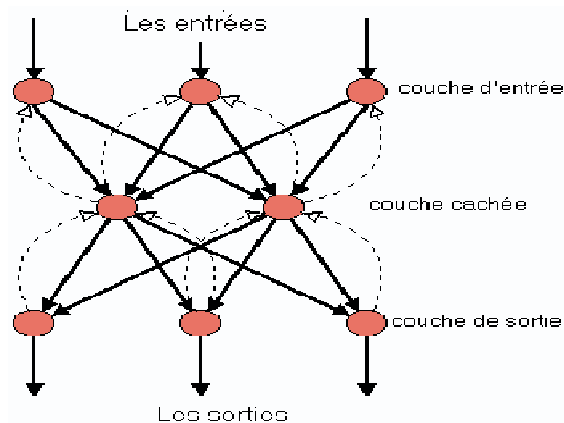


Figure 3.9: Illustration de la rétro-propagation.

- **Règle d'apprentissage par compétitions:** La particularité de cette règle, c'est qu'ici l'apprentissage ne concerne qu'un seul neurone. Le principe de cet apprentissage est de regrouper les données en catégories. Les entrées similaires vont donc être rangés dans une même classe, en se basant sur les corrélations des données, et seront représentés par un seul neurone. Dans un réseau à compétition simple, chaque neurone de sortie est connecté aux neurones de la couche d'entrée, aux autres cellules de la couche de sortie (connexions inhibitrices) et à elle-même (connexion excitatrice). La sortie va donc dépendre de la compétition entre les connexions inhibitrices et excitatrices.

3.5.2 Phase de test :

La phase de test réalisée en testant le réseau conçu par des exemples autre que ceux utilisés lors de la phase d'apprentissage, la validation se fait par test sur un certain nombre des variables (inputs), dont on connaît la sortie (outputs) que l'on a écartés de l'échantillon d'apprentissage et réserve à cet effet. [13]

A noter que l'échantillon de test est sélectionné d'une manière aléatoire ce qui fait que chaque échantillon dans un réseau de neurone ne se ressemble à un autre, néanmoins le nombre de cet échantillon peut être contrôlé. Ce qui explique le changement des résultats au sein d'un même réseau à chaque exécution.

3.6 Exemples d'apprentissage :

Un exemple d'apprentissage : « loi de Hebb »

La loi de Hebb peut être modélisée par les équations suivantes

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \partial w_{ij}(t)$$

Où

$w_{ij}(t+1)$ est le nouveau poids

$w_{ij}(t)$ est l'ancien poids

$\partial w_{ij}(t) = x_i x_j$ (La co-activation est modélisée comme le produit des deux valeurs d'activation)

L'algorithme d'apprentissage modifie de façon itérative (par petit pas) les poids pour adapter la réponse obtenue à la réponse désirée. Il s'agit en fait de modifier les poids lorsqu'il y a erreur

seulement (réponse obtenue différente de la réponse désirée). On peut décrire un tel algorithme par:

- 1) Initialisation des poids et du seuil s à des valeurs (petites) choisies au hasard
- 2) Présentation d'une entrée $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ de base d'apprentissage.
- 3) Calcul de la sortie obtenue y pour cette entrée :

$$y = \text{signe}(a) \text{ (Si } a > 0 \text{ alors } y = +1 \text{ sinon } y = -1)$$

Où

$$a = \sum (w_i \cdot e_i) - s \text{ (La valeur de seuil } s \text{ est introduite ici dans le calcul de la somme pondérée)}$$

- 4) Si la sortie y est différente de la sortie désirée d_1 pour cet exemple d'entrée E_1 alors la modification des poids est :

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \mu e_i e_j$$

μ est une constante positive, qui spécifie le pas de modification des poids

- 5) Tant que tous les exemples de la base d'apprentissage ne sont pas traités correctement (i.e. modification des poids). Retour à l'étape 2.

Exemple de fonctionnement de l'algorithme d'apprentissage du perceptron :

e_1 (entrée 1)	e_2 (entrée 2)	d (Sortie désirée)	cas
1	1	1	(1)
-1	1	-1	(2)
-1	-1	-1	(3)
1	-1	-1	(4)

Table 3.2 : Base d'exemples d'apprentissage

Exemple d'application de l'Algorithme d'apprentissage de Hebb :

Choisissons pour les neurones un comportement binaire les entrées e_1 et e_2 sont considérées comme des neurones (figure3.10).

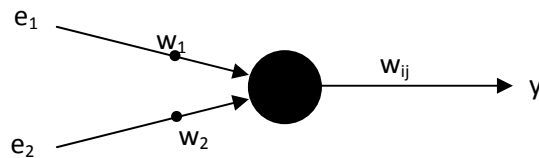


Figure 3.10 : Réseau de 3 neurones (Les 2 entrées sont considérées comme deux neurones)

Nous allons réaliser l'apprentissage de ce réseau sur un problème très simple. La base d'apprentissage est décrite par la table 3.3 :

e_1 (entrée 1)	e_2 (entrée 2)	d (Sortie désirée)	cas
1	1	1	(1)
1	-1	1	(2)
-1	1	-1	(3)
-1	-1	-1	(4)

Table 3.3 : Base d'exemples d'apprentissage pour la loi de Hebb

Conditions initiales : $\mu = +1$: les poids et le seuil sont nul

Cas (1)

Calculons la valeur de y pour ce cas

1) $a = w_1e_1 + w_2e_2 - s = 0,0 \cdot 1 + 0,0 \cdot 1 - 0,0 = 0$. Donc $y = -1$

- 2) La sortie, y , du neurone ne correspond pas à la sortie désirée d , il faut donc modifier les poids en appliquant :

$$w_1 = w_1 + e_1 \cdot e_2 = 0,0 + 1 \cdot 1 = 1$$

$$w_2 = w_2 + e_2 \cdot e_2 = 0,0 + 1 \cdot 1 = 1$$

Cas (2)

Calculons la valeur de y pour ce cas avec les poids w_1 et w_2 obtenus dans l'étape précédente

1) $a = w_1 e_1 + w_2 e_2 - s = 1 \cdot 1 + 1 \cdot (-1) - 0,0 = 0$. Donc $y = -1$

- 2) La sortie, y , du neurone ne correspond pas à la sortie désirée d , il faut donc modifier les poids en appliquant :

$$w_1 = w_1 + e_1 \cdot e_2 = 1,0 + 1 \cdot 1 = 2$$

$$w_2 = w_2 + e_2 \cdot e_2 = 1,0 + 1 \cdot (-1) = 0$$

Cas (3)

1) $a = w_1 e_1 + w_2 e_2 - s = 2,0 \cdot (-1) + 0,0 \cdot (1) - 0,0 = -2,0$. Donc $y = -1$

- 2) La sortie, y , du neurone correspond à la sortie désirée d . Les poids dans ce cas restent inchangés.

Cas (4)

1) $a = w_1 e_1 + w_2 e_2 - s = 2,0 \cdot (-1) + 0,0 \cdot (-1) - 0,0 = -2,0$. Donc $y = -1$

- 2) La sortie, y , du neurone correspond à la sortie désirée d . Les poids dans ce cas restent inchangés.

On revient alors au début de la base d'apprentissage :

On reprend les mêmes opérations sur les 4 cas de la base d'apprentissage en utilisant les derniers poids calculés à savoir $w_1 = 2$ et $w_2 = 0$.

Cas (1)

1) $a = w_1e_1 + w_2e_2 - s = 2,0 \cdot 1 + 0,0 \cdot 1 - 0,0 = 2$. Donc $y = 1$

2) La sortie, y , du neurone correspond à la sortie désirée d . Les poids dans ce cas restent inchangés

Cas (2)

1) $a = w_1e_1 + w_2e_2 - s = 2 \cdot 1 + 0 \cdot (-1) - 0,0 = 2$. Donc $y = 1$

2) La sortie, y , du neurone correspond à la sortie désirée d . Les poids dans ce cas restent inchangés

Etant donné que les poids n'ont subi aucun changement, les cas (3) et (4) ne vont engendrer aucun changement. En d'autre terme la base d'apprentissage a été passée en revue sans modification des poids. Par conséquent, l'algorithme d'apprentissage est terminé.

CHAPITRE 4 IMPLEMENTATION ET RESULTATS

4.1 Mode opératoire :

Notre travail consiste à faire trois tests pour chaque type de bain de borure avec des inputs différents :

1. Le premier test des inputs avec les valeurs tel qu'ils sont réels soit les températures et temps de maintien; ces valeurs sont pris directement du tableau(1) voir chapitre précédant
2. Le deuxième test des Inputs avec des valeurs normalisés selon la formule suivante :

$$t_i = 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{t - t_{min}}{t_{max} - t_{min}} \right) \dots \dots \dots (4.1) [1]$$

Où

t : est la valeur des inputs (dans notre exemple la température et le temps de maintien),

t_{max} et t_{min} : sont les valeurs expérimentales maximum et minimum de notre exemple.

	Températures (°C)					
Système décimale	800	850	900	950	1000	1050
Valeurs normalisées essai : 1	0.1	0.4	0.7	1		
Valeurs normalisées essai : 2		0.1	0.4	0.7	1	
Valeurs normalisées essai : 3			0.1	0.4	0.7	1

Tableau 4.1 : Valeurs de température converties en forme normalisée

		Temps de maintien (H)		
Système décimale		2	4	6
Forme normalisée		0.1	0.55	1

Tableau 4.2 : Valeurs de temps en forme normalisée

3-Inputs binarisés : ce test consiste à convertir tous les valeurs décimales (température et temps de maintien) en système binaire.

		Températures (°C)					
Système décimale		800	850	900	950	1000	1050
Système binaire		00110010000	01101010010	01110000100	01110110110	01111101000	10000011010

Tableau 4.3: Valeurs de température convertis en binaire

		Temps de maintien (H)		
Système décimale		2	4	6
Système binaire		010	100	110

Tableau 4.4 : Valeurs de temps de maintien convertis en binaire

Ces trois tests seront appliqués sur les trois expériences de boruration effectuées sur un acier XC38 dans trois bains différents de carbure de bore à savoir :

- a) Borax-B₄C
- b) Borax-Al
- c) Borax-SiC

4.2 Définition du nombre de neurone dans un réseau :

Le nombre de neurone de la couche cachée dans chaque implémentation de réseau de neurone sera défini selon la formule suivante [1] :

$$m = \sqrt{n+l} + \alpha \dots \dots \dots (4.2)$$

m : désigne le nombre de neurone de la couche cachée.

n : est le nombre de neurone dans la couche d'entrée.

l : est le nombre de neurone dans la couche de sortie

α : Constante de régulation prend les valeurs entières entre 1 et 10.

Par expérience Cette formule nous permet non seulement de limiter le nombre de neurone dans un test mais aussi elle nous guide vers la meilleure estimation qui se trouvera forcément dans cet intervalle.

Donc chaque expérience fait l'objet de (30) trente tests (dix tests pour chaque bain de Borax avec trois temps de maintien 2 ,4 et 6 heures)

Dans l'ensemble de ce travail le nombre total d'expérience sera donc 90 tests.

4.3 Implémentation de réseaux de neurones :

Pendant tous les tests que nous allons faire, nous utiliserons le logiciel MatLab 7.9.0(R2011b) comme support d'implémentation des réseaux de neurones, une interface graphique nous facilitera la tache de programmation, le réseau qui nous donne le meilleur résultat sera enregistré et il pourra nous servir comme simulateur pour un éventuel travail expérimental. Nous avons adopté le type de réseau Feed-forward back propagation, s'est le premier type et le plus simple sans doute de réseaux de neurones artificiels conçus, dans ce type de réseau les informations se déplacent dans une direction vers l'avant à partir des nœuds d'entrée à travers les nœuds cachées. [14]

4.4 Etapes d'apprentissage des réseaux de neurones :

- 1 Introduire les deux matrices d'entrée et de sortie
- 2 Définir le nombre de neurone mis en jeu selon la formule (4.2)
- 3 Ajuster le pourcentage des échantillons d'apprentissage et de validation et de test; cette étape est facultative on peut garder les valeurs par défaut.

Une fois le réseau est prêt, on peut prédire les valeurs des épaisseurs à chaque température et aux différents temps de maintien. ces valeurs simulées seront comparées avec les valeurs expérimentales dans un tableau Excel.

Un pourcentage calculé par la formule suivante :

$$(\text{ABS}(1-\text{valeur moyenne}/\text{valeur simulée}) * 100) \dots \dots \dots (4.3)$$

Cette formule nous définit l'erreur commise par rapport à la valeur expérimentale, le tableau qui comporte l'erreur minimale sera pris comme référence.

4.5 PREMIERE EXPERIENCE :

Le bain de borure utilisé dans cette expérience est le **Borax- B_4C** avec quatre températures de service : 800, 850, 900 et 950°C chaque température à trois temps de maintien 2, 4, et 6 heures.

A cause de l'uniformité de la couche du bore, dix mesures d'épaisseur de la couche borurée seront relevées après chaque expérience, une moyenne arithmétique de la couche diffuse sera considéré comme l'épaisseur désirée.

Pour introduire les données sous forme matricielle (sous Matlab) les inputs et les output doivent avoir le même nombre de colonne, et comme notre output à 30 valeurs d'épaisseurs relevées sur l'échantillon pour chaque température de service le long des trois durées de maintien soit 2,4 et 6 heures.

Donc la matrice des entrées (inputs) sera constituée par 30 colonnes et deux lignes la première ligne la température et la deuxième ligne le temps de maintien.

La matrice globale qui contient tous les températures et les temps de maintien sera constituée de 120 colonnes et 02 lignes.

Pour les données de sortie (outputs) une matrice d'une ligne et 120 colonnes présentera tous les valeurs des épaisseurs relevées durant une seule expérience dans un seul bain de borax .

Les inputs ou les éléments d'entrée utilisés dans chaque expérience se divise en trois types :

- a) Inputs non normalisés (température en °C et temps de maintien en heures)
- b) Inputs normalisés (valeurs qui varient de 0.1 et 1)
- c) Inputs binarisés (valeurs de la température et du temps de maintien converties en binaire)

4.5.1 Inputs non normalisées :

- ❖ Dans ce test on garde les valeurs telles qu'ils sont sans changement.

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs expérimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
800	2	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	24,50	2,04
800	4	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	48,00	4,17
800	6	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	74,75	0,33
850	2	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	43,88	2,56
850	4	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	64,17	9,09
850	6	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	95,29	0,30
900	2	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	72,71	3,73
900	4	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	112,00	1,79
900	6	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	146,11	0,76
950	2	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	110,50	4,98
950	4	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	156,67	8,51
950	6	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	221,40	9,67
												% Erreur max=	9,67	

Tab

Tableau 4.5: Meilleur essai N°6(Borax-B4C) 01 couche cachée à 08 neurones (input non normalisés)

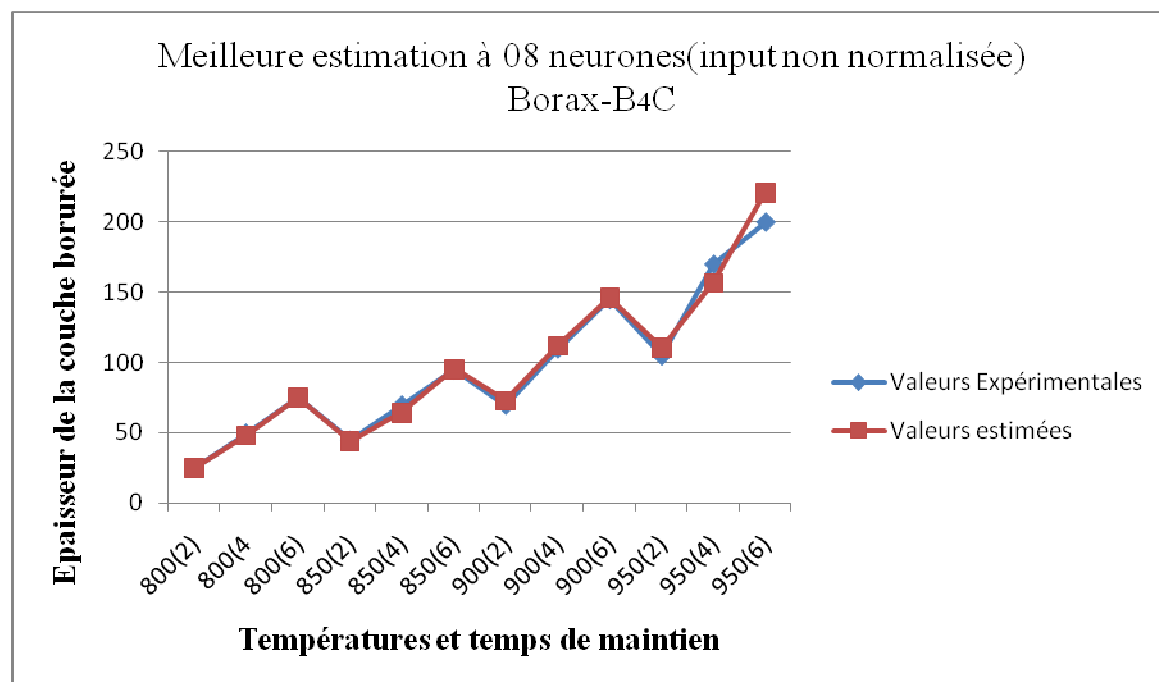


Figure 4.1 : Meilleure estimation pour 08 neurones (input non normalisée) Borax-B4C

4.5.2 Inputs normalisés

- ❖ Les dix tests qui suivent feront l'objet des inputs normalisés suivant la formule (4.1),

La conversion des températures en forme normalisée nous donne les valeurs suivantes :

	Températures (°C)			
Système décimale	800	850	900	950
Valeurs normalisées	0.1	0.4	0.7	1

❖ La conversion du temps de maintien nous donne :

	Temps de maintien (H)		
Système décimale	2	4	6
Forme normalisée	0.1	0.55	1

❖ La matrice des inputs est la même sauf que les valeurs prendront la forme normalisées.

❖ Le nombre de neurone restera le même il varie de 3 jusqu'à 12, soit dix valeur dans l'ensemble.

