THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PARIS 6

Spécialité :

INFORMATIQUE

présentée

par **Abdelmoumène TOUDEFT**

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

Sujet de la thèse :

Méthodes Connexionnistes pour la Commande des Systèmes Non Linéaires: Application à la Régulation des Rivières

Soutenue le 08 Décembre 1998

Devant le jury composé de :

MM

- **M. MILGRAM (président)**
- **J. AGUILAR-MARTIN (rapporteur)**
- **S. CANU (rapporteur)**
- **P. GALLINARI (directeur de thèse)**
- **P. KOSUTH (examinateur)**

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PARIS 6

Spécialité :

INFORMATIQUE

présentée

par **Abdelmoumène TOUDEFT**

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

Sujet de la thèse :

Méthodes Connexionnistes pour la Commande des Systèmes Non Linéaires: Application à la Régulation des Rivières

Soutenue le 08 Décembre 1998

Devant le jury composé de :

MM

- **M. MILGRAM (président)**
- **J. AGUILAR-MARTIN (rapporteur)**
- **S. CANU (rapporteur)**
- **P. GALLINARI (directeur de thèse)**
- **P. KOSUTH (examinateur)**

A la mémoire de mon frère Madjid…

…qui avait toujours su me servir d’exemple.

Remerciements

Mon intérêt pour le domaine des réseaux connexionnistes a commencé lorsque j'ai suivi le cours de Madame et de Monsieur les Professeurs Françoise Fogelman et Patrick Gallinari, en DEA. Depuis, j'ai effectué tous mes travaux de recherches dans le domaine sous la direction de Monsieur le Professeur Patrick Gallinari, d'abord en reconnaissance d'images puis en commande de systèmes. Depuis donc plusieurs années, j'ai bénéficié de ses conseils avisés et de ses enseignements. Je lui exprime ici ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères.

Ce travail a été effectué dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire d'Informatique de l'Université Paris 6 (LIP6) et la division Irrigation du groupement de Montpellier du Cemagref (institut français de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement). Je remercie sincèrement Monsieur le Docteur Pascal Kosuth, chef de la division Irrigation, pour m'avoir accueilli dans sa division et pour les moyens qu'il a mis à ma disposition. C'est à lui que revient l'initiative de ce travail.

Je remercie très sincèrement Monsieur le Professeur Maurice Milgram d'avoir accepté la présidence du jury de cette thèse.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur Joseph Aguilar-Martin, Directeur de Recherche au CNRS, d'avoir accepté de juger mon travail de thèse et pour avoir examiné mon mémoire avec attention et rigueur, malgré ses nombreuses occupations.

J'exprime aussi ma reconnaissance à Monsieur le Professeur Stéphane Canu de l'institut national des sciences appliquées de Rouen, qui m'a fait l'honneur de juger mon travail de thèse.

Je remercie les Docteurs Salam Sawadogo et Pierre-Olivier Malaterre pour m'avoir guidé avec beaucoup de gentillesse et de disponibilité dans mes premiers pas dans le domaine de l'automatique des systèmes linéaires.

Que mes parents trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude et de ma reconnaissance pour tout ce qu'ils ont su si bien m'apporter. C'est à eux que je dois tous mes acquis.

Je remercie ma femme pour m'avoir soutenu et encouragé pendant les moments difficiles de la thèse, moments où les neurones, naturels et artificiels, ne voulaient plus apprendre.

Je remