



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique  
DER Génie Electrique et Informatique

## Thèse de Magister

en Electronique  
Option : Acquisition et Traitement de l'Information.

présentée par :  
LAIDI KAMEL Ingénieur d'Etat en Electronique de l'ENP

Thème

***Implémentation Orientée Hardware des Réseaux  
de Neurones Artificiels : Application à la  
Navigation d'un Robot Mobile Autonome***

Soutenue devant le jury :

M.MEHENNI	Maitre de Conférences	à l'ENP	Président
A.FARAH	Professeur	à l'ENP	Rapporteur
F.BOUDJEMA	Maitre de Conférences	à l'ENP	Examineur
C.LARBES	PhD, Enseignant	à l'ENP	Examineur
R.SADOUN	Maitre de Conférences	à l'ENP	Examineur

Septembre 1998

## SOMMAIRE.

<b>1. Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre1 : Réseaux de neurones</b> .....	<b>3</b>
1.1. Introduction.....	3
1.2. Neurone biologique.....	4
1.3. Neurone formel.....	5
1.4. Modélisation générale d'un réseau de neurones.....	6
1.4.1. Dynamique des états.....	6
1.4.2. Dynamique des connexions. ....	6
1.4.3. Fonctionnement. ....	7
1.5. Topologies des réseaux de neurones.....	7
1.5.1. Réseaux non récurrents.....	7
1.5.1.1. Le perceptron.....	7
1.5.1.2. Réseaux non linéaires.....	8
1.5.1.3. Adaline / Madaline.....	9
1.5.1.4. Réseaux multicouches à rétro-propagation du gradient .....	10
1.5.2. Réseaux récurrents.....	11
1.5.2.1. Modèle de HOPFIELD.....	11
1.5.3. Réseaux à auto-organisation et compétition.....	13
1.5.3.1. Réseau de KOHONEN.....	13
1.6. Apprentissage.....	14
1.6.1. Principe d'apprentissage.....	14
1.6.2. Modes d'apprentissage.....	15
1.6.2.1. Apprentissage supervisé.....	15
1.6.2.2. Apprentissage non supervisé.....	15
1.6.2.1. Apprentissage renforcé.....	15
1.6.3. Règles d'apprentissage.....	16
1.6.3.1. La règle de HEBB.....	16
1.6.3.2. La règle de Widrow-Hoff.....	16
1.6.3.3. La règle Delta.....	17
1.6.3.4. L'algorithme de la Rétro-Propagation du Gradient (RPG) .....	17
1.6.3.5. Apprentissage compétitif.....	17
1.7. Propriétés et limites d'utilisation des réseaux de neurones .....	18
1.7.1. Propriétés des réseaux de neurones.....	18
1.7.2. Limites d'utilisation.....	19
1.8. Conclusion.....	19
<b>Chapitre 2 : Architecture digitale des Réseaux de neurones artificiels...</b>	<b>20</b>
2.1 Introduction.....	20
2.2. Opportunités de l'implémentation digitale.....	21

2.3. Architecture par commutateurs programmables.....	23
2.3.1. Choix architectural de base.....	23
2.3.2. Architecture détaillée.....	26
2.3.2.1. Structure du neurone.....	27
2.3.2.2. Algorithme utilisé pour le calcul du potentiel.....	29
2.3.2.3. Algorithme utilisé pour l'apprentissage.....	29
2.4. Architecture systolique des réseaux de neurones artificiels.....	30
2.4.1. Représentation des opérations matricielles par des graphes de dépendances de données.....	31
2.4.2 Réseaux systoliques.....	33
2.4.3 Régularisation des algorithmes.....	34
2.4.3.1 Régularisation de l'algorithme de la phase de relaxation.....	35
2.4.3.2 Régularisation de l'algorithme de la phase d'apprentissage .....	38
2.4.4. Architecture en anneau systolique des réseaux de neurones artificiels.....	42
2.4.4.1 Processeur élémentaire .....	43
2.4.4.2 Anneau systolique pour la phase de relaxation.....	44
2.4.4.2 Anneau systolique pour la phase d'apprentissage .....	45
2.5 Conclusion .....	47
<b>Chapitre 3 : Application à la navigation d'un Robot Mobile Autonome.....</b>	<b>48</b>
3.1. Introduction.....	49
3.2. Structure générale.....	47
3.3. Synoptique du système global.....	49
3.4. Définition et modélisation de l'environnement.....	52
3.4.1. Modélisation de l'environnement spatial.....	52
3.4.2. Modélisation du robot.....	53
3.4.3. Définition des champs de température.....	53
3.4.4. Stratégie anti-collision .....	53
3.4.5. Stratégie de localisation de la cible.....	56
3.4.6. Coordination des tâches.....	57
3.4.7. Architecture neuronale du système.....	58
3.5. Implémentation systolique du système neuronal.....	60
3.5.1. Allocation des ressources.....	60
3.5.2. Mapping de l'algorithme de la rétro-propagation du gradient.....	62
3.5.2.1. Mapping de la phase de relaxation .....	62
3.5.2.2. Mapping de la phase d'apprentissage.....	63
3.5.2.2.1. Anneau systolique pour les OPU.....	63
3.5.2.2.2. Anneau systolique pour les VMMs.....	64
3.5.3. Synthèse architecturale connexionniste du bloc RPG.....	65
3.5.4. Implémentation du réseau d'action.....	67
3.5.4.1. Modèles des processeurs utilisés.....	67
3.5.4.2. Mapping du calcul des actions.....	68
3.5.4.3. Mapping du calcul des poids.....	68

