THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PARIS 6

Spécialité :

PHYSIQUE

présentée

par **Isabelle RIVALS**

pour obtenir le titre de **DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PARIS 6**

Sujet de la thèse :

Modélisation et commande de processus par réseaux de neurones ; application au pilotage d'un véhicule autonome.

Soutenue le 20 janvier 1995

devant le jury composé de :

Mme	C.	ALQUIÉ	Présidente
M.	J.P.	CORRIOU	Rapporteur
M.	L.	LJUNG	Rapporteur
M.	M.	de CREMIERS	Examinateur
M.	A.V.	NAZIN	Examinateur
M.	G.	DREYFUS	Examinateur
M.	L.	PERSONNAZ	Examinateur
M.	J.-J.	SLOTINE	Invité

“ Wovon man nicht sprechen kann, darüber muß man schweigen. ”

Ludwig Wittgenstein.

Ce travail a été effectué dans le cadre d'un contrat CIFRE (N°234/91) entre la société SAGEM et le Laboratoire d'Électronique de l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris.

L'initiative du projet de pilotage neuronal du robot REMI revient à Monsieur Michel de CREMIERS, Directeur de l'Unité de Recherche en Automatique de la SAGEM. Par l'attention qu'il a portée à mes travaux, et les moyens qu'il a mis à ma disposition, il a contribué efficacement à la réalisation de ce projet. Je le remercie vivement de couronner cette collaboration en acceptant d'être membre de mon jury. J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur Gérard FRAPPIER, qui dirige les activités en Robotique de l'Unité de Recherche en Automatique de la SAGEM.

Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur le Professeur Gérard DREYFUS, directeur du Laboratoire d'Électronique de L'ESPCI. Je le remercie très sincèrement de m'avoir initiée aux applications des réseaux de neurones à la Classification, puis à l'Automatique, et pour la confiance qu'il m'a accordée en m'associant aux recherches de son laboratoire. Nos nombreuses et stimulantes discussions ont aussi beaucoup contribué à la clarification des notions ainsi qu'à la présentation du mémoire. Qu'il reçoive l'expression de ma très grande reconnaissance.

Mes plus vifs remerciements vont à Monsieur Léon PERSONNAZ, Maître de Conférences, qui m'a guidée et épaulée tout au long de ces années de thèse. L'ensemble de mon travail lui doit énormément, et en particulier ce mémoire, qui eût été plus concis cependant, si j'avais su tirer meilleur parti de son enseignement.. Qu'il soit salué pour son exigence et sa rigueur exemplaires, ainsi que pour son art accompli de la maïeutique, qui m'ont grandement aidée à structurer et peut-être même à " penser " mon travail de recherche.

Monsieur Daniel CANAS, Ingénieur à la SAGEM, a également suivi de très près mes recherches. Ses précieuses compétences en Automatique, alliées à un intérêt marqué pour les réseaux de neurones, m'ont conduite à approfondir plusieurs parties de mon travail, en particulier celles qui concernent la commande. Qu'il soit chaleureusement remercié pour son enthousiasme, ainsi que pour sa bonne humeur toute méridionale.

Je remercie très sincèrement Madame le Professeur Claude ALQUIÉ d'avoir accepté la présidence de mon jury.

La partie de mon travail concernant la modélisation de processus doit beaucoup aux travaux de Monsieur le Professeur Lennart LJUNG, qui font référence dans ce domaine. Je suis très sensible au grand honneur qu'il m'a fait en acceptant d'examiner mon mémoire.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur le Professeur Jean-Pierre CORRIOU, qui a examiné mon mémoire avec attention et rigueur. Je formule le vœu que les concepts et les méthodes

développés dans ce travail puissent être rapidement appliquées au domaine du Génie Chimique qui est le sien.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur le Professeur A. NAZIN, pour avoir accepté de faire partie de mon jury, et ainsi témoigné son intérêt pour mes recherches. J'espère que son prochain séjour au Laboratoire me permettra de bénéficier de ses grandes connaissances.

Je remercie vivement Monsieur le Professeur Jean-Jacques SLOTINE, dont les travaux font autorité en commande non linéaire, neuronale en particulier, ainsi qu'en robotique, et dont la participation à la soutenance en tant que membre invité m'honore beaucoup.

Ces années de thèse se sont enrichies de fructueux échanges avec mes collègues de l'ESPCI, dans une ambiance propice à la re-création autant qu'à la réflexion scientifique. Ainsi, mon travail de thèse prolonge et développe-t-il celui d'Olivier NERRAND. Le sujet voisin de Dominique URBANI nous a également conduits à de nombreuses discussions. Je tiens par ailleurs à remercier François ANSELME, qui a mené à son terme la conception du logiciel neuronal " simul_nn " entreprise par Olivier NERRAND, et créé un environnement informatique remarquable. Le bon déroulement de mes simulations sur ordinateur est aussi dû à l'aide efficace et tranquille de Pierre ROUSSEL, qui consacre une part importante de son temps à la bonne santé de notre réseau. Je remercie enfin Yacine OUSSAR pour sa lecture attentive du mémoire.