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	23	21	16	20	26	28	29	35	30	25	25,75	2,90
0.1	0.55	36	42	45	48	37	68	57	55	59	53	50	50,71	1,39
0.1	1	70	62	57	69	71	87	85	81	89	79	75	72,65	3,24
0.4	0.1	32	36	34	42	31	55	52	60	51	57	45	45,21	0,47
0.4	0.55	60	52	56	63	52	88	85	92	77	75	70	65,78	6,41
0.4	1	80	78	85	75	91	113	125	105	100	98	95	94,59	0,44
0.7	0.1	65	48	55	62	53	90	86	87	78	76	70	67,57	3,60
0.7	0.55	96	102	85	100	99	129	137	125	110	117	110	103,24	6,54
0.7	1	126	135	105	100	132	185	175	155	172	165	145	142,86	1,50
1	0.1	90	82	78	95	92	130	110	120	125	128	105	104,01	0,95
1	0.55	120	142	135	118	145	210	200	205	212	213	170	167,94	1,23
1	1	168	155	150	175	172	220	225	248	242	245	200	197,04	1,50
												% Erreur max= 6,54		

Tableau 4.6: Meilleur essai N°8(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 10 neurones (inputs normalisé)

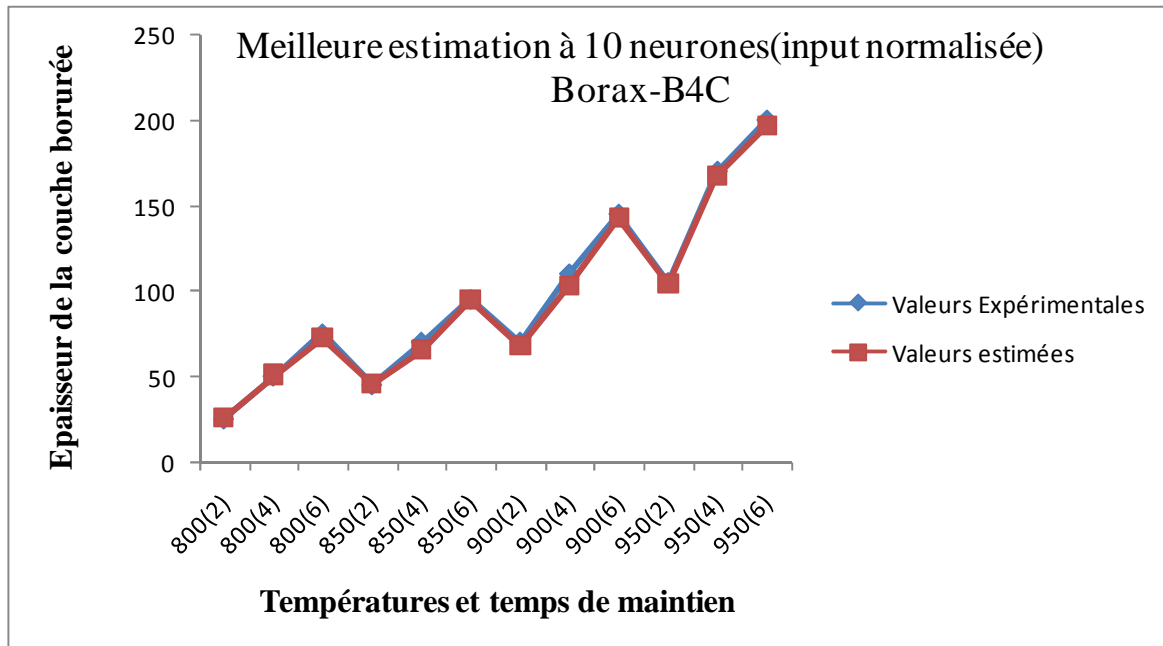


Figure 4.2 : meilleure estimation à 10 neurones (input normalisée) Borax-B4C

4.5.3 Inputs binaires

- ❖ Les dix derniers tests de cette première expérience consistent à convertir tous les valeurs en binaire le tableau suivant comprend les valeurs de température converties en binaire.

	Températures (°C)			
Système décimale	800	850	900	950
Système binaire	0110010000	1101010010	1110000100	1110110110

- ❖ Temps de maintien en binaire :

	Temps de maintien (H)		
Système décimale	2	4	6
Système binaire	010	100	110

- ❖ Le nombre de neurone mis en jeu prend les dix valeurs suivants : 5,6,7,8,9,10,11,12,13,14

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Moyennes	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	24,64	1,46
1100100000	100	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	49,44	1,13
1100100000	110	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	71,14	5,43
1101010010	010	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	47,01	4,28
1101010010	100	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	68,39	2,36
1101010010	110	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	96,74	1,80
1110000100	010	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	66,73	4,90
1110000100	100	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	103,89	5,88
1110000100	110	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	150,14	3,43
1110110110	010	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	110,37	4,87
1110110110	100	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	174,39	2,52
1110110110	110	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	189,11	5,76
												% Erreur max=	5,88	

Tableau 4.7: Meilleur essai N°1 (Borax-B4C): 01 couche cachée à 06neurones (inputs binarisés)

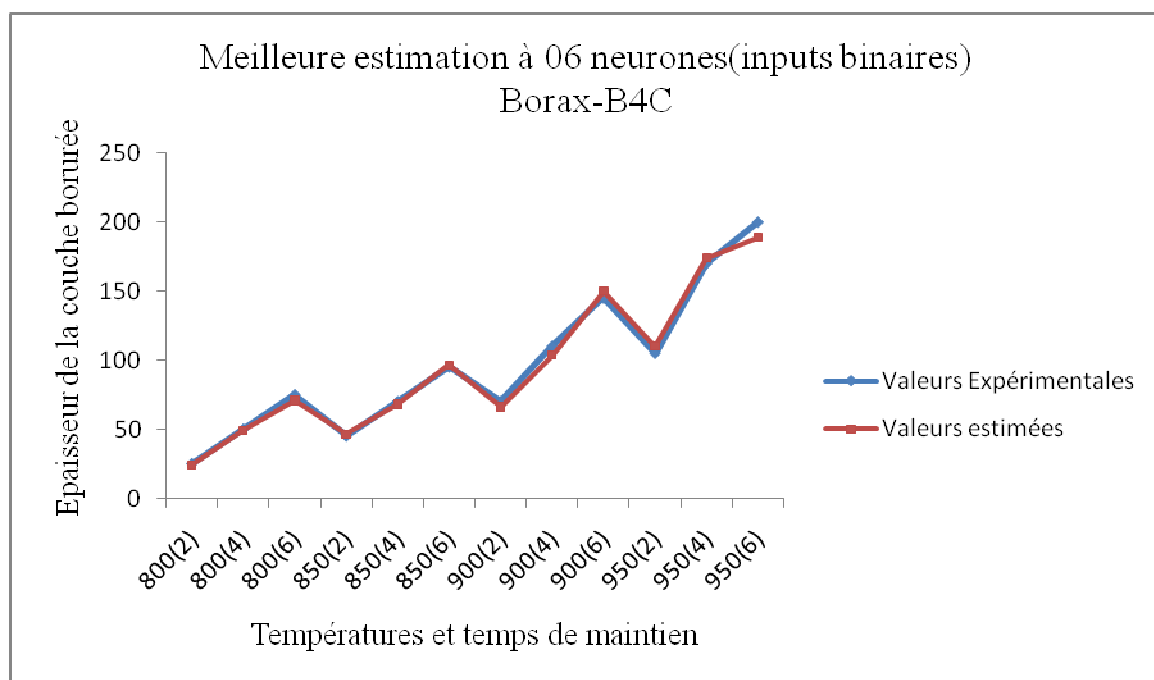


Figure 4.3 : Meilleure estimation à 06 neurones (inputs binaires) Borax-B4C

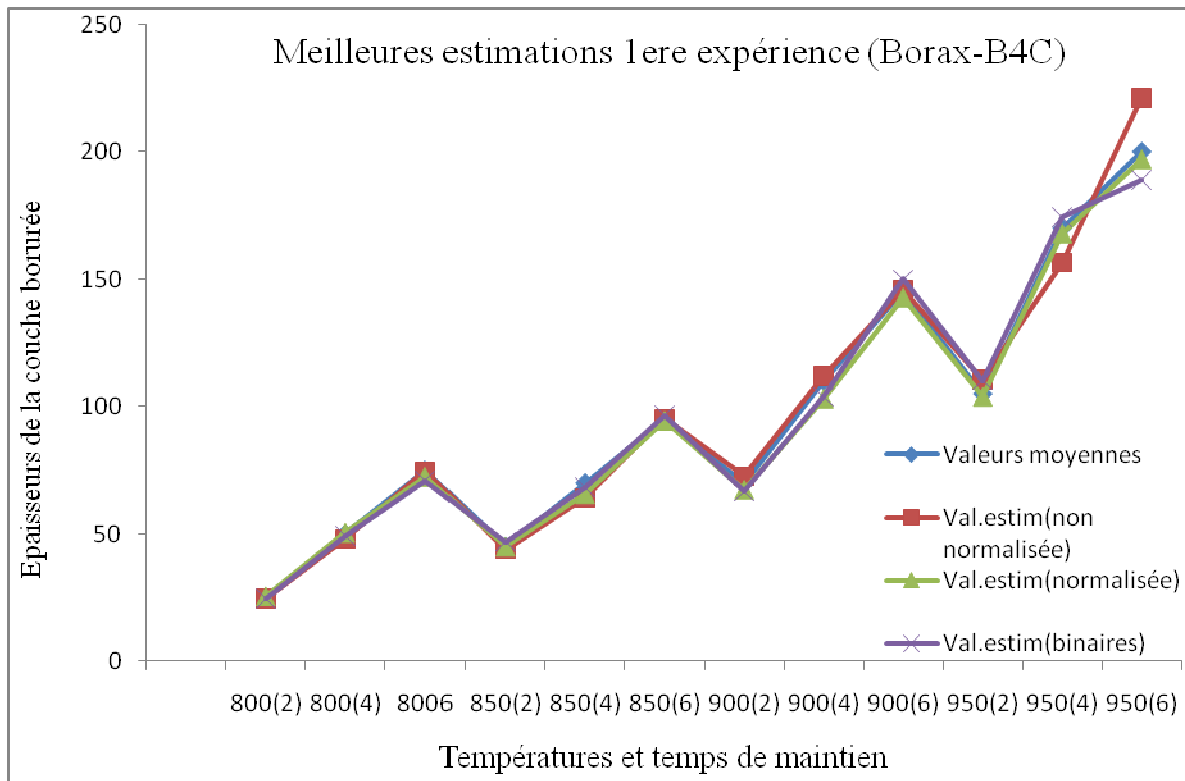


Figure 4.4 : meilleures estimations et valeurs expérimentale des trois tests Borax-B4C

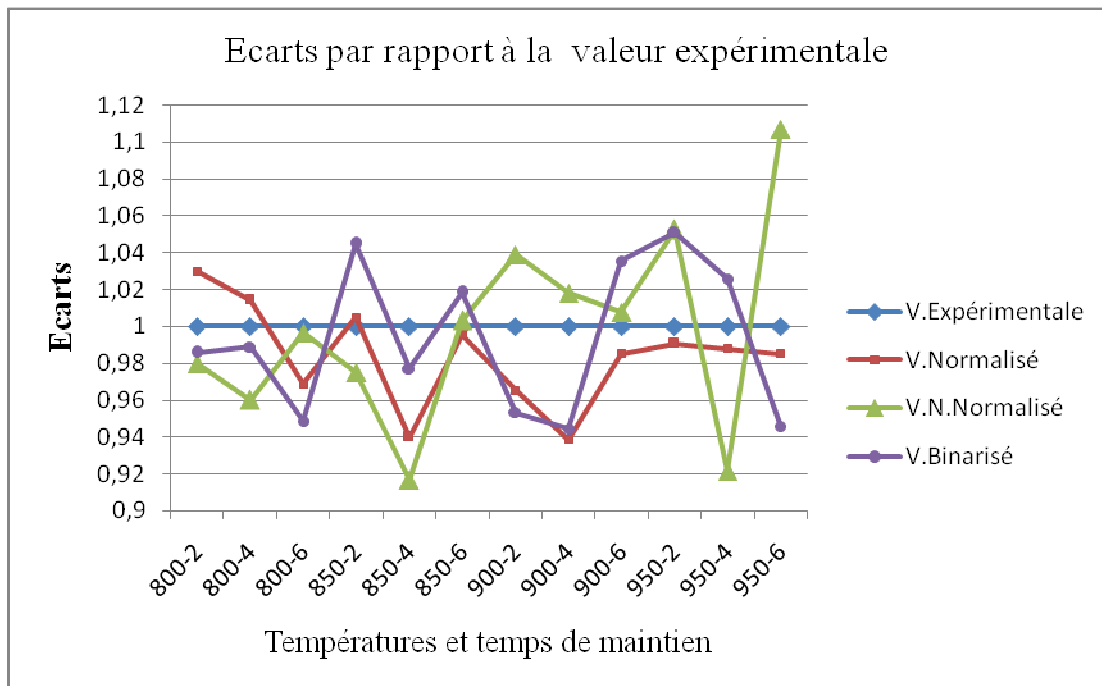


Figure 4.5 : Courbes des écarts par rapport à la valeur expérimentale (Borax-B4C)

4.5.4 Conclusion de la première partie :

Les 30 premiers tableaux des valeurs comportent tout le travail avec tous les résultats obtenus (en annexe), la meilleure estimation est retenue (annexe : page 75 Tableau 6, page 81 Tableau 18 et page 83 Tableau 22).

Les pourcentages d'erreurs minimales obtenus pour chaque type d'essai sont synthétisés dans le tableau Suivant:

% Erreur Max	Type de données	Nombre Neurones utilisées	Ref
9.67 %	inputs non normalisé	08	Tableau.4.5
6.54 %	inputs normalisés	10	Tableau.4.6
5.88 %	inputs binarisés	06	Tableau. 4.7

Tableau 4.8 : Synthèse des Résultats obtenu pour le Borax-B4C

4.6 DEUXIEME EXPERIENCE :

4.6.1 Inputs non normalisés :

- ❖ Le bain de borure utilisé dans cette expérience est le **Borax-Al** avec les quatre températures de service : 850, 900, 950 et 1000°C chaque température à toujours trois temps de maintien: 2, 4, et 6 heures.
- ❖ Le nombre de neurone est : 3,4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,12
- ❖ Pour la matrice d'entrée et de sortie, on refait le même travail sauf qu'il faut introduire les valeurs de températures, temps de maintien et des épaisseurs qui correspondent à cette expérience.

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
850	2	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	25,23	0,92
850	4	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	51,18	7,45
850	6	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	82,26	2,75
900	2	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	43,20	4,17
900	4	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	77,56	9,60
900	6	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	112,03	1,81
950	2	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	72,46	10,30
950	4	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	128,16	6,36
950	6	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	174,49	2,58
1000	2	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	103,66	3,53
1000	4	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	184,59	2,49
1000	6	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	249,37	1,75
												% Erreur max=	10,3	

Tableau 4.9: Meilleur essai N°8 (Borax-Al) 01 couche cachée à 10 neurones (inputs non normalisés)

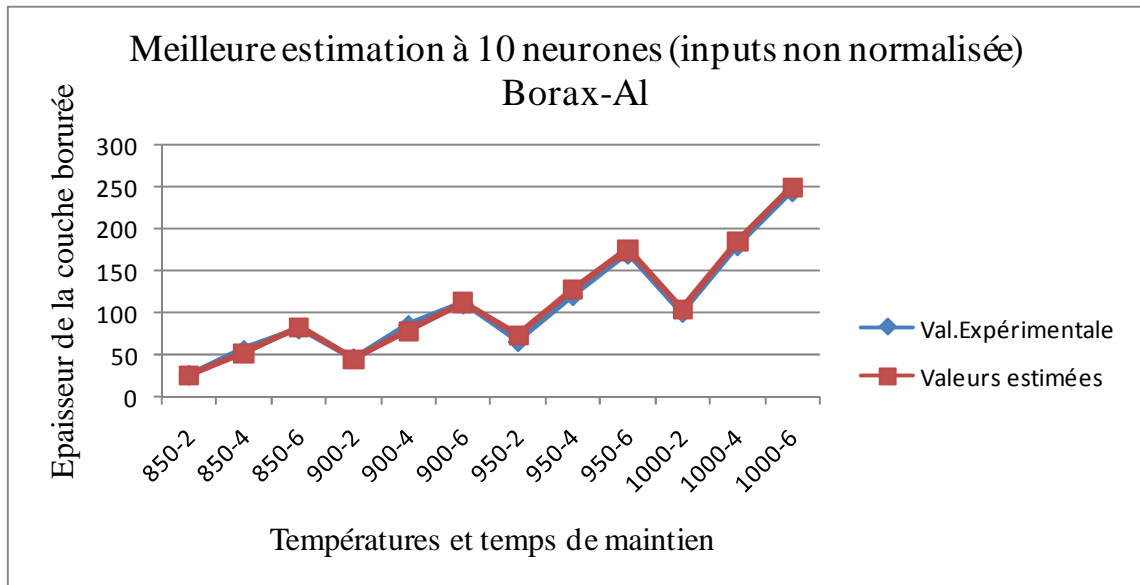


Figure 4.6 : Meilleure estimation à 10 neurones (input non normalisé) Borax-Al

4.6.2 Inputs normalisés :

❖ Les tests suivant prennent les valeurs normalisées :

	Températures (°C)			
Système décimale	850	900	950	1000
Forme normalisée	0.1	0.4	0.7	1

❖ Le temps en valeurs normalisées :

	Temps de maintien (H)		
Système décimale	2	4	6
Forme normalisée	0.1	0.55	1

❖ Le nombre de neurone : 3,4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,12