3.5.4.4. Synthèse architecturale du bloc d'action .....	68
3.5.5. Réseau connexionniste total .....	69
3.6. Conclusion.....	70

## Chapitre 4. Modélisation orientée objet des Réseaux de neurones artificiels..70

4.1. Introduction.....	71
4.2. Motivations pour les techniques orientées objet.....	71
4.3. Types de données.....	72
4.4. Modélisation des composants hardware comme des classes.....	72
4.5. Dérivation des composants spécialisés.....	73
4.6. Paramètres et fonction d'activation.....	73
4.6.1. Numérisation de la fonction sigmoïde .....	73
4.6.2. Numérisation de la fonction exponentielle du réseau d'action.....	74
4.6.3. Valeurs des paramètres utilisés .....	74
4.6.4. Justification des approximations et des paramètres .....	74
4.7. Modélisation orientée objet des Réseaux de neurones artificiels.....	75
4.7.1. Modélisation des classes des Réseaux de neurones artificiels .....	76
4.7.1.1. Les classes registres.....	76
4.7.1.2. Les classes mémoires.....	77
4.7.1.3. La classe PE de classification.....	78
4.7.1.4. La classe PE d'action.....	80
4.7.1.5. La classe PE pour le calcul des poids.....	80
4.7.1.6. La classe réseau classificateur.....	81
4.7.1.7. La classe réseau actionneur.....	83
4.7.1.8. La classe contrôleur.....	84
4.7.2. Types de données.....	86
4.8. Conclusion.....	86

## Chapitre 5 : Résultats et interprétations..... 87

5.1. Environnement d'apprentissage.....	87
5.1. Environnement visé (d'application).....	87
5.3. Simulation et résultats .....	88
5.3.1. Test dans un environnement libre d'obstacles .....	89
5.3.2. Test dans l'environnement d'apprentissage .....	90
5.3.3. Test de généralisation.....	91
5.4. Conclusion.....	93
6. Conclusion générale .....	94

## ملخص

نتناول في هذا العمل منهجية لغرس الشبكات العصبونية الاصطناعية على شكل شبكات انقباضية رقمية. بنية على شكل حلقة انقباضية ، التي تعتبر منهجية ممكنة للغرس العتادي للشبكات العصبونية و التي توفر حساب مكثف و فعال، استعملت لغرس خوارزمية الانتشار الرجعي للخطا مع تطبيقها لمراقبة آلة متحركة و مستقلة ذاتيا. كلتا المرحلتين، مرحلة الا نسياب، و مرحلة التعلم ادمجتا في التصميم الذي يستعمل فوائد البرمجة الموجهة للشئ في التصميم العتادي. البرنامج مكتوب بلغة الحاسوب المسماة C++

**كلمات مفاتيح:** الشبكات العصبونية الاصطناعية ، غرس رقمي ، شبكات انقباضية ، آلة متحركة و مستقلة ذاتيا ، البرمجة الموجهة للشئ.

## ABSTRACT

In this work we present a digital systolic arrays issue for implementing artificial neural network. A ring systolic architecture, which is a possible way for hardware implementation of ANNs and provides intensive and efficient computing structure, is used to implement the error back-propagation algorithm with application to control an autonomous mobile robot. Both retrieving and learning phases are integrated in the design which use the benefits of Oriented-Object Techniques in hardware design. The code is written in C++.

**Key words:** Artificial Neural Networks, Digital Implementaion, Systolic Architecrure, Autonomous Mobile Robot, Oriented Object Techniques.

## RESUME

Dans ce travail nous présentons une approche digitale sous forme de réseaux systoliques pour l'implémentation des réseaux de neurones artificiels. Une architecture en anneau systolique est développée pour l'implémentation matérielle des RNAs. Elle fournit une structure de calcul intensif et en pipeline, pour implémenter l'algorithme de la rétro-propagation du gradient dans le but de contrôler un robot mobile autonome. Les deux phases, de relaxation et d'apprentissage, sont intégrées dans la conception qui utilise les avantages des techniques orientées objet dans la conception matérielle. Le code est écrit en C++.

**Mots clés:** Réseaux de Neurones Artificiels, Implémentation Digitale, Architecture systiolique, Robot Mobile Autonome, Techniques Orientées Objet.