Je suis très reconnaissante à Monsieur Pierre CONSTANCIS d'avoir accompagné mes premiers pas à bord du robot REMI, ainsi qu'à Messieurs Philippe LEMOINE et Stéphane SALLÉ, Ingénieurs à la SAGEM. J'adresse tout particulièrement mes remerciements à Monsieur Thierry LEBRET, qui a pris un soin constant de REMI, immortalisé en vidéo les essais les plus périlleux, et énergiquement contribué à la réussite des expériences en tout-terrain sur les pistes humides et pentues de l'ÉTAS.

Mes remerciements les plus affectueux vont à Janine RIVALS, pour avoir traqué sans merci les nombreux germanismes, abus d'écriture, raisonnements approximatifs… qui émaillaient encore les dernières versions de ce mémoire.

Je tiens enfin à remercier Mesdames M. BRETAGNOLLE et V. FUCHS pour l'impression de ces volumes.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE. **1**

Première partie :
MODÉLISATION ET COMMANDE DE PROCESSUS PAR RÉSEAUX DE NEURONES.

Chapitre 1 : Réseaux de neurones pour la modélisation et la commande de processus. **5**

Problématique de la conception d'un système de commande. **19**

Chapitre 2 : Modèles de processus. **23**

Chapitre 3 : Estimation des paramètres d'un modèle. **39**

Chapitre 4 : Exemples de modélisation de processus. **51**

Chapitre 5 : Commande de processus. **79**

Chapitre 6 : Exemples de commande de processus. **113**

Deuxième partie :
APPLICATION AU PILOTAGE D'UN VÉHICULE AUTONOME.

Introduction au pilotage de véhicules autonomes. **137**

Chapitre 7 (confidentiel, volume II) : Modélisation du véhicule. **147**

Chapitre 8 (confidentiel, volume II) : Commande du véhicule. **165**

CONCLUSION GÉNÉRALE. **189**

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES. **191**

ANNEXES.

Annexe I : Apprentissage des réseaux de neurones. **197**

Annexe II : Systèmes de commande linéaire par simple bouclage et avec modèle interne. **207**

Annexe III : Article.

Annexe IV : Article.

TABLE DES MATIÈRES DÉTAILLÉE

INTRODUCTION GÉNÉRALE. **1**

Première partie :
MODÉLISATION ET COMMANDE DE PROCESSUS PAR RÉSEAUX DE NEURONES.

Chapitre 1 : RÉSEAUX DE NEURONES POUR LA MODÉLISATION ET LA COMMANDE DE PROCESSUS. **5**
Introduction. 5
I. Les réseaux de neurones. 7
I.1. Les réseaux de neurones non bouclés. 8
I.2. Les réseaux de neurones bouclés. 10
II. Propriétés d'approximation des réseaux de neurones. 12
II.1. Réseaux non bouclés. 12
II.2. Réseaux bouclés. 13
III. Apprentissage des réseaux de neurones. 13
III.1. Principe général. 14
III.2. Expression de la fonction de coût. 16
III.3. Minimisation de la fonction de coût. 17
Conclusion. 18

PROBLÉMATIQUE DE LA CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE COMMANDE. **19**

Chapitre 2 : MODÈLES DE PROCESSUS. **23**
Introduction. 23
I. Modèles-hypothèse sans bruit. 24
I.1. Modèles d'état et modèles entrée-sortie. 24
I.2. Prédicteurs associés aux modèles-hypothèse sans bruit. 27
II. Modèles-hypothèse avec bruit. 32
II.1. Perturbations non mesurées. 32
II.2. Prédicteurs associés aux modèles-hypothèse avec bruit. 33
Conclusion. 38

Chapitre 3 : ESTIMATION DES PARAMÈTRES D'UN MODÈLE. **39**
Introduction. 39
I. Séquences d'apprentissage. 39
I.1. Séquence des entrées de commande. 39
I.2. Séquences d'apprentissage et estimation de la performance. 40
II. Algorithmes d'apprentissage. 41
II.1. Prédicteurs non bouclés. 42
II.2. Prédicteurs bouclés. 44
III. Sélection et utilisations du prédicteur. 48
III.1. Sélection du prédicteur. 48
III.2. Utilisations du prédicteur. 49
Conclusion. 50

Chapitre 4 : EXEMPLES DE MODÉLISATION DE PROCESSUS. **51**
Introduction. 51
I. Modélisation d'un processus simulé par un modèle entrée-sortie. 51
I.1. Présentation. 51
I.2. Modélisation du processus sans bruit. 53
I.3. Modélisation du processus avec bruit. 54
II. Modélisation d'un processus simulé par un modèle d'état. 62
II.1. Présentation. 62
II.2. Modélisation d'état. 65
II.3. Modélisation entrée-sortie. 68
III. Modélisation d'un actionneur hydraulique. 71
III.1. Présentation. 71
III.2. Modélisation entrée-sortie. 72
III.3. Modélisation d'état. 74
III.4. Interprétation et comparaisons. 76
Conclusion. 77