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	29	23	28	18	31	15	34	20	30	25	27,15	7,92
0.1	0.55	37	76	47	60	44	72	48	62	39	65	55	50,65	8,59
0.1	1	68	96	55	92	52	98	72	105	62	100	80	83,32	3,98
0.4	0.1	28	62	36	55	34	52	40	53	33	57	45	46,73	3,69
0.4	0.55	70	110	65	105	60	97	66	100	62	115	85	87,79	3,17
0.4	1	90	130	84	136	92	128	95	125	88	132	110	104,52	5,24
0.7	0.1	55	88	45	80	54	81	52	75	50	70	65	64,60	0,62
0.7	0.55	97	140	102	144	88	134	100	148	95	152	120	113,51	5,72
0.7	1	137	208	135	205	120	215	130	195	140	215	170	174,69	2,68
1	0.1	88	120	82	125	90	115	76	112	92	100	100	98,15	1,88
1	0.55	135	222	140	215	148	205	130	225	150	230	180	188,25	4,38
1	1	187	290	178	300	165	315	195	305	190	325	245	239,28	2,39
												% Erreur max=		8,59

Tableau 4.10: Meilleur essai N°2 (Borax-Al) : 01 couche cachée à 04neurones (inputs normalisés)

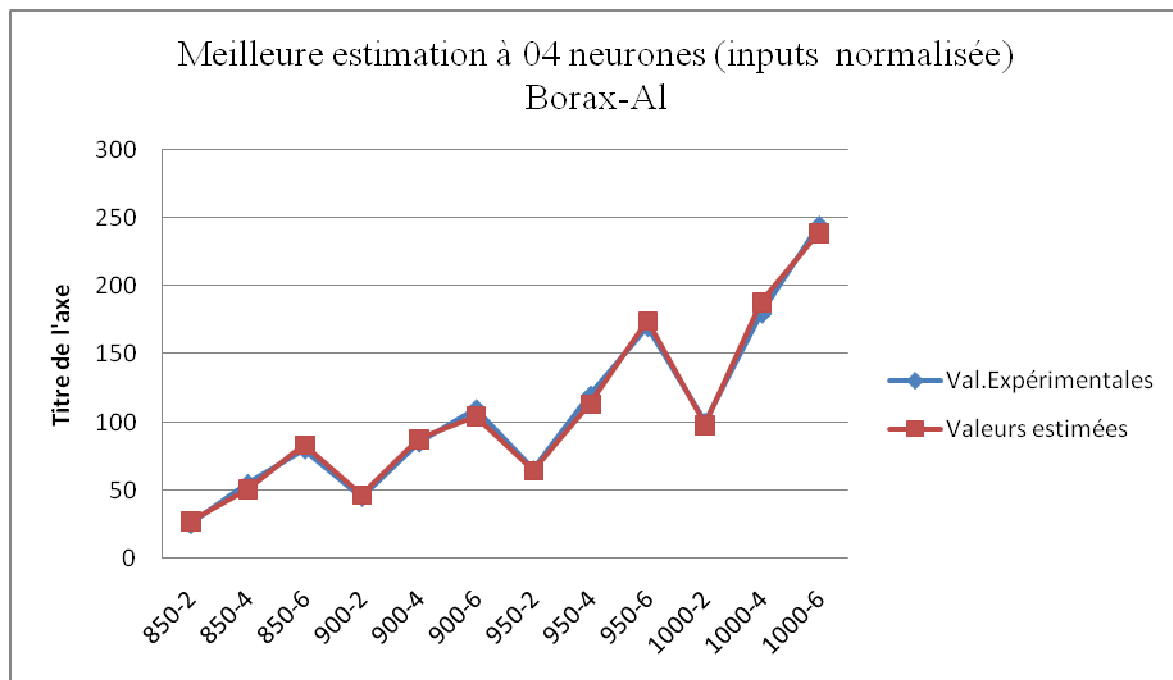


Figure 4.7: Meilleure estimation à 04 neurones (inputs normalisés) (Borax-Al)

4.6.3 Inputs binaires

- ❖ Les dix dernier tests dans cette deuxième expérience consiste à convertir tous les valeurs d'entrées en binaire :

		Températures (°C)			
Système décimale		850	900	950	1000
Système binaire		1101010010	1110000100	1110110110	1111101000

- ❖ Temps en binaire :

		Temps de maintien (H)		
Système décimale		2	4	6
Système binaire		010	100	110

- ❖ Le

nombre de neurone : 5,6,7,8,9,10,11,12,13,14

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	24,73	1,10
1100100000	100	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	53,54	2,73
1100100000	110	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	78,85	1,45
1101010010	010	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	46,64	3,53
1101010010	100	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	80,38	5,74
1101010010	110	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	107,59	2,24
1110000100	010	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	63,15	2,93
1110000100	100	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	120,30	0,25
1110000100	110	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	166,97	1,81
1110110110	010	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	105,95	5,61
1110110110	100	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	176,07	2,23
1110110110	110	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	244,93	0,03
													% Erreur max=	5,74

Tableau 4.11: Meilleur essai N°7(Borax-Al): 01 couche cachée à 12neurones (inputs binarisés)

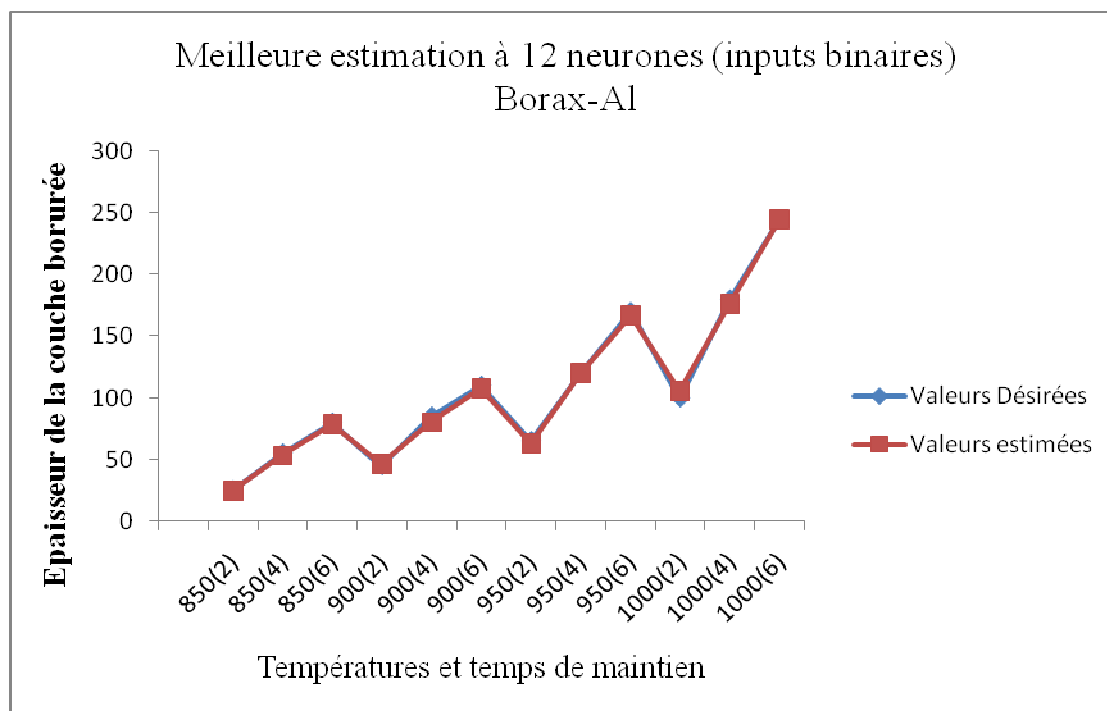


Figure 4.8 : Meilleure estimation à 12 neurones (inputs binaires) Borax-Al

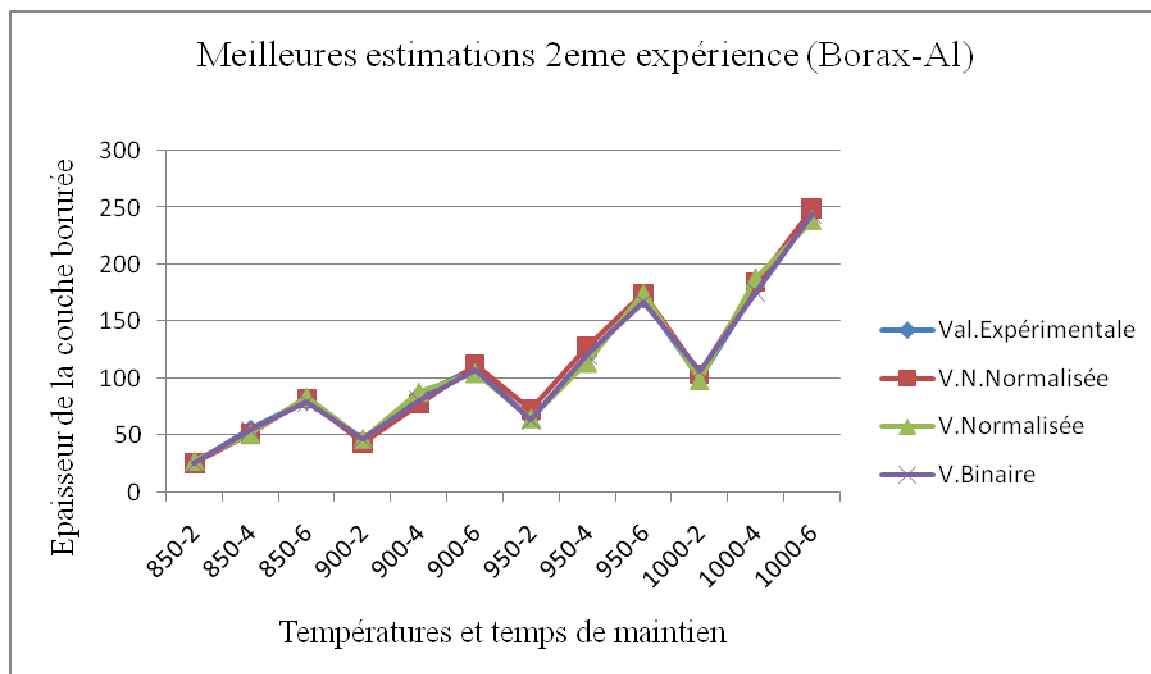


Figure 4.9 : meilleures estimations des trois tests Borax-Al et la valeur expérimentale

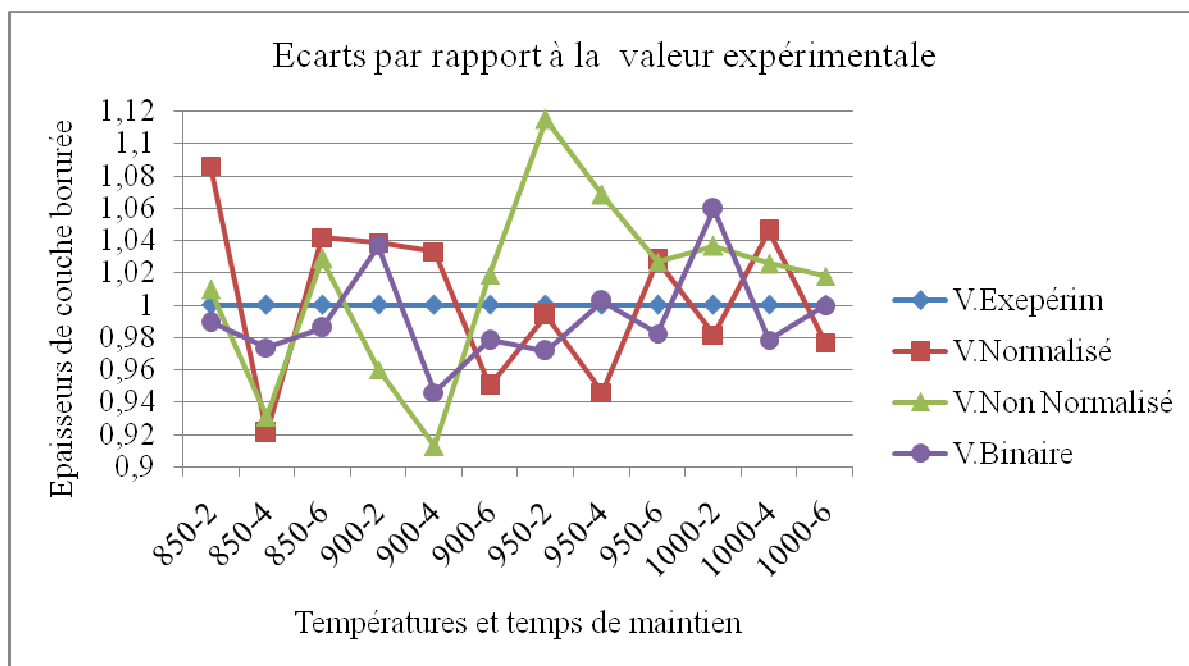


Figure 4.10 : Courbes des écarts des trois tests de la deuxième expérience par rapport à la valeur expérimentale

4.6.4 Conclusion de la deuxième partie

Les tableaux (de 31 à 60 en annexe) représentent tous les tests aux valeurs normalisés, les meilleures estimations sont retenues (annexe : page 91 Tableau 38, page 93 Tableau 42 et page 101 Tableau 58).

Les pourcentages d'erreurs minimales obtenus pour chaque type d'essai sont synthétisés dans le tableau Suivant:

% Erreur Max	Type de données	Nombre Neurones utilisées	Réf
10.3 %	inputs non normalisé	10	Tableau.4.9
8.59 %	inputs normalisés	04	Tableau.4.10
5.74 %	inputs binarisés	12	Tableau. 4.11

Tableau 4.12 : Synthèse des Résultats obtenu pour le Borax-Al

4.7 TROISIEME EXPERIENCE :

- ❖ Le bain de borure utilisé dans cette dernière expérience est le **Borax-SiC** avec quatre températures de service : 900, 950, 1000 et 1050°C chaque température à trois temps de maintien : 2, 4, et 6 heures.

4.7.1 Inputs non normalisés :

- ❖ Le nombre de neurone utilises prendront les valeurs suivantes : 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,11,12

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
		5	7	8	10	8	25	22	27	18	20			
900	2	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	17,16	12,61
900	4	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	31,61	10,73
900	6	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	48,45	3,20
950	2	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	32,72	8,33
950	4	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	66,58	2,38
950	6	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	101,11	1,09
1000	2	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	48,86	7,89
1000	4	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	105,24	0,23
1000	6	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	167,45	4,45
1050	2	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	80,07	0,08
1050	4	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	157,85	1,36
1050	6	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	243,64	0,56
												% Erreur max=		12,61

Tableau 4.13 : Meilleur essai N°8(Borax-SiC) 01couche cachée à 10 neurones (inputs non normalisés)

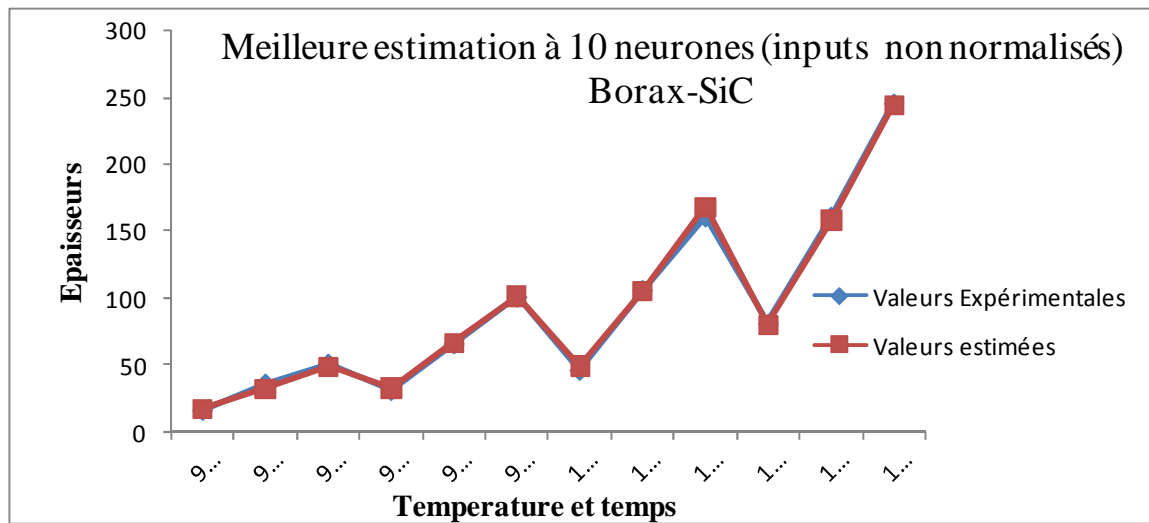


Figure 4.11 : Meilleure estimation à 10 neurones (inputs non normalisés) Borax-SiC

4.7.2 Deuxième test inputs normalisés :

- ❖ Transformation à la forme normalisée de la température :

	Températures (°C)			
Système décimale	900	950	1000	1050
Forme normalisée	0.1	0.4	0.7	1

- ❖ De même pour le temps de maintien :

	Temps de maintien (H)		
Système décimale	2	4	6
Forme normalisée	0.1	0.55	1

- ❖ Le nombre de neurone varie de 3 jusqu'à 12 selon la formule (4.2)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs expérimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	15,01	0,04
0.1	0.55	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	38,44	8,95
0.1	1	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	51,38	2,69
0.4	0.1	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	32,37	7,32
0.4	0.55	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	69,00	5,80
0.4	1	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	104,32	4,14
0.7	0.1	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	44,14	1,95
0.7	0.55	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	103,00	1,94
0.7	1	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	165,96	3,59
1	0.1	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	80,75	0,93
1	0.55	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	153,39	4,31
1	1	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	237,70	3,07
												% Erreur max= 8,95		

Tableau 4.14 : Meilleur essai N°8(Borax-SiC) 01couche cachée à 11 neurones (inputs normalisés)

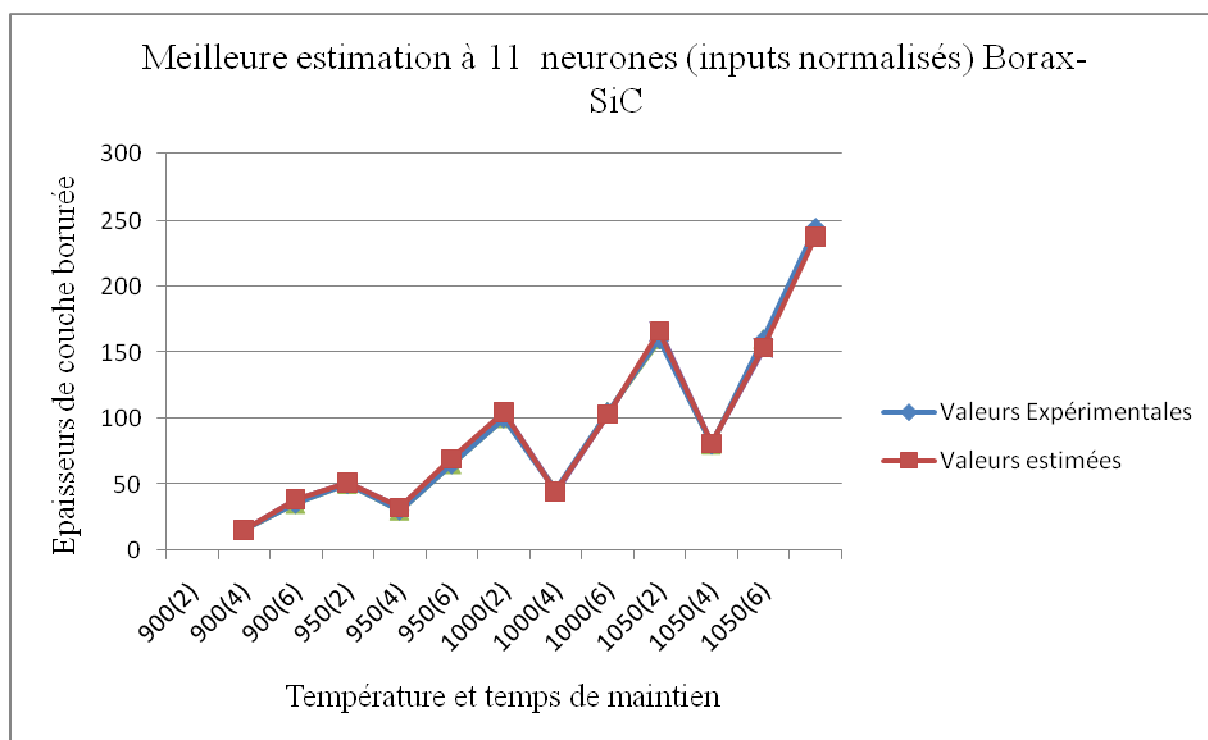


Figure 4.12: Meilleure estimation à 11 neurones (inputs normalisés) Borax-SiC

4.7.3 Inputs binaires :

- ❖ Convertir les valeurs de températures de maintien en binaire :

	Températures (°C)			
Système décimale	900	950	1000	1050
Système binaire	01110000100	01110110110	01111101000	10000011010

- ❖ De même pour le temps de maintien:

	Temps de maintien (H)		
Système décimale	2	4	6
Forme normalisée	0.1	0.55	1

- ❖ Le nombre de neurone est : 5,6,7,8,9,10,11,12,13,14

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Desirées	Valeurs estimées	(%)
01110000100	010	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	15,00	0,00
01110000100	100	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	35,00	0,00
01110000100	110	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	52,43	4,63
01110110110	010	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	28,60	4,90
01110110110	100	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	67,67	3,94
01110110110	110	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	100,25	0,25
01111101000	010	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	46,00	2,17
01111101000	100	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	108,71	3,42
01111101000	110	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	150,87	6,05
10000011010	010	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	76,44	4,65
10000011010	100	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	149,50	7,02
10000011010	110	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	268,00	8,58
												% Erreur max= 8,58		

Tableau 4.15: Meilleur essai N°2(Borax-SiC): 01 couche cachée à 06 neurones (inputs binarismes)

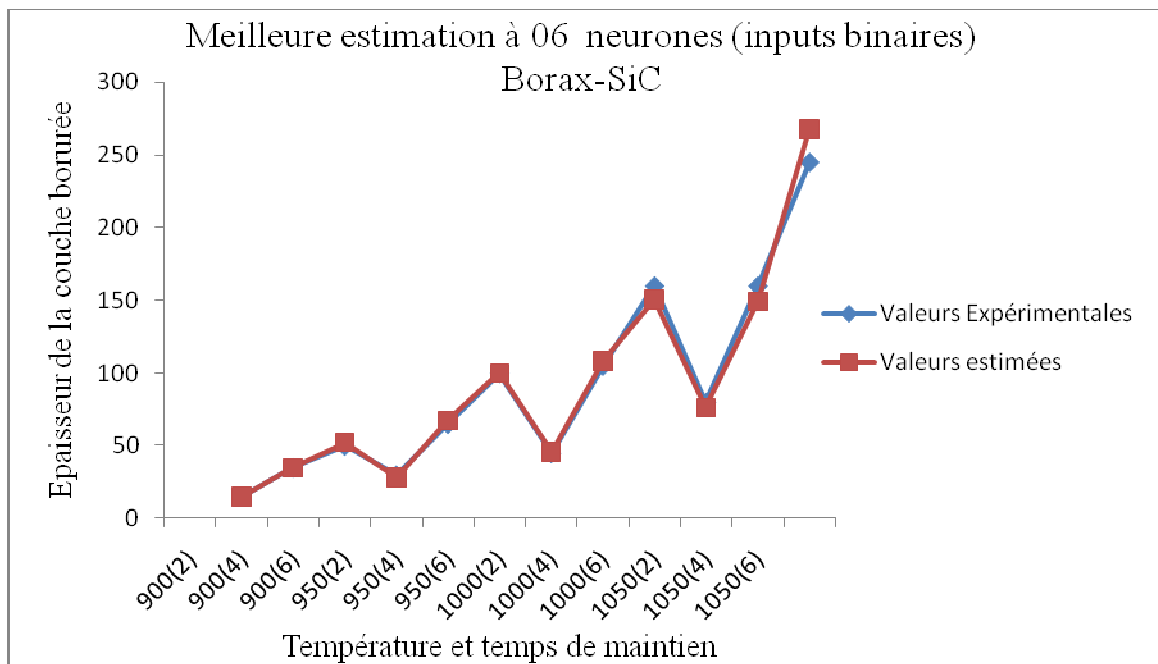


Figure 4.13 : Meilleure estimation à 06 neurones (inputs non binaires) Borax-SiC

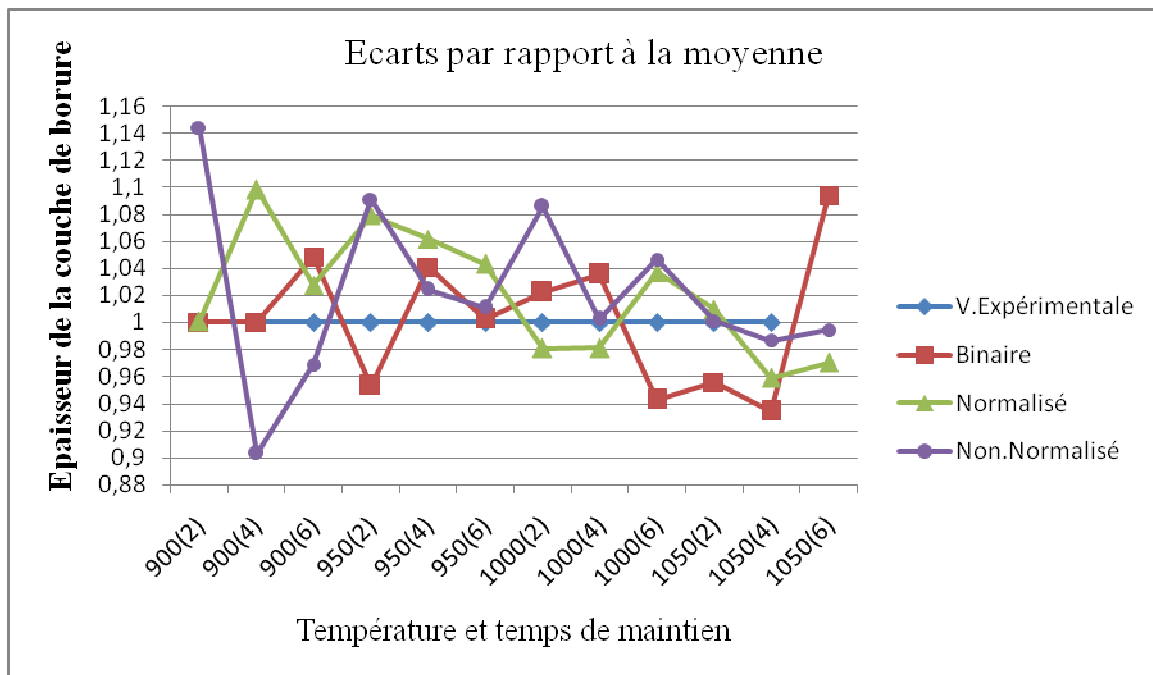


Figure 4.14 : Courbes des écarts des trois tests de la troisième expérience par rapport à la valeur expérimentale

4.7.4 Conclusion de la troisième partie :

Les tableaux (de 61 à 90 en annexe) représente tout les tests aux valeurs normalisés, les meilleures estimations sont retenues (annexe : page 106 Tableau 68, page 112 Tableau 79 et page 113 Tableau 82).

Les pourcentages d'erreurs minimales obtenus pour chaque type d'essai sont synthétisés dans le tableau Suivant:

% Erreur Max	Type de données	Nombre Neurones utilisées	Réf
12.61 %	inputs non normalisé	10	Tableau.4.13
8.95 %	inputs normalisés	11	Tableau.4.14
8.58 %	inputs binarisés	06	Tableau. 4.15

Tableau 4.16 : Synthèse des Résultats obtenu pour le Borax-Sic

L'interface graphique du réseau de neurone sous MatLab nous montre une augmentation des nombres des inputs de deux(02) Fig. 4.15 Pour les valeurs normalises et non normalisé ; au nombre de quatorze (14) pour les inputs binaires Fig.4.16

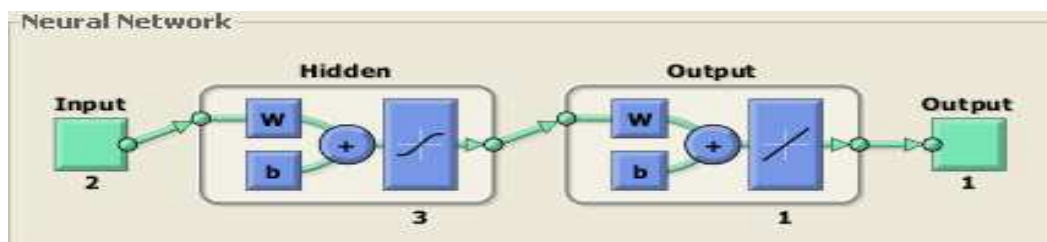


Figure 4.15 : Prise de vue d'une interface graphique (apprentissage des valeurs normalisées).

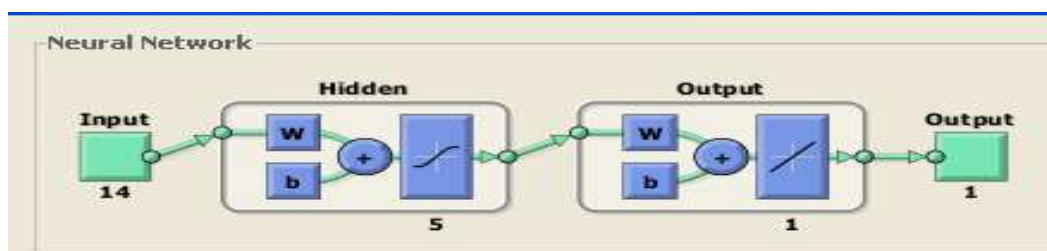


Figure 4.16 : Prise de vue d'une interface graphique (apprentissage des valeurs binaires)

Conclusion :

D'après les résultats obtenus par les réseaux de neurones on peut ainsi conclure que le nombre des variables d'entrées (les inputs) jouent un rôle primordial dans la précision des résultats.

Dans la première expérience du bain de Borax-B₄C en fait varier les températures de traitement de 800-850-900 et 950 °C avec trois temps de maintien 2-4 et 6 heures pour chaque température.

La meilleure estimation est obtenue dans le cas où les valeurs des entrées « température et temps de maintien » sont converties en binaire, la valeur de l'erreur minimale est de 5,88%.

Dans la deuxième expérience du bain de Borax-Al, les températures de traitement varient de 850-900-950 et 1000°C, avec le même temps de maintien pour chaque température.

La meilleure estimation est obtenue en binaire avec une erreur minimale de 8,58%.

Dans la troisième expérience le bain utilise est le Borax-SiC, les températures de traitement dans cette dernière expérience varient de 900-950-1000 et 1050°C, avec toujours le même temps de maintien, le pourcentage de l'erreur minimale de la meilleur estimation est de 5,74% obtenue aussi en binaire.

La prédiction des couches de borures par les réseaux de neurones donnent des résultats satisfaisants chaque fois que le nombre des variables d'entrée (inputs) est considérable.

Les meilleurs résultats dans notre travail ont été obtenus avec des valeurs d'entrées converties en binaire, où le nombre des inputs augmente à 14 entrées au lieu de 2 pour les deux premiers tests normalisée et non normalisés.

Ce résultat se révèle très acceptable surtout quand il s'agit d'un phénomène complexe tel que la diffusion.

Dans l'ensemble des expériences l'erreur moyenne des bonnes estimations est environ 10%, ce pourcentage nous permet de prédire l'épaisseur de la couche diffuse de bore avec une bonne précision, en se limitant dans une plage de température et de temps de maintien bien précise.

Références:

- [1]: YuXi Liu and ZhiFeng Zhang, Application of Neural Network on Solid Borinizing Software D-S Huang et al.(Eds.):ICIC 2011, LNBI 6840, pp 1-7 2012 Springer. College Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, China
- [2]: Kenan Genel, Use of artificial neural network for prediction of ion nitrided case depth in Fe–Cr alloys, Volume 24, Issue 3, May 2003, Pages 203–207, Mechanical Engineering Departement ,Sakarya University ,54187 Sakarya Turkey
- [3]: Introduction to material science & engineering. Mark Robert de Guirerev 2/10/03
- [4]: Diffusion in solids P.M.Wood Adams 2008 Concordia University
- [5]: Theory of diffusion Dr Nandita Dasgupta continuing education Indian Institut of Technology, 2009 .[www. iitd.ac.in](http://www.iitd.ac.in).
- [6]: Le courrier technique d’OTUA N°11. B.Millet
- [7]: Mémoire de magister Hireche Ahmed: Etude de la résistance à l’usure des couches borurées réalisées sur un Acier XC38. Université de Blida 2005.
- [8]: M. Keddam, M. Ortiz-Domínguez, I. Campos-Silva, J. Martínez-Trinidad, A simple model for the growth kinetics of Fe₂B iron boride on pure iron substrate, Applied Surface Science 256 (2010) 3128-3132
- [9]: Kunst H., Schaaber O., Beobachtungen beim Oberftachenborieren von Stachl III-Boriervverfahren, Harterei-Technische Mitteilungen, 1967, 22 1-25.
- [10]: Claude Touzet, ”Les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme”, Ecole Supérieure d’Electricité de Rennes, France, ,1992. [11]: R. Rosenblatt. *Principles of Neurodynamics*. Spartan Books, 1962.

[12]: D. O. Hebb. *The Organization of Behavior*. John Wiley & Sons, New York, 1949

[13]: Influence des paramètres texturaux sur les performances des réseaux de neurones pour la classification d'images de télédétection .Marrakchi Olfa, Elghali Amira, Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie (INSAT), Centre Urbain Nord, BP 676, 2080, Tunis, Tunisie, Laboratoire des Systèmes et de Traitement des Signaux, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT). BP 37 Belvédère 1002, Tunisie

[14]: Artificial Neural Network Prediction of Fretting Wear Behavior of Structural Steel, En 24 against Bearing Steel, En 31 R.Ramesh and R.Gnanamoorthy Journal of Materials Engineering and Performance Volume 16, Number 6 (2007), 703-709, DOI: 10.1007/s11665-007-9100-9.

Annexe

Cette annexe contient tous les tableaux de calcul réalisés dans le cadre de ce travail des trois expériences.

Les tableaux de la meilleure estimation ont une couleur de fond différente.