Chapitre 5 : COMMANDE DE PROCESSUS. **79**
Introduction. 79
I. Régulation de l'état. 82
I.1. Recherche d'un régulateur optimal ab initio. 84
I.2. Recherche d'un régulateur à partir de trajectoires optimales. 84
I.3. Apprentissage des régulateurs optimaux. 85
II. Poursuite et régulation de la sortie. 88
II.1. Correcteurs-S et -D théoriques. 91
II.2. Apprentissage des correcteurs-S et -D. 96
II.3. Systèmes de commande par simple bouclage (SCSB). 98
II.4. Systèmes de commande avec modèle interne (SCMI). 103
Conclusion. 112

Chapitre 6. EXEMPLES DE COMMANDE PROCESSUS. **113**
Introduction. 113
I. Poursuite et régulation de la sortie. 113
I.1. Présentation. 113
I.2. Apprentissage des correcteurs-S et -D. 114
I.3. Test des correcteurs avec le modèle perturbé. 118
I.4. Systèmes de commande par simple bouclage (SCSB). 119
I.5. Systèmes de commande avec modèle interne (SCMI). 122
I.6. Processus avec bruit. 127
II. Commande à variance minimale. 127
II.1. Présentation. 127
II.2. Systèmes de commande à variance minimale. 127
II.3. Mise en œuvre. 129
Conclusion. 133

Deuxième partie :
APPLICATION AU PILOTAGE D'UN VÉHICULE AUTONOME.

INTRODUCTION AU PILOTAGE DE VÉHICULES AUTONOMES. **137**
I. Objet et enjeux de l'étude. 141
II. Architecture de mobilité d'un véhicule autonome. 142
II.1. Architecture de mobilité classique. 142
II.2. Réalisation neuronale. 145
III. Présentation du véhicule REMI. 147

Chapitre 7 (confidentiel, volume II) : MODÉLISATION DU VÉHICULE. **147**
Introduction. 147
I. Modélisation latérale. 147
I.1. Modélisation de l'actionneur du volant. 147
I.2. Modélisation du comportement latéral de REMI. 151
I.3. Modèle latéral global. 155
II. Modélisation longitudinale. 156
II.1. Éléments de modélisation physique. 156
II.2. Modélisation neuronale. 161
Conclusion. 164

Chapitre 8 (confidentiel, volume II) : COMMANDE DU VÉHICULE. **165**
Introduction. 165
I. Asservissement latéral. 165
I.1. Apprentissage d'un régulateur neuronal de stabilisation sur trajectoire. 167
I.2. Choix d'un point-cible. 169
I.3. Résultats expérimentaux. 171
II. Asservissement longitudinal. 175
II.1. Apprentissage d'un correcteur-S. 175
II.2. Résultats expérimentaux (Commande avec Modèle Interne). 182
III. Asservissement complet en tout-terrain. 184
Conclusion. 187

CONCLUSION GÉNÉRALE. **189**

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES. **191**

ANNEXES.

Annexe I : APPRENTISSAGE DES RÉSEAUX DE NEURONES. **197**
I. Calcul de la fonction de coût et de son gradient. 200
I.1. Calcul de la fonction de coût, ou propagation. 201
I.2. Calcul du gradient de la fonction de coût, ou rétro-propagation. 202
I.3. Résumé des calculs. 202
II. Modification des coefficients. 203
II.1. Méthode de gradient à pas constant. 204
II.2. Méthodes à pas variable. 204
II.3. Méthode quasi-newtonienne à pas variable. 205

Annexe II : SYSTÈMES DE COMMANDE LINÉAIRE PAR SIMPLE BOUCLAGE ET AVEC MODÈLE INTERNE. **207**
Introduction. 207
I. Correcteurs -S et -D. 207
I.1. Expressions des correcteurs dans le cas d'un modèle entrée-sortie. 208
I.2. Expressions des correcteurs dans le cas d'un modèle d'état. 210
II. Systèmes de commande pour la poursuite et la régulation. 212
II.1. Systèmes de commande par simple bouclage (SCSB). 213
II.2. Systèmes de commande avec modèle interne (SCMI). 216
Conclusion. 223

Annexe III : " REAL-TIME CONTROL OF AN AUTONOMOUS VEHICLE : A NEURAL NETWORK APPROACH TO THE PATH FOLLOWING PROBLEM ".

Annexe IV : " MODELING AND CONTROL OF MOBILE ROBOTS AND INTELLIGENT VEHICLES BY NEURAL NETWORKS ".