1 Première expérience :

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
800	2	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	25,64	2,48
800	4	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	50,94	1,84
800	6	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	75,13	0,18
850	2	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	44,24	1,72
850	4	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	73,89	5,26
850	6	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	109,59	13,31
900	2	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	71,66	2,31
900	4	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	108,73	1,17
900	6	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	149,62	3,09
950	2	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	107,76	2,56
950	4	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	145,50	16,84
950	6	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	196,32	1,87
												Erreur max=	16,84	

Tableau 1 : Essai N°1(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 03 neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
800	2	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	24,90	0,39
800	4	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	47,37	5,55
800	6	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	71,45	4,97
850	2	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	40,30	11,66
850	4	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	75,72	7,55
850	6	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	97,77	2,83
900	2	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	75,87	7,73
900	4	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	123,78	11,13
900	6	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	148,26	2,20
950	2	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	98,33	6,79
950	4	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	150,74	12,78
950	6	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	181,94	9,92
												Erreur max=	12,78	

Tableau 2: Essai N°2(Borax-B4C): 01 couche cachée à 04 neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
800	2	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	35,25	29,08
800	4	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	51,59	3,08
800	6	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	78,07	3,94
850	2	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	47,30	4,85
850	4	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	72,39	3,30
850	6	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	96,90	1,96
900	2	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	68,25	2,57
900	4	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	105,92	3,85
900	6	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	139,23	4,14
950	2	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	104,59	0,39
950	4	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	169,41	0,35
950	6	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	198,23	0,89
												% Erreur max=	29,08	

Tableau 3 : Essai N°3(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 05 neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
800	2	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	41,81	40,21
800	4	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	48,16	3,83
800	6	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	70,45	6,46
850	2	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	46,42	3,05
850	4	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	67,23	4,12
850	6	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	99,97	4,97
900	2	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	67,30	4,01
900	4	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	111,86	1,67
900	6	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	142,97	1,42
950	2	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	102,72	2,22
950	4	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	174,40	2,52
950	6	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	207,14	3,45
												% Erreur max=	40,21	

Tableau 4 : Essai N°4(Borax-B4C):01 couche cachée à 06 neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
800	2	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	25,02	0,09
800	4	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	52,80	5,30
800	6	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	76,72	2,24
850	2	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	40,59	10,86
850	4	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	73,70	5,01
850	6	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	99,25	4,28
900	2	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	90,00	22,22
900	4	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	100,88	9,05
900	6	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	139,73	3,77
950	2	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	97,44	7,76
950	4	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	171,47	0,86
950	6	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	200,31	0,15
												% Erreur max=		22,22

Tableau 5 : Essai N°5(Borax-B4C):01couche cachée à 07 neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
800	2	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	24,50	2,04
800	4	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	48,00	4,17
800	6	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	74,75	0,33
850	2	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	43,88	2,56
850	4	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	64,17	9,09
850	6	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	95,29	0,30
900	2	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	72,71	3,73
900	4	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	112,00	1,79
900	6	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	146,11	0,76
950	2	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	110,50	4,98
950	4	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	156,67	8,51
950	6	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	221,40	9,67
												% Erreur max=		9,67

Tableau 6: Essai N°6(Borax-B4C) 01 couche cachée à 08 neurones (input non normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
800	2	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	26,34	5,08
800	4	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	51,04	2,03
800	6	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	80,62	6,98
850	2	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	46,43	3,09
850	4	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	70,43	0,61
850	6	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	95,54	0,57
900	2	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	71,89	2,63
900	4	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	110,79	0,71
900	6	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	126,12	14,97
950	2	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	94,52	11,09
950	4	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	176,29	3,57
950	6	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	227,49	12,09
												% Erreur max=	14,97	

Tableau 7 : Essai N°7(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 09 neurones (inputs non normalisé)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
800	2	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	24,25	3,08
800	4	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	48,52	3,06
800	6	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	70,65	6,16
850	2	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	48,02	6,28
850	4	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	65,64	6,64
850	6	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	96,48	1,53
900	2	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	83,46	16,13
900	4	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	114,06	3,56
900	6	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	133,49	8,63
950	2	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	105,07	0,07
950	4	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	154,11	10,31
950	6	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	197,56	1,23
												Erreur max=	16,13	

Tableau 8: Essai N°8(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 10 neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales										Valeurs Moyenne	Valeurs estimées	(%)
800	2	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	25,96	3,70
800	4	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	57,67	13,30
800	6	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	77,27	2,94
850	2	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	47,81	5,88
850	4	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	69,21	1,14
850	6	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	93,99	1,07
900	2	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	62,31	12,35
900	4	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	113,45	3,04
900	6	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	136,45	6,27
950	2	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	94,86	10,69
950	4	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	165,62	2,65
950	6	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	193,40	3,41
													Erreur max= 13,30	

Tableau 9 Essai N°9(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 11neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H); couche diffuse de bore(um)	Valeurs Désirées										Valeurs estimées	(%)	
800	2	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	24,14	3,55
800	4	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	51,62	3,15
800	6	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	74,87	0,17
850	2	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	46,43	3,08
850	4	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	69,22	1,12
850	6	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	95,29	0,30
900	2	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	61,50	13,82
900	4	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	106,75	3,04
900	6	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	159,40	9,03
950	2	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	108,00	2,78
950	4	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	177,43	4,19
950	6	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	210,17	4,84
													Erreur max= 13,82	

Tableau 10 Essai N°9(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 12neurones (inputs non normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	23	21	16	20	26	28	29	35	30	25	33,40	25,15
0.1	0.55	36	42	45	48	37	68	57	55	59	53	50	43,48	15,00
0.1	1	70	62	57	69	71	87	85	81	89	79	75	73,88	1,52
0.4	0.1	32	36	34	42	31	55	52	60	51	57	45	41,56	8,28
0.4	0.55	60	52	56	63	52	88	85	92	77	75	70	65,20	7,36
0.4	1	80	78	85	75	91	113	125	105	100	98	95	99,20	4,24
0.7	0.1	65	48	55	62	53	90	86	87	78	76	70	60,55	15,61
0.7	0.55	96	102	85	100	99	129	137	125	110	117	110	115,97	5,14
0.7	1	126	135	105	100	132	185	175	155	172	165	145	148,50	2,36
1	0.1	90	82	78	95	92	130	110	120	125	128	105	105,75	0,71
1	0.55	120	142	135	118	145	210	200	205	212	213	170	194,04	12,39
1	1	168	155	150	175	172	220	225	248	242	245	200	211,69	5,52
												% Erreur max= 25,15		

Tableau 11: Essai N°1(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 03 neurones (inputs normalisé)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	23	21	16	20	26	28	29	35	30	25	26,25	4,76
0.1	0.55	36	42	45	48	37	68	57	55	59	53	50	55,67	10,18
0.1	1	70	62	57	69	71	87	85	81	89	79	75	77,00	2,60
0.4	0.1	32	36	34	42	31	55	52	60	51	57	45	47,44	5,13
0.4	0.55	60	52	56	63	52	88	85	92	77	75	70	76,00	7,89
0.4	1	80	78	85	75	91	113	125	105	100	98	95	90,50	4,97
0.7	0.1	65	48	55	62	53	90	86	87	78	76	70	73,00	4,11
0.7	0.55	96	102	85	100	99	129	137	125	110	117	110	112,57	2,28
0.7	1	126	135	105	100	132	185	175	155	172	165	145	137,86	5,18
1	0.1	90	82	78	95	92	130	110	120	125	128	105	103,75	1,20
1	0.55	120	142	135	118	145	210	200	205	212	213	170	145,33	16,97
1	1	168	155	150	175	172	220	225	248	242	245	200	182,60	9,53
												% Erreur max= 16,97		

Tableau 12: Essai N°2(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 04 neurones (inputs normalisé)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	23	21	16	20	26	28	29	35	30	25	17,30	44,54
0.1	0.55	36	42	45	48	37	68	57	55	59	53	50	48,61	2,86
0.1	1	70	62	57	69	71	87	85	81	89	79	75	75,50	0,66
0.4	0.1	32	36	34	42	31	55	52	60	51	57	45	37,20	20,98
0.4	0.55	60	52	56	63	52	88	85	92	77	75	70	65,13	7,47
0.4	1	80	78	85	75	91	113	125	105	100	98	95	97,99	3,05
0.7	0.1	65	48	55	62	53	90	86	87	78	76	70	71,10	1,55
0.7	0.55	96	102	85	100	99	129	137	125	110	117	110	111,29	1,16
0.7	1	126	135	105	100	132	185	175	155	172	165	145	150,24	3,49
1	0.1	90	82	78	95	92	130	110	120	125	128	105	115,17	8,83
1	0.55	120	142	135	118	145	210	200	205	212	213	170	188,17	9,65
1	1	168	155	150	175	172	220	225	248	242	245	200	215,10	7,02
												% Erreur max= 44,54		

Tableau 13: Essai N°3(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 05 neurones (inputs normalisé)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	23	21	16	20	26	28	29	35	30	25	26,67	6,27
0.1	0.55	36	42	45	48	37	68	57	55	59	53	50	50,57	1,12
0.1	1	70	62	57	69	71	87	85	81	89	79	75	71,07	5,52
0.4	0.1	32	36	34	42	31	55	52	60	51	57	45	43,18	4,21
0.4	0.55	60	52	56	63	52	88	85	92	77	75	70	69,94	0,09
0.4	1	80	78	85	75	91	113	125	105	100	98	95	94,62	0,40
0.7	0.1	65	48	55	62	53	90	86	87	78	76	70	67,50	3,70
0.7	0.55	96	102	85	100	99	129	137	125	110	117	110	110,16	0,15
0.7	1	126	135	105	100	132	185	175	155	172	165	145	142,01	2,11
1	0.1	90	82	78	95	92	130	110	120	125	128	105	103,59	1,37
1	0.55	120	142	135	118	145	210	200	205	212	213	170	176,25	3,54
1	1	168	155	150	175	172	220	225	248	242	245	200	221,33	9,64
												% Erreur max= 9,64		

Tableau 14: Essai N°4(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 06 neurones (inputs normalisé)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	23	21	16	20	26	28	29	35	30	25	23,59	5,97
0.1	0.55	36	42	45	48	37	68	57	55	59	53	50	55,03	9,14
0.1	1	70	62	57	69	71	87	85	81	89	79	75	75,62	0,82
0.4	0.1	32	36	34	42	31	55	52	60	51	57	45	43,14	4,31
0.4	0.55	60	52	56	63	52	88	85	92	77	75	70	71,00	1,41
0.4	1	80	78	85	75	91	113	125	105	100	98	95	87,68	8,35
0.7	0.1	65	48	55	62	53	90	86	87	78	76	70	73,08	4,22
0.7	0.55	96	102	85	100	99	129	137	125	110	117	110	103,97	5,80
0.7	1	126	135	105	100	132	185	175	155	172	165	145	138,97	4,34
1	0.1	90	82	78	95	92	130	110	120	125	128	105	118,96	11,73
1	0.55	120	142	135	118	145	210	200	205	212	213	170	173,79	2,18
1	1	168	155	150	175	172	220	225	248	242	245	200	191,16	4,62
												% Erreur max= 11,73		

Tableau 15: Essai N°5(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 07 neurones (inputs normalisé)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	23	21	16	20	26	28	29	35	30	25	27,68	9,68
0.1	0.55	36	42	45	48	37	68	57	55	59	53	50	47,75	4,71
0.1	1	70	62	57	69	71	87	85	81	89	79	75	71,39	5,05
0.4	0.1	32	36	34	42	31	55	52	60	51	57	45	43,59	3,22
0.4	0.55	60	52	56	63	52	88	85	92	77	75	70	64,23	8,99
0.4	1	80	78	85	75	91	113	125	105	100	98	95	99,48	4,51
0.7	0.1	65	48	55	62	53	90	86	87	78	76	70	74,40	5,92
0.7	0.55	96	102	85	100	99	129	137	125	110	117	110	104,28	5,49
0.7	1	126	135	105	100	132	185	175	155	172	165	145	146,24	0,85
1	0.1	90	82	78	95	92	130	110	120	125	128	105	104,21	0,76
1	0.55	120	142	135	118	145	210	200	205	212	213	170	168,14	1,10
1	1	168	155	150	175	172	220	225	248	242	245	200	211,38	5,39
												% Erreur max= 9,68		

Tableau 16 Essai N°6(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 08 neurones (inputs normalisé)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	23	21	16	20	26	28	29	35	30	25	23,84	4,87
0.1	0.55	36	42	45	48	37	68	57	55	59	53	50	49,88	0,24
0.1	1	70	62	57	69	71	87	85	81	89	79	75	81,59	8,07
0.4	0.1	32	36	34	42	31	55	52	60	51	57	45	48,21	6,65
0.4	0.55	60	52	56	63	52	88	85	92	77	75	70	63,35	10,49
0.4	1	80	78	85	75	91	113	125	105	100	98	95	91,00	4,40
0.7	0.1	65	48	55	62	53	90	86	87	78	76	70	71,91	2,66
0.7	0.55	96	102	85	100	99	129	137	125	110	117	110	109,07	0,86
0.7	1	126	135	105	100	132	185	175	155	172	165	145	144,99	0,00
1	0.1	90	82	78	95	92	130	110	120	125	128	105	102,30	2,64
1	0.55	120	142	135	118	145	210	200	205	212	213	170	165,41	2,78
1	1	168	155	150	175	172	220	225	248	242	245	200	271,16	26,24
												% Erreur max= 26,24		

Tableau 17: Essai N°7(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 09 neurones (inputs normalisé)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	23	21	16	20	26	28	29	35	30	25	25,75	2,90
0.1	0.55	36	42	45	48	37	68	57	55	59	53	50	50,71	1,39
0.1	1	70	62	57	69	71	87	85	81	89	79	75	72,65	3,24
0.4	0.1	32	36	34	42	31	55	52	60	51	57	45	45,21	0,47
0.4	0.55	60	52	56	63	52	88	85	92	77	75	70	65,78	6,41
0.4	1	80	78	85	75	91	113	125	105	100	98	95	94,59	0,44
0.7	0.1	65	48	55	62	53	90	86	87	78	76	70	67,57	3,60
0.7	0.55	96	102	85	100	99	129	137	125	110	117	110	103,24	6,54
0.7	1	126	135	105	100	132	185	175	155	172	165	145	142,86	1,50
1	0.1	90	82	78	95	92	130	110	120	125	128	105	104,01	0,95
1	0.55	120	142	135	118	145	210	200	205	212	213	170	167,94	1,23
1	1	168	155	150	175	172	220	225	248	242	245	200	197,04	1,50
												% Erreur max= 6,54		

Tableau 18: Essai N°8(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 10 neurones (inputs normalisé)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	23	21	16	20	26	28	29	35	30	25	25,88	3,38
0.1	0.55	36	42	45	48	37	68	57	55	59	53	50	50,56	1,10
0.1	1	70	62	57	69	71	87	85	81	89	79	75	74,40	0,81
0.4	0.1	32	36	34	42	31	55	52	60	51	57	45	44,80	0,45
0.4	0.55	60	52	56	63	52	88	85	92	77	75	70	79,60	12,06
0.4	1	80	78	85	75	91	113	125	105	100	98	95	97,86	2,92
0.7	0.1	65	48	55	62	53	90	86	87	78	76	70	72,00	2,78
0.7	0.55	96	102	85	100	99	129	137	125	110	117	110	115,75	4,97
0.7	1	126	135	105	100	132	185	175	155	172	165	145	150,67	3,76
1	0.1	90	82	78	95	92	130	110	120	125	128	105	105,25	0,24
1	0.55	120	142	135	118	145	210	200	205	212	213	170	163,80	3,79
1	1	168	155	150	175	172	220	225	248	242	245	200	201,33	0,66
												% Erreur max= 12,06		

Tableau 19 : Essai N°9(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 11 neurones (inputs normalisé)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales										Valeurs Moyennes	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	23	21	16	20	26	28	29	35	30	25	21,47	16,43
0.1	0.55	36	42	45	48	37	68	57	55	59	53	50	56,07	10,83
0.1	1	70	62	57	69	71	87	85	81	89	79	75	76,24	1,63
0.4	0.1	32	36	34	42	31	55	52	60	51	57	45	47,51	5,29
0.4	0.55	60	52	56	63	52	88	85	92	77	75	70	74,11	5,54
0.4	1	80	78	85	75	91	113	125	105	100	98	95	98,83	3,87
0.7	0.1	65	48	55	62	53	90	86	87	78	76	70	68,57	2,08
0.7	0.55	96	102	85	100	99	129	137	125	110	117	110	110,85	0,77
0.7	1	126	135	105	100	132	185	175	155	172	165	145	155,35	6,66
1	0.1	90	82	78	95	92	130	110	120	125	128	105	108,93	3,60
1	0.55	120	142	135	118	145	210	200	205	212	213	170	169,06	0,55
1	1	168	155	150	175	172	220	225	248	242	245	200	195,44	2,33
												Erreur max= 16,43		

Tableau 20 : Essai N°9(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 12neurones (inputs normalisé)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales										Valeurs Moyennes	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	25,22	0,88
1100100000	100	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	52,05	3,93
1100100000	110	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	73,76	1,68
1101010010	010	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	46,04	2,25
1101010010	100	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	80,39	12,93
1101010010	110	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	89,58	6,06
1110000100	010	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	70,35	0,50
1110000100	100	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	104,99	4,77
1110000100	110	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	147,70	1,83
1110110110	010	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	109,76	4,33
1110110110	100	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	161,84	5,04
1110110110	110	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	188,66	6,01
												Erreur max= 12,9		

Tableau 21: Essai N°1 (Borax-B4C): 01 couche cachée à 05neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Moyennes	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	24,64	1,46
1100100000	100	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	49,44	1,13
1100100000	110	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	71,14	5,43
1101010010	010	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	47,01	4,28
1101010010	100	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	68,39	2,36
1101010010	110	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	96,74	1,80
1110000100	010	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	66,73	4,90
1110000100	100	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	103,89	5,88
1110000100	110	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	150,14	3,43
1110110110	010	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	110,37	4,87
1110110110	100	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	174,39	2,52
1110110110	110	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	189,11	5,76
												% Erreur max= 5,88		

Tableau 22: Essai N°1 (Borax-B4C): 01 couche cachée à 06neurones (inputs binarisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	25,00	0,00
1100100000	100	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	50,00	0,00
1100100000	110	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	81,83	8,35
1101010010	010	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	44,83	0,37
1101010010	100	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	69,83	0,24
1101010010	110	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	91,29	4,07
1110000100	010	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	74,63	6,20
1110000100	100	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	111,00	0,90
1110000100	110	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	147,00	1,36
1110110110	010	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	110,00	4,55
1110110110	100	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	154,71	9,88
1110110110	110	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	198,25	0,88
													% Erreur max=	9,88

Tableau 23: Essai N°2(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 07neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	23,01	8,66
1100100000	100	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	52,18	4,18
1100100000	110	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	78,85	4,88
1101010010	010	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	48,07	6,39
1101010010	100	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	69,69	0,44
1101010010	110	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	95,79	0,82
1110000100	010	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	71,81	2,52
1110000100	100	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	111,83	1,64
1110000100	110	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	150,17	3,45
1110110110	010	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	110,53	5,00
1110110110	100	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	194,83	12,75
1110110110	110	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	207,33	3,53
													% Erreur max=	12,75

Tableau 24: Essai N°3 (Borax-B4C): 01 couche cachée à 08 neurones (inputs binarisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	27,29	8,38
1100100000	100	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	51,40	2,72
1100100000	110	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	82,00	8,54
1101010010	010	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	49,33	8,78
1101010010	100	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	67,50	3,70
1101010010	110	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	94,83	0,18
1110000100	010	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	67,29	4,03
1110000100	100	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	107,50	2,33
1110000100	110	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	149,00	2,68
1110110110	010	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	106,67	1,56
1110110110	100	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	171,50	0,87
1110110110	110	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	188,75	5,96
												% Erreur max=	8,78	

Tableau 25: Essai N°4(Borax-B4C): 01 couche cachée à 09 neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	24,33	25,53	4,70
1100100000	100	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50,00	49,47	1,06
1100100000	110	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	78,75	74,80	5,28
1101010010	010	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	43,80	44,20	0,89
1101010010	100	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	68,50	63,35	8,13
1101010010	110	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	97,12	100,63	3,49
1110000100	010	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	68,22	67,67	0,81
1110000100	100	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	108,13	111,64	3,14
1110000100	110	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	147,11	150,51	2,26
1110110110	010	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	106,71	100,13	6,57
1110110110	100	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	155,00	166,67	7,00
1110110110	110	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200,00	201,2857143	0,64
												% Erreur max=	8,13	

Tableau 26: Essai N°5(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 10 neurones (inputs binarisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	24,20	3,32
1100100000	100	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	47,79	4,63
1100100000	110	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	71,39	5,05
1101010010	010	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	46,85	3,95
1101010010	100	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	70,89	1,26
1101010010	110	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	95,53	0,56
1110000100	010	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	70,05	0,07
1110000100	100	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	108,92	0,99
1110000100	110	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	138,38	4,78
1110110110	010	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	104,61	0,37
1110110110	100	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	187,13	9,15
1110110110	110	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	183,64	8,91
													% Erreur max=	9,15

Tableau 27: Essai N°6(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 11 neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	24,44	2,27
1100100000	100	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	51,56	3,02
1100100000	110	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	76,40	1,83
1101010010	010	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	47,40	5,06
1101010010	100	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	71,43	2,00
1101010010	110	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	95,00	0,00
1110000100	010	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	78,80	11,17
1110000100	100	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	103,43	6,35
1110000100	110	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	137,88	5,17
1110110110	010	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	98,00	7,14
1110110110	100	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	176,71	3,80
1110110110	110	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	204,43	2,17
													% Erreur max=	11,17

Tableau 28: Essai N°7(Borax-B4C) : 01 couche cachée à 12neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	23,50	6,37
1100100000	100	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	50,96	1,88
1100100000	110	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	80,29	6,59
1101010010	010	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	43,64	3,11
1101010010	100	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	74,89	6,53
1101010010	110	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	92,47	2,74
1110000100	010	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	66,04	6,00
1110000100	100	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	111,43	1,29
1110000100	110	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	143,44	1,09
1110110110	010	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	100,18	4,81
1110110110	100	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	164,35	3,44
1110110110	110	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	203,68	1,81
														Erreur max= 6,59

Tableau 29: Essai N°8 (Borax-B4C): 01 couche cachée à 13 neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	26	23	28	21	29	16	35	20	30	25	22,83	9,49
1100100000	100	36	68	42	57	45	55	48	59	37	53	50	47,00	6,38
1100100000	110	70	87	62	85	57	81	69	89	71	79	75	76,57	2,05
1101010010	010	32	55	36	52	34	60	42	51	31	57	45	47,43	5,12
1101010010	100	60	88	52	85	56	92	63	77	52	75	70	71,43	2,00
1101010010	110	80	113	78	125	85	105	75	100	91	98	95	95,13	0,13
1110000100	010	65	90	48	86	55	87	62	78	53	76	70	67,29	4,03
1110000100	100	96	129	102	137	85	125	100	110	99	117	110	109,00	0,92
1110000100	110	126	185	135	175	105	155	100	172	132	165	145	132,00	9,85
1110110110	010	90	130	82	110	78	120	95	125	82	128	105	109,50	4,11
1110110110	100	120	210	142	200	135	205	118	212	145	213	170	172,83	1,64
1110110110	110	168	220	155	225	150	248	175	242	172	245	200	200,63	0,31
														% Erreur max= 9,85

Tableau 30: Essai N°9 (Borax-B4C): 01 couche cachée à 14 neurones (inputs binarisés)

2 Deuxième expérience :

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
850	2	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	28,01	10,76
850	4	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	43,48	26,48
850	6	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	67,86	17,88
900	2	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	44,56	0,99
900	4	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	69,54	22,23
900	6	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	105,29	4,48
950	2	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	71,76	9,42
950	4	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	108,32	10,79
950	6	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	153,58	10,69
1000	2	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	111,89	10,63
1000	4	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	157,67	14,16
1000	6	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	204,88	19,58
												Erreur max=	26,48	

Tableau 31: Essai N°1 (Borax-A1) : 01 couche cachée à 03neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
850	2	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	23,01	8,67
850	4	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	40,45	35,98
850	6	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	72,57	10,24
900	2	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	40,00	12,49
900	4	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	71,79	18,40
900	6	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	122,06	9,88
950	2	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	71,03	8,48
950	4	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	120,96	0,79
950	6	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	183,20	7,20
1000	2	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	119,87	16,57
1000	4	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	182,01	1,11
1000	6	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	239,78	2,18
												Erreur max=	35,98	

Tableau 32: Essai N°2 (Borax-A1) : 01 couche cachée à 04neurones (inputs non normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
850	2	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	23,54	6,20
850	4	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	60,63	9,29
850	6	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	83,37	4,04
900	2	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	53,38	15,69
900	4	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	83,60	1,68
900	6	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	112,57	2,28
950	2	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	62,23	4,45
950	4	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	103,30	16,17
950	6	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	166,25	2,25
1000	2	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	106,60	6,19
1000	4	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	163,66	9,99
1000	6	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	234,59	4,44
												% Erreur max=	16,17	

Tableau 33: Essai N°3 (Borax-AI) : 01 couche cachée à 05neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
850	2	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	20,98	19,16
850	4	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	38,40	43,22
850	6	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	72,70	10,04
900	2	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	35,89	25,37
900	4	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	68,11	24,80
900	6	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	122,44	10,16
950	2	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	64,21	1,23
950	4	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	116,57	2,94
950	6	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	185,02	8,12
1000	2	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	111,31	10,16
1000	4	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	179,17	0,46
1000	6	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	243,10	0,78
												% Erreur max=	43,22	

Tableau 34 Essai N°4 (Borax-AI) : 01 couche cachée à 06neurones (inputs non normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
850	2	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	49,33	49,32
850	4	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	49,26	11,66
850	6	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	49,19	62,63
900	2	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	75,27	40,21
900	4	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	75,11	13,16
900	6	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	74,97	46,73
950	2	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	118,00	44,91
950	4	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	117,80	1,87
950	6	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	117,60	44,56
1000	2	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	164,97	39,38
1000	4	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	164,85	9,19
1000	6	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	164,74	48,72
												% Erreur max=	62,63	

Tableau 35: Essai N°5 (Borax-A1) : 01 couche cachée à 07neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
850	2	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	26,20	4,58
850	4	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	41,39	32,90
850	6	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	66,23	20,80
900	2	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	38,89	15,71
900	4	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	64,60	31,58
900	6	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	104,18	5,59
950	2	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	66,14	1,72
950	4	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	108,18	10,93
950	6	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	162,41	4,68
1000	2	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	120,44	16,97
1000	4	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	176,10	2,22
1000	6	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	229,44	6,78
												% Erreur max=	32,9	

Tableau 36: Essai N°6 (Borax-A1) : 01 couche cachée à 08neurones (inputs non normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
850	2	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	24,84	0,64
850	4	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	41,62	32,14
850	6	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	70,56	13,38
900	2	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	41,49	8,46
900	4	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	70,88	19,91
900	6	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	115,57	4,82
950	2	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	72,07	9,81
950	4	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	117,31	2,29
950	6	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	173,14	1,81
1000	2	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	121,20	17,49
1000	4	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	176,72	1,85
1000	6	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	229,46	6,77
												% Erreur max=	32,14	

Tableau 37: Essai N°7 (Borax-A1) : 01 couche cachée à 09neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
850	2	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	25,23	0,92
850	4	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	51,18	7,45
850	6	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	82,26	2,75
900	2	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	43,20	4,17
900	4	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	77,56	9,60
900	6	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	112,03	1,81
950	2	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	72,46	10,30
950	4	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	128,16	6,36
950	6	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	174,49	2,58
1000	2	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	103,66	3,53
1000	4	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	184,59	2,49
1000	6	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	249,37	1,75
												% Erreur max=	10,3	

Tableau 38: Essai N°8 (Borax-A1) : 01 couche cachée à 10neurones (inputs non normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
850	2	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	31,41	20,42
850	4	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	50,91	8,04
850	6	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	80,01	0,01
900	2	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	43,08	4,46
900	4	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	73,69	15,35
900	6	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	117,50	6,38
950	2	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	67,87	4,22
950	4	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	116,54	2,97
950	6	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	175,89	3,35
1000	2	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	109,53	8,70
1000	4	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	174,99	2,86
1000	6	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	235,90	3,86
													Erreur max=	20,42

Tableau 39 : Essai N°9 (Borax-Al) : 01 couche cachée à 1 neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales										Valeurs Moyennes	Valeurs estimées	(%)
850	2	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	23,95	4,40
850	4	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	43,20	27,32
850	6	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	79,40	0,75
900	2	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	39,50	13,94
900	4	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	72,80	16,76
900	6	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	126,91	13,33
950	2	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	66,72	2,57
950	4	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	117,90	1,78
950	6	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	184,19	7,70
1000	2	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	109,83	8,95
1000	4	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	175,07	2,82
1000	6	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	238,31	2,81
													Erreur max=	27,32

Tableau 40 : Essai N°9 (Borax-Al) : 01 couche cachée à 12neurones (inputs non normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	29	23	28	18	31	15	34	20	30	25	31,95	21,75
0.1	0.55	37	76	47	60	44	72	48	62	39	65	55	72,03	23,64
0.1	1	68	96	55	92	52	98	72	105	62	100	80	29,51	171,11
0.4	0.1	28	62	36	55	34	52	40	53	33	57	45	46,38	2,97
0.4	0.55	70	110	65	105	60	97	66	100	62	115	85	87,95	3,36
0.4	1	90	130	84	136	92	128	95	125	88	132	110	58,97	86,53
0.7	0.1	55	88	45	80	54	81	52	75	50	70	65	66,64	2,46
0.7	0.55	97	140	102	144	88	134	100	148	95	152	120	123,93	3,17
0.7	1	137	208	135	205	120	215	130	195	140	215	170	150,01	13,33
1	0.1	88	120	82	125	90	115	76	112	92	100	100	95,39	4,83
1	0.55	135	222	140	215	148	205	130	225	150	230	180	186,10	3,28
1	1	187	290	178	300	165	315	195	305	190	325	245	222,54	10,09
												% Erreur max=		171,11

Tableau 41: Essai N°1 (Borax-Al) : 01 couche cachée à 03neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	29	23	28	18	31	15	34	20	30	25	27,15	7,92
0.1	0.55	37	76	47	60	44	72	48	62	39	65	55	50,65	8,59
0.1	1	68	96	55	92	52	98	72	105	62	100	80	83,32	3,98
0.4	0.1	28	62	36	55	34	52	40	53	33	57	45	46,73	3,69
0.4	0.55	70	110	65	105	60	97	66	100	62	115	85	87,79	3,17
0.4	1	90	130	84	136	92	128	95	125	88	132	110	104,52	5,24
0.7	0.1	55	88	45	80	54	81	52	75	50	70	65	64,60	0,62
0.7	0.55	97	140	102	144	88	134	100	148	95	152	120	113,51	5,72
0.7	1	137	208	135	205	120	215	130	195	140	215	170	174,69	2,68
1	0.1	88	120	82	125	90	115	76	112	92	100	100	98,15	1,88
1	0.55	135	222	140	215	148	205	130	225	150	230	180	188,25	4,38
1	1	187	290	178	300	165	315	195	305	190	325	245	239,28	2,39
												% Erreur max=		8,59

Tableau 42: Essai N°2 (Borax-Al) : 01 couche cachée à 04neurones (inputs normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	29	23	28	18	31	15	34	20	30	25	32,98	24,21
0.1	0.55	37	76	47	60	44	72	48	62	39	65	55	53,95	1,94
0.1	1	68	96	55	92	52	98	72	105	62	100	80	75,40	6,11
0.4	0.1	28	62	36	55	34	52	40	53	33	57	45	45,00	0,01
0.4	0.55	70	110	65	105	60	97	66	100	62	115	85	78,04	8,92
0.4	1	90	130	84	136	92	128	95	125	88	132	110	102,00	7,84
0.7	0.1	55	88	45	80	54	81	52	75	50	70	65	63,98	1,60
0.7	0.55	97	140	102	144	88	134	100	148	95	152	120	127,26	5,71
0.7	1	137	208	135	205	120	215	130	195	140	215	170	166,31	2,22
1	0.1	88	120	82	125	90	115	76	112	92	100	100	88,56	12,91
1	0.55	135	222	140	215	148	205	130	225	150	230	180	192,52	6,50
1	1	187	290	178	300	165	315	195	305	190	325	245	261,09	6,16
												% Erreur max=	24,21	

Tableau 43: Essai N°3 (Borax-AI) : 01 couche cachée à 05neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	29	23	28	18	31	15	34	20	30	25	29,02	13,84
0.1	0.55	37	76	47	60	44	72	48	62	39	65	55	60,83	9,59
0.1	1	68	96	55	92	52	98	72	105	62	100	80	80,30	0,37
0.4	0.1	28	62	36	55	34	52	40	53	33	57	45	47,59	5,44
0.4	0.55	70	110	65	105	60	97	66	100	62	115	85	86,98	2,28
0.4	1	90	130	84	136	92	128	95	125	88	132	110	118,41	7,10
0.7	0.1	55	88	45	80	54	81	52	75	50	70	65	66,33	2,01
0.7	0.55	97	140	102	144	88	134	100	148	95	152	120	120,75	0,62
0.7	1	137	208	135	205	120	215	130	195	140	215	170	160,00	6,25
1	0.1	88	120	82	125	90	115	76	112	92	100	100	93,00	7,53
1	0.55	135	222	140	215	148	205	130	225	150	230	180	170,83	5,37
1	1	187	290	178	300	165	315	195	305	190	325	245	238,57	2,70
												% Erreur max=	13,84	

Tableau 44: Essai N°4 (Borax-AI) : 01 couche cachée à 06neurones (inputs normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	29	23	28	18	31	15	34	20	30	25	15,02	66,41
0.1	0.55	37	76	47	60	44	72	48	62	39	65	55	84,73	35,09
0.1	1	68	96	55	92	52	98	72	105	62	100	80	97,02	17,54
0.4	0.1	28	62	36	55	34	52	40	53	33	57	45	40,17	12,02
0.4	0.55	70	110	65	105	60	97	66	100	62	115	85	81,47	4,33
0.4	1	90	130	84	136	92	128	95	125	88	132	110	65,13	68,89
0.7	0.1	55	88	45	80	54	81	52	75	50	70	65	69,95	7,08
0.7	0.55	97	140	102	144	88	134	100	148	95	152	120	112,77	6,41
0.7	1	137	208	135	205	120	215	130	195	140	215	170	120,29	41,33
1	0.1	88	120	82	125	90	115	76	112	92	100	100	102,27	2,22
1	0.55	135	222	140	215	148	205	130	225	150	230	180	176,33	2,08
1	1	187	290	178	300	165	315	195	305	190	325	245	252,07	2,81
												% Erreur max= 68,89		

Tableau 45: Essai N°5 (Borax-Al) : 01 couche cachée à 07neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	29	23	28	18	31	15	34	20	30	25	21,81	14,65
0.1	0.55	37	76	47	60	44	72	48	62	39	65	55	54,67	0,61
0.1	1	68	96	55	92	52	98	72	105	62	100	80	80,29	0,36
0.4	0.1	28	62	36	55	34	52	40	53	33	57	45	48,00	6,25
0.4	0.55	70	110	65	105	60	97	66	100	62	115	85	95,40	10,90
0.4	1	90	130	84	136	92	128	95	125	88	132	110	104,33	5,43
0.7	0.1	55	88	45	80	54	81	52	75	50	70	65	69,01	5,80
0.7	0.55	97	140	102	144	88	134	100	148	95	152	120	113,00	6,19
0.7	1	137	208	135	205	120	215	130	195	140	215	170	129,00	31,78
1	0.1	88	120	82	125	90	115	76	112	92	100	100	97,50	2,56
1	0.55	135	222	140	215	148	205	130	225	150	230	180	178,84	0,65
1	1	187	290	178	300	165	315	195	305	190	325	245	259,00	5,41
												% Erreur max= 31,78		

Tableau 46: Essai N°6 (Borax-Al) : 01 couche cachée à 08neurones (inputs normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	29	23	28	18	31	15	34	20	30	25	49,04	49,02
0.1	0.55	37	76	47	60	44	72	48	62	39	65	55	96,18	42,81
0.1	1	68	96	55	92	52	98	72	105	62	100	80	316,57	74,73
0.4	0.1	28	62	36	55	34	52	40	53	33	57	45	59,73	24,66
0.4	0.55	70	110	65	105	60	97	66	100	62	115	85	129,20	34,21
0.4	1	90	130	84	136	92	128	95	125	88	132	110	270,77	59,37
0.7	0.1	55	88	45	80	54	81	52	75	50	70	65	109,03	40,38
0.7	0.55	97	140	102	144	88	134	100	148	95	152	120	283,57	57,68
0.7	1	137	208	135	205	120	215	130	195	140	215	170	169,38	0,36
1	0.1	88	120	82	125	90	115	76	112	92	100	100	217,96	54,12
1	0.55	135	222	140	215	148	205	130	225	150	230	180	207,69	13,33
1	1	187	290	178	300	165	315	195	305	190	325	245	164,88	48,59
												% Erreur max= 74,73		

Tableau 47: Essai N°7 (Borax-AI) : 01 couche cachée à 09neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	29	23	28	18	31	15	34	20	30	25	27,50	9,08
0.1	0.55	37	76	47	60	44	72	48	62	39	65	55	55,40	0,72
0.1	1	68	96	55	92	52	98	72	105	62	100	80	85,83	6,80
0.4	0.1	28	62	36	55	34	52	40	53	33	57	45	46,83	3,91
0.4	0.55	70	110	65	105	60	97	66	100	62	115	85	98,83	14,00
0.4	1	90	130	84	136	92	128	95	125	88	132	110	110,50	0,45
0.7	0.1	55	88	45	80	54	81	52	75	50	70	65	66,29	1,94
0.7	0.55	97	140	102	144	88	134	100	148	95	152	120	106,20	12,99
0.7	1	137	208	135	205	120	215	130	195	140	215	170	155,00	9,68
1	0.1	88	120	82	125	90	115	76	112	92	100	100	90,00	11,11
1	0.55	135	222	140	215	148	205	130	225	150	230	180	174,71	3,03
1	1	187	290	178	300	165	315	195	305	190	325	245	246,63	0,66
												% Erreur max= 14,00		

Tableau 48: Essai N°8(Borax-AI) : 01 couche cachée à 10neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	22	29	23	28	18	31	15	34	20	30	25	25,10	0,41
0.1	0.55	37	76	47	60	44	72	48	62	39	65	55	53,00	3,77
0.1	1	68	96	55	92	52	98	72	105	62	100	80	70,49	13,49
0.4	0.1	28	62	36	55	34	52	40	53	33	57	45	42,70	5,38
0.4	0.55	70	110	65	105	60	97	66	100	62	115	85	90,34	5,92
0.4	1	90	130	84	136	92	128	95	125	88	132	110	105,00	4,76
0.7	0.1	55	88	45	80	54	81	52	75	50	70	65	69,56	6,56
0.7	0.55	97	140	102	144	88	134	100	148	95	152	120	117,90	1,78
0.7	1	137	208	135	205	120	215	130	195	140	215	170	179,41	5,24
1	0.1	88	120	82	125	90	115	76	112	92	100	100	104,29	4,11
1	0.55	135	222	140	215	148	205	130	225	150	230	180	173,49	3,75
1	1	187	290	178	300	165	315	195	305	190	325	245	240,60	1,83
													% Erreur max= 13,49	

Tableau 49: Essai N°9(Borax-Al) : 01 couche cachée à 11 neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales										Valeurs Moyennes	Valeurs estimées	(%)
850	2	22	29	23	28	18	31	15	34	20	30	25	26,29	4,89
850	4	37	76	47	60	44	72	48	62	39	65	55	60,67	9,34
850	6	68	96	55	92	52	98	72	105	62	100	80	77,75	2,89
900	2	28	62	36	55	34	52	40	53	33	57	45	46,29	2,78
900	4	70	110	65	105	60	97	66	100	62	115	85	89,88	5,42
900	6	90	130	84	136	92	128	95	125	88	132	110	106,86	2,94
950	2	55	88	45	80	54	81	52	75	50	70	65	68,40	4,97
950	4	97	140	102	144	88	134	100	148	95	152	120	130,25	7,87
950	6	137	208	135	205	120	215	130	195	140	215	170	165,50	2,72
1000	2	88	120	82	125	90	115	76	112	92	100	100	99,40	0,60
1000	4	135	222	140	215	148	205	130	225	150	230	180	183,57	1,95
1000	6	187	290	178	300	165	315	195	305	190	325	245	260,83	6,07
													% Erreur max= 9,3407	

Tableau 50: Essai N°9(Borax-Al) : 01 couche cachée à 12neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	26,58	5,96
1100100000	100	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	53,06	3,65
1100100000	110	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	77,34	3,44
1101010010	010	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	42,41	6,1
1101010010	100	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	82,28	3,31
1101010010	110	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	110,25	0,23
1110000100	010	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	66,80	2,69
1110000100	100	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	116,39	3,1
1110000100	110	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	159,76	6,41
1110110110	010	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	100,80	0,79
1110110110	100	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	175,86	2,36
1110110110	110	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	246,79	0,72
												Erreur max=	6,41	

Tableau 51: Essai N°1(Borax-AI): 01 couche cachée à 05neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	24,29	2,941
1100100000	100	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	58,43	5,868
1100100000	110	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	81,33	1,639
1101010010	010	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	48,14	6,528
1101010010	100	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	90,38	5,947
1101010010	110	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	110,00	0
1110000100	010	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	65,67	1,015
1110000100	100	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	114,17	5,109
1110000100	110	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	158,00	7,595
1110110110	010	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	98,37	1,652
1110110110	100	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	183,56	1,937
1110110110	110	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	230,71	6,192
												Erreur max=	7,595	

Tableau 52: Essai N°1(Borax-AI): 01 couche cachée à 06neurones (inputs binarisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	24,49	2,08
1100100000	100	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	54,81	0,34
1100100000	110	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	78,83	1,49
1101010010	010	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	42,35	6,25
1101010010	100	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	90,90	6,49
1101010010	110	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	108,31	1,56
1110000100	010	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	67,53	3,75
1110000100	100	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	120,22	0,18
1110000100	110	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	169,10	0,53
1110110110	010	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	101,58	1,55
1110110110	100	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	182,81	1,54
1110110110	110	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	250,05	2,02
												Erreur max=	6,49	

Tableau 53: Essai N°2(Borax-Al): 01 couche cachée à 07neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	24,00	4,17
1100100000	100	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	56,60	2,83
1100100000	110	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	86,17	7,16
1101010010	010	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	46,83	3,91
1101010010	100	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	86,25	1,45
1101010010	110	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	108,33	1,54
1110000100	010	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	67,17	3,23
1110000100	100	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	120,00	0,00
1110000100	110	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	171,67	0,97
1110110110	010	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	101,50	1,48
1110110110	100	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	179,50	0,28
1110110110	110	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	235,00	4,26
												% Erreur max=	7,16	

Tableau 54: Essai N°3(Borax-Al): 01 couche cachée à 08neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	23,86	4,79
1100100000	100	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	56,38	2,44
1100100000	110	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	84,13	4,90
1101010010	010	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	49,00	8,16
1101010010	100	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	78,29	8,58
1101010010	110	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	112,89	2,56
1110000100	010	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	66,00	1,52
1110000100	100	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	116,43	3,07
1110000100	110	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	184,17	7,69
1110110110	010	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	106,29	5,91
1110110110	100	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	180,33	0,18
1110110110	110	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	237,22	3,28
													% Erreur max=	8,58

Tableau 55: Essai N°4(Borax-Al): 01 couche cachée à 09neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	24,00	4,17
1100100000	100	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	54,63	0,69
1100100000	110	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	77,14	3,70
1101010010	010	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	42,75	5,26
1101010010	100	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	91,33	6,93
1101010010	110	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	110,00	0,00
1110000100	010	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	64,67	0,52
1110000100	100	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	118,44	1,31
1110000100	110	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	180,00	5,56
1110110110	010	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	106,80	6,37
1110110110	100	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	168,83	6,61
1110110110	110	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	225,50	8,65
													% Erreur max=	8,65

Tableau 56: Essai N°5(Borax-Al): 01 couche cachée à 10neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	25,50	1,96
1100100000	100	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	56,00	1,79
1100100000	110	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	80,38	0,47
1101010010	010	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	44,00	2,27
1101010010	100	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	81,67	4,08
1101010010	110	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	106,14	3,63
1110000100	010	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	66,25	1,89
1110000100	100	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	111,14	7,97
1110000100	110	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	176,00	3,41
1110110110	010	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	100,75	0,74
1110110110	100	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	182,50	1,37
1110110110	110	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	240,00	2,08
												% Erreur max=	7,97	

Tableau 57: Essai N°6(Borax-Al): 01 couche cachée à 11 neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	24,73	1,10
1100100000	100	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	53,54	2,73
1100100000	110	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	78,85	1,45
1101010010	010	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	46,64	3,53
1101010010	100	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	80,38	5,74
1101010010	110	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	107,59	2,24
1110000100	010	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	63,15	2,93
1110000100	100	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	120,30	0,25
1110000100	110	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	166,97	1,81
1110110110	010	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	105,95	5,61
1110110110	100	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	176,07	2,23
1110110110	110	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	244,93	0,03
												% Erreur max=	5,74	

Tableau 58: Essai N°7(Borax-Al): 01 couche cachée à 12neurones (inputs binarisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	25,95	3,68
1100100000	100	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	55,82	1,46
1100100000	110	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	74,81	6,93
1101010010	010	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	45,39	0,86
1101010010	100	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	85,54	0,63
1101010010	110	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	110,49	0,44
1110000100	010	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	65,58	0,89
1110000100	100	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	125,71	4,54
1110000100	110	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	165,74	2,57
1110110110	010	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	109,07	8,32
1110110110	100	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	185,06	2,74
1110110110	110	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	228,48	7,23
													Erreur max=	8,32

Tableau 59: Essai N°8(Borax-Al): 01 couche cachée à 13neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
1100100000	010	22	23	18	15	20	29	28	31	34	30	25	25,75	2,90
1100100000	100	37	47	44	48	39	76	60	72	62	65	55	55,06	0,11
1100100000	110	68	55	52	72	62	96	92	98	105	100	80	76,82	4,14
1101010010	010	28	36	34	40	33	62	55	52	53	57	45	43,94	2,40
1101010010	100	70	65	60	66	62	110	105	97	100	115	85	80,55	5,52
1101010010	110	90	84	92	95	88	130	136	128	125	132	110	103,73	6,05
1110000100	010	55	45	54	52	50	88	80	81	75	70	65	64,90	0,15
1110000100	100	97	102	88	100	95	140	144	134	148	152	120	122,24	1,84
1110000100	110	137	135	120	130	140	208	205	215	195	215	170	185,58	8,40
1110110110	010	88	82	90	76	92	120	125	115	112	100	100	101,55	1,53
1110110110	100	135	140	148	130	150	222	215	205	225	230	180	190,74	5,63
1110110110	110	187	178	165	195	190	290	300	315	305	325	245	237,89	2,99
													Erreur max=	8,40

Tableau 60: Essai N°9(Borax-Al): 01 couche cachée à 14neurones (inputs binarisés)

3 Troisième expérience :

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
900	2	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	20,27	25,99
900	4	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	40,20	12,93
900	6	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	43,48	14,99
950	2	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	31,00	3,22
950	4	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	64,70	0,46
950	6	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	91,27	9,57
1000	2	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	49,30	8,73
1000	4	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	102,66	2,28
1000	6	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	158,23	1,12
1050	2	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	79,09	1,16
1050	4	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	153,98	3,91
1050	6	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	225,63	8,58
												% Erreur max=	25,99	

Tableau 61: Essai N°1 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 03neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
900	2	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	19,14	21,61
900	4	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	32,81	6,67
900	6	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	61,84	19,15
950	2	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	29,81	0,64
950	4	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	55,60	16,91
950	6	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	105,68	5,38
1000	2	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	50,02	10,03
1000	4	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	95,55	9,89
1000	6	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	167,28	4,35
1050	2	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	86,19	7,18
1050	4	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	154,42	3,61
1050	6	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	231,24	5,95
												% Erreur max=	21,61	

Tableau 62: Essai N°2 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 04neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
900	2	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	18,81	20,26
900	4	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	31,13	12,45
900	6	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	53,12	5,87
950	2	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	30,18	0,60
950	4	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	56,11	15,84
950	6	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	100,99	0,98
1000	2	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	47,88	6,02
1000	4	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	94,52	11,09
1000	6	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	164,31	2,62
1050	2	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	76,98	3,93
1050	4	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	148,41	7,81
1050	6	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	228,92	7,02
												% Erreur max=		20,26

Tableau 63 : Essai N°3 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 05neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
900	2	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	16,76	10,48
900	4	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	27,79	25,96
900	6	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	48,10	3,95
950	2	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	29,15	2,93
950	4	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	50,52	28,65
950	6	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	86,20	16,01
1000	2	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	53,10	15,25
1000	4	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	90,22	16,39
1000	6	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	142,26	12,47
1050	2	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	94,46	15,31
1050	4	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	147,60	8,40
1050	6	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	205,70	19,10
												% Erreur max=		28,65

Tableau 64: Essai N°4 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 06neurones (inputs non normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
900	2	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	16,56	9,41
900	4	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	29,76	17,62
900	6	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	54,30	7,92
950	2	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	29,91	0,32
950	4	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	56,81	14,42
950	6	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	101,22	1,20
1000	2	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	54,15	16,90
1000	4	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	100,39	4,60
1000	6	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	162,52	1,55
1050	2	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	90,29	11,39
1050	4	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	153,82	4,02
1050	6	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	219,81	11,46
												% Erreur max=	17,62	

Tableau 65: Essai N°5 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 07neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
900	2	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	22,82	34,27
900	4	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	36,01	2,79
900	6	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	53,51	6,56
950	2	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	33,96	11,66
950	4	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	63,32	2,65
950	6	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	104,98	4,74
1000	2	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	49,44	8,97
1000	4	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	102,07	2,87
1000	6	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	172,08	7,02
1050	2	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	79,68	0,40
1050	4	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	157,41	1,64
1050	6	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	237,79	3,03
												% Erreur max=	34,27	

Tableau 66: Essai N°6(Borax-SiC) : 01 couche cachée à 08neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
900	2	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	19,84	24,38
900	4	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	31,62	10,70
900	6	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	55,37	9,70
950	2	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	30,44	1,46
950	4	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	53,00	22,63
950	6	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	96,93	3,17
1000	2	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	50,74	11,32
1000	4	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	92,71	13,26
1000	6	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	162,61	1,60
1050	2	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	88,64	9,74
1050	4	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	156,61	2,16
1050	6	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	237,72	3,06
												% Erreur max=		24,38

Tableau 67: Essai N°7(Borax-SiC) : 01 couche cachée à 09neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
900	2	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	17,16	12,61
900	4	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	31,61	10,73
900	6	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	48,45	3,20
950	2	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	32,72	8,33
950	4	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	66,58	2,38
950	6	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	101,11	1,09
1000	2	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	48,86	7,89
1000	4	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	105,24	0,23
1000	6	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	167,45	4,45
1050	2	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	80,07	0,08
1050	4	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	157,85	1,36
1050	6	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	243,64	0,56
												% Erreur max=		12,61

Tableau 68 : Essai N°8(Borax-SiC) : 01 couche cachée à 10neurones (inputs non normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
900	2	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	17,15	12,54
900	4	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	33,60	4,17
900	6	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	50,93	1,83
950	2	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	32,16	6,70
950	4	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	78,96	17,68
950	6	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	100,04	0,04
1000	2	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	47,38	5,02
1000	4	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	102,12	2,82
1000	6	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	170,62	6,22
1050	2	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	73,00	9,59
1050	4	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	160,74	0,46
1050	6	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	258,59	5,25
												% Erreur max=	17,68	

Tableau 69: Essai N°9 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 11 neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales										Valeurs Moyennes	Valeurs estimées	(%)
900	2	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	19,01	21,09
900	4	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	31,23	12,07
900	6	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	52,64	5,02
950	2	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	34,48	12,98
950	4	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	62,39	4,19
950	6	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	107,78	7,22
1000	2	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	52,46	14,22
1000	4	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	97,80	7,36
1000	6	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	162,05	1,27
1050	2	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	81,25	1,53
1050	4	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	145,25	10,16
1050	6	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	216,98	12,91
												Erreur max=	21,09	

Tableau 70: Essai N°9 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 12 neurones (inputs non normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	5	25	7	22	8	27	10	18	8	20	15	16,27	7,83
0.1	0.55	20	50	18	45	22	42	25	46	30	52	35	37,44	6,52
0.1	1	30	70	35	65	38	62	42	60	40	58	50	59,20	15,53
0.4	0.1	18	40	21	42	22	39	20	38	23	37	30	24,35	23,22
0.4	0.55	55	85	50	75	54	80	48	70	55	78	65	58,37	11,36
0.4	1	80	125	75	120	82	122	85	115	78	118	100	90,41	10,61
0.7	0.1	33	60	30	65	32	62	30	58	28	52	45	40,63	10,76
0.7	0.55	80	136	78	134	82	132	75	120	85	128	105	99,41	5,62
0.7	1	118	198	125	200	120	205	125	195	124	190	160	160,08	0,05
1	0.1	58	112	62	110	60	95	56	100	57	90	80	82,65	3,20
1	0.55	112	205	120	200	128	188	135	202	125	185	160	179,93	11,08
1	1	175	292	172	302	180	312	185	310	192	330	245	253,33	3,29
												% Erreur max=	23,22	

Tableau 71: Essai N°1 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 03neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	5	25	7	22	8	27	10	18	8	20	15	14,00	7,14
0.1	0.55	20	50	18	45	22	42	25	46	30	52	35	27,80	25,90
0.1	1	30	70	35	65	38	62	42	60	40	58	50	51,00	1,96
0.4	0.1	18	40	21	42	22	39	20	38	23	37	30	24,40	22,95
0.4	0.55	55	85	50	75	54	80	48	70	55	78	65	63,00	3,17
0.4	1	80	125	75	120	82	122	85	115	78	118	100	101,86	1,82
0.7	0.1	33	60	30	65	32	62	30	58	28	52	45	47,29	4,83
0.7	0.55	80	136	78	134	82	132	75	120	85	128	105	120,00	12,50
0.7	1	118	198	125	200	120	205	125	195	124	190	160	147,00	8,84
1	0.1	58	112	62	110	60	95	56	100	57	90	80	87,67	8,75
1	0.55	112	205	120	200	128	188	135	202	125	185	160	160,00	0,00
1	1	175	292	172	302	180	312	185	310	192	330	245	213,00	15,02
												% Erreur max=	25,90	

Tableau 72: Essai N°2 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 04neurones (inputs normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	5	25	7	22	8	27	10	18	8	20	15	16,93	11,38
0.1	0.55	20	50	18	45	22	42	25	46	30	52	35	21,47	63,05
0.1	1	30	70	35	65	38	62	42	60	40	58	50	69,86	28,43
0.4	0.1	18	40	21	42	22	39	20	38	23	37	30	24,36	23,17
0.4	0.55	55	85	50	75	54	80	48	70	55	78	65	66,36	2,05
0.4	1	80	125	75	120	82	122	85	115	78	118	100	72,07	38,75
0.7	0.1	33	60	30	65	32	62	30	58	28	52	45	50,74	11,31
0.7	0.55	80	136	78	134	82	132	75	120	85	128	105	90,89	15,53
0.7	1	118	198	125	200	120	205	125	195	124	190	160	139,16	14,98
1	0.1	58	112	62	110	60	95	56	100	57	90	80	80,06	0,07
1	0.55	112	205	120	200	128	188	135	202	125	185	160	169,35	5,52
1	1	175	292	172	302	180	312	185	310	192	330	245	226,17	8,33
												% Erreur max=		63,05

Tableau 73: Essai N°3 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 05neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	5	25	7	22	8	27	10	18	8	20	15	21,07	28,80
0.1	0.55	20	50	18	45	22	42	25	46	30	52	35	46,21	24,26
0.1	1	30	70	35	65	38	62	42	60	40	58	50	72,66	31,18
0.4	0.1	18	40	21	42	22	39	20	38	23	37	30	35,27	14,95
0.4	0.55	55	85	50	75	54	80	48	70	55	78	65	83,52	22,17
0.4	1	80	125	75	120	82	122	85	115	78	118	100	136,76	26,88
0.7	0.1	33	60	30	65	32	62	30	58	28	52	45	47,87	6,00
0.7	0.55	80	136	78	134	82	132	75	120	85	128	105	152,40	31,10
0.7	1	118	198	125	200	120	205	125	195	124	190	160	211,86	24,48
1	0.1	58	112	62	110	60	95	56	100	57	90	80	82,30	2,80
1	0.55	112	205	120	200	128	188	135	202	125	185	160	186,56	14,24
1	1	175	292	172	302	180	312	185	310	192	330	245	263,47	7,01
												% Erreur max=		31,18

Tableau 74: Essai N°4 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 06neurones (inputs normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	5	25	7	22	8	27	10	18	8	20	15	16,12	6,93
0.1	0.55	20	50	18	45	22	42	25	46	30	52	35	31,34	11,68
0.1	1	30	70	35	65	38	62	42	60	40	58	50	42,51	17,61
0.4	0.1	18	40	21	42	22	39	20	38	23	37	30	34,78	13,75
0.4	0.55	55	85	50	75	54	80	48	70	55	78	65	63,91	1,70
0.4	1	80	125	75	120	82	122	85	115	78	118	100	97,15	2,94
0.7	0.1	33	60	30	65	32	62	30	58	28	52	45	42,99	4,66
0.7	0.55	80	136	78	134	82	132	75	120	85	128	105	115,04	8,73
0.7	1	118	198	125	200	120	205	125	195	124	190	160	168,47	5,03
1	0.1	58	112	62	110	60	95	56	100	57	90	80	69,10	15,78
1	0.55	112	205	120	200	128	188	135	202	125	185	160	158,43	0,99
1	1	175	292	172	302	180	312	185	310	192	330	245	241,87	1,29
												% Erreur max=		17,61

Tableau 75: Essai N°5 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 07neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	5	25	7	22	8	27	10	18	8	20	15	9,90	51,52
0.1	0.55	20	50	18	45	22	42	25	46	30	52	35	30,19	15,93
0.1	1	30	70	35	65	38	62	42	60	40	58	50	49,74	0,52
0.4	0.1	18	40	21	42	22	39	20	38	23	37	30	30,99	3,20
0.4	0.55	55	85	50	75	54	80	48	70	55	78	65	72,37	10,18
0.4	1	80	125	75	120	82	122	85	115	78	118	100	93,08	7,43
0.7	0.1	33	60	30	65	32	62	30	58	28	52	45	48,90	7,97
0.7	0.55	80	136	78	134	82	132	75	120	85	128	105	99,25	5,79
0.7	1	118	198	125	200	120	205	125	195	124	190	160	156,22	2,42
1	0.1	58	112	62	110	60	95	56	100	57	90	80	78,20	2,31
1	0.55	112	205	120	200	128	188	135	202	125	185	160	178,56	10,39
1	1	175	292	172	302	180	312	185	310	192	330	245	229,87	6,58
												% Erreur max=		51,52

Tableau 76: Essai N°6 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 08neurones (inputs normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	5	25	7	22	8	27	10	18	8	20	15	13,20	13,60
0.1	0.55	20	50	18	45	22	42	25	46	30	52	35	35,75	2,09
0.1	1	30	70	35	65	38	62	42	60	40	58	50	47,80	4,59
0.4	0.1	18	40	21	42	22	39	20	38	23	37	30	28,38	5,71
0.4	0.55	55	85	50	75	54	80	48	70	55	78	65	66,61	2,42
0.4	1	80	125	75	120	82	122	85	115	78	118	100	102,23	2,19
0.7	0.1	33	60	30	65	32	62	30	58	28	52	45	57,53	21,79
0.7	0.55	80	136	78	134	82	132	75	120	85	128	105	102,06	2,88
0.7	1	118	198	125	200	120	205	125	195	124	190	160	160,81	0,51
1	0.1	58	112	62	110	60	95	56	100	57	90	80	89,12	10,24
1	0.55	112	205	120	200	128	188	135	202	125	185	160	167,13	4,26
1	1	175	292	172	302	180	312	185	310	192	330	245	263,75	7,11
												% Erreur max= 21,79		

Tableau 77 : Essai N°7 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 09neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	5	25	7	22	8	27	10	18	8	20	15	10,18	47,38
0.1	0.55	20	50	18	45	22	42	25	46	30	52	35	34,66	0,97
0.1	1	30	70	35	65	38	62	42	60	40	58	50	48,50	3,09
0.4	0.1	18	40	21	42	22	39	20	38	23	37	30	30,95	3,08
0.4	0.55	55	85	50	75	54	80	48	70	55	78	65	55,16	17,84
0.4	1	80	125	75	120	82	122	85	115	78	118	100	93,75	6,66
0.7	0.1	33	60	30	65	32	62	30	58	28	52	45	53,75	16,28
0.7	0.55	80	136	78	134	82	132	75	120	85	128	105	113,22	7,26
0.7	1	118	198	125	200	120	205	125	195	124	190	160	151,68	5,48
1	0.1	58	112	62	110	60	95	56	100	57	90	80	79,48	0,66
1	0.55	112	205	120	200	128	188	135	202	125	185	160	152,50	4,92
1	1	175	292	172	302	180	312	185	310	192	330	245	249,07	1,63
												% Erreur max= 47,38		

Tableau 78 Essai N°8 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 10neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs expérimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	15,01	0,04
0.1	0.55	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	38,44	8,95
0.1	1	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	51,38	2,69
0.4	0.1	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	32,37	7,32
0.4	0.55	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	69,00	5,80
0.4	1	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	104,32	4,14
0.7	0.1	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	44,14	1,95
0.7	0.55	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	103,00	1,94
0.7	1	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	165,96	3,59
1	0.1	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	80,75	0,93
1	0.55	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	153,39	4,31
1	1	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	237,70	3,07
												% Erreur max= 8,95		

Tableau 79: Essai N°9 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 11 neurones (inputs normalisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs expérimentales										Valeurs Moyenne	Valeurs estimées	(%)
0.1	0.1	5	25	7	22	8	27	10	18	8	20	15	16,64	9,84
0.1	0.55	20	50	18	45	22	42	25	46	30	52	35	38,49	9,06
0.1	1	30	70	35	65	38	62	42	60	40	58	50	52,29	4,38
0.4	0.1	18	40	21	42	22	39	20	38	23	37	30	33,97	11,70
0.4	0.55	55	85	50	75	54	80	48	70	55	78	65	63,48	2,39
0.4	1	80	125	75	120	82	122	85	115	78	118	100	96,96	3,14
0.7	0.1	33	60	30	65	32	62	30	58	28	52	45	47,48	5,22
0.7	0.55	80	136	78	134	82	132	75	120	85	128	105	111,36	5,71
0.7	1	118	198	125	200	120	205	125	195	124	190	160	154,42	3,61
1	0.1	58	112	62	110	60	95	56	100	57	90	80	89,92	11,04
1	0.55	112	205	120	200	128	188	135	202	125	185	160	157,46	1,61
1	1	175	292	172	302	180	312	185	310	192	330	245	226,15	8,33
												% Erreur max= 11,70		

Tableau 80: Essai N°9 (Borax-SiC) : 01 couche cachée à 12 neurones (inputs normalisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
01110000100	010	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	14,75	1,73
01110000100	100	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	36,82	4,95
01110000100	110	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	50,23	0,46
01110110110	010	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	28,27	6,12
01110110110	100	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	64,12	1,38
01110110110	110	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	88,54	12,94
01111101000	010	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	50,97	11,72
01111101000	100	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	99,61	5,41
01111101000	110	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	154,89	3,30
10000011010	010	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	86,51	7,53
10000011010	100	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	150,82	6,09
10000011010	110	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	238,56	2,70
												% Erreur max=	12,94	

Tableau 81: Essai N°1(Borax-SiC): 01 couche cachée à 05neurones (inputs binarismes)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Desirées	Valeurs estimées	(%)
01110000100	010	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	15,00	0,00
01110000100	100	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	35,00	0,00
01110000100	110	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	52,43	4,63
01110110110	010	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	28,60	4,90
01110110110	100	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	67,67	3,94
01110110110	110	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	100,25	0,25
01111101000	010	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	46,00	2,17
01111101000	100	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	108,71	3,42
01111101000	110	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	150,87	6,05
10000011010	010	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	76,44	4,65
10000011010	100	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	149,50	7,02
10000011010	110	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	268,00	8,58
												% Erreur max=	8,58	

Tableau 82: Essai N°2(Borax-SiC): 01 couche cachée à 06neurones (inputs binarismes)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
01110000100	010	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	15,78	4,94
01110000100	100	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	39,00	10,25
01110000100	110	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	42,50	17,65
01110110110	010	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	30,39	1,29
01110110110	100	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	67,51	3,72
01110110110	110	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	109,29	8,50
01111101000	010	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	46,99	4,23
01111101000	100	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	93,22	12,64
01111101000	110	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	172,37	7,18
10000011010	010	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	77,76	2,88
10000011010	100	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	157,22	1,77
10000011010	110	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	245,73	0,30
												% Erreur max=	17,65	

Tableau 83: Essai N°3(Borax-SiC): 01 couche cachée à 07neurones (inputs binarismes)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
01110000100	010	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	15,51	3,31
01110000100	100	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	38,76	9,71
01110000100	110	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	50,86	1,68
01110110110	010	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	31,89	5,92
01110110110	100	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	72,80	10,71
01110110110	110	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	100,68	0,67
01111101000	010	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	42,48	5,92
01111101000	100	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	97,28	7,93
01111101000	110	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	159,65	0,22
10000011010	010	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	82,80	3,39
10000011010	100	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	153,47	4,25
10000011010	110	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	248,94	1,58
												% Erreur max=	10,71	

Tableau 84 : Essai N°4(Borax-SiC): 01 couche cachée à 08neurones (inputs binarismes)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
01110000100	010	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	15,00	0,00
01110000100	100	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	32,20	8,70
01110000100	110	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	48,83	2,39
01110110110	010	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	28,89	3,85
01110110110	100	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	62,86	3,41
01110110110	110	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	100,00	0,00
01111101000	010	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	40,63	10,77
01111101000	100	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	105,50	0,47
01111101000	110	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	166,14	3,70
10000011010	010	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	76,87	4,07
10000011010	100	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	171,17	6,52
10000011010	110	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	240,17	2,01
												% Erreur max=	10,77	

Tableau 85: Essai N°5(Borax-SiC): 01 couche cachée à 09neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
01110000100	010	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	16,67	10,00
01110000100	100	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	32,00	9,38
01110000100	110	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	43,40	15,21
01110110110	010	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	29,83	0,56
01110110110	100	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	64,50	0,78
01110110110	110	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	99,63	0,38
01111101000	010	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	42,57	5,70
01111101000	100	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	99,75	5,26
01111101000	110	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	150,62	6,22
10000011010	010	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	78,75	1,59
10000011010	100	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	173,83	7,96
10000011010	110	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	226,25	8,29
												% Erreur max=	15,21	

Tableau 86: Essai N°6(Borax-SiC): 01 couche cachée à 10neurones (inputs binarisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
01110000100	010	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	17,05	12,03
01110000100	100	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	33,14	5,60
01110000100	110	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	51,14	2,23
01110110110	010	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	33,49	10,42
01110110110	100	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	58,16	11,77
01110110110	110	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	102,70	2,63
01111101000	010	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	41,04	9,66
01111101000	100	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	106,56	1,47
01111101000	110	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	148,99	7,39
10000011010	010	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	78,55	1,85
10000011010	100	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	175,51	8,83
10000011010	110	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	259,65	5,64
												% Erreur max=	12,03	

Tableau 87: Essai N°7(Borax-SiC): 01 couche cachée à 11 neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
01110000100	010	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	18,21	17,64
01110000100	100	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	35,48	1,34
01110000100	110	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	51,28	2,49
01110110110	010	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	24,56	22,13
01110110110	100	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	54,69	18,86
01110110110	110	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	108,97	8,23
01111101000	010	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	42,25	6,52
01111101000	100	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	107,71	2,52
01111101000	110	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	172,69	7,35
10000011010	010	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	78,07	2,48
10000011010	100	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	160,87	0,54
10000011010	110	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	248,57	1,44
												% Erreur max=	22,13	

Tableau 88: Essai N°8(Borax-SiC): 01 couche cachée à 12 neurones (inputs binarisés)

Annexe

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
01110000100	010	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	12,45	20,53
01110000100	100	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	32,71	6,99
01110000100	110	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	58,07	13,89
01110110110	010	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	29,78	0,74
01110110110	100	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	65,43	0,65
01110110110	110	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	107,03	6,57
01111101000	010	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	46,22	2,64
01111101000	100	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	107,59	2,41
01111101000	110	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	146,95	8,88
10000011010	010	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	83,65	4,36
10000011010	100	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	168,45	5,01
10000011010	110	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	267,17	8,30
												% Erreur max=	20,53	

Tableau 89: Essai N°9(Borax-SiC): 01 couche cachée à 13neurones (inputs binarisés)

Température(°C)	Temps de maintien(H)	Valeurs experimentales couche diffuse de bore(um)										Valeurs Désirées	Valeurs estimées	(%)
01110000100	010	5	7	8	10	8	25	22	27	18	20	15	14,67	2,27
01110000100	100	20	18	22	25	30	50	45	42	46	52	35	35,71	2,00
01110000100	110	30	35	38	42	40	70	65	62	60	58	50	46,60	7,30
01110110110	010	18	21	22	20	23	40	42	39	38	37	30	32,38	7,34
01110110110	100	55	50	54	48	55	85	75	80	70	78	65	63,57	2,25
01110110110	110	80	75	82	85	78	125	120	122	115	118	100	105,00	4,76
01111101000	010	33	30	32	30	28	60	65	62	58	52	45	46,89	4,03
01111101000	100	80	78	82	75	85	136	134	132	120	128	105	110,80	5,23
01111101000	110	118	125	120	125	124	198	200	205	195	190	160	173,67	7,87
10000011010	010	58	62	60	56	57	112	110	95	100	90	80	85,00	5,88
10000011010	100	112	120	128	135	125	205	200	188	202	185	160	146,43	9,27
10000011010	110	175	172	180	185	192	292	302	312	310	330	245	245,62	0,25
												% Erreur max=	9,27	

Tableau 90: Essai N°10(Borax-SiC): 01 couche cachée à 14neurones (inputs binarisés)

Liste des symboles

A	Surface de plan (m ²)
C	Concentration de l'espèce (j) (mol.L ⁻¹)
D	Coefficient de diffusion (unité de surface/s)
D_0	Coefficient indépendant de la température (unité de surface/s)
Q_a	Energie d'activation [J/mol ou eV/atom]
T	Température absolue en [K]
R	Constante des gaz parfaits [8,314 J/mol.K]
J	Flux de masse
$P_{1,2}$	Section plane (m ²)
x	Distance parcourue par l'espèce diffuse(m)
t	Temps (s)
erf	Fonction d'erreur
Z	Variable sans dimension
C_s	Concentration de l'espèce diffuse à la surface
C_0	Concentration de l'espèce diffuse initiale
G	Gain de masse(g)
ρ	Masse volumique (g/cm ³)
d	Sortie désirée
t_i	Valeurs normalisées (i)
t_{min}	Valeurs minimale
t_{max}	Valeurs maximale
m	Nombre de neurone de la couche cachée.
n	Nombre de neurone dans la couche d'entrée.
l	Nombre de neurone dans la couche de sortie
α	Constante de régulation prend les valeurs entières entre 1 et 10.
w_{ij}	Poids de la connexion du neurone
x_i	Signaux d'entrée du neurone (i)
y_i	Sortie du réseau du neurone (i)

Liste des courbes

Courbes	Désignations	Pages
1.5	Profils de concentration avant et après diffusion.....	6
1.8	Profil linéaire du régime permanent.....	11
1.12	Profil de concentration.....	16
2.22	Allure des courbes de dureté en fonction de la profondeur	20
2.3	La méthode de mesure de l'épaisseur de la couche borurée.....	25
3.6	Différent type de fonction de transfert	33
4.1	Meilleure estimation pour 08 neurones input non normalisé Borax-B4C.....	51
4.2	Meilleure estimation pour 10 neurones input normalisé Borax-B4C.....	53
4.3	Meilleure estimation pour 06 neurones input binarisé Borax-B4C.....	54
4.4	Meilleure estimation 1ere expérience Borax-B4C.....	55
4.5	Courbe des écarts par rapport à la valeur expérimentale Borax-B4C.....	55
4.6	Meilleure estimation pour 10 neurones input non normalisé Borax-Al.....	58
4.7	Meilleure estimation pour 04 neurones input normalisé Borax-Al.....	59
4.8	Meilleure estimation pour 10 neurones input binarisé Borax-Al.....	61
4.9	Meilleure estimation des trois tests Borax-Al.....	61
4.10	Courbes des écarts des trois tests Borax-Al.....	62
4.11	Meilleure estimation à 10 neurones input non normalisé Borax-SiC.....	64
4.12	Meilleure estimation à 11 neurones input normalisé Borax-SiC.....	65
4.13	Meilleure estimation à 10 neurones input binarisé Borax-SiC.....	67
4.14	Courbes des écarts des trois tests Borax- SiC.....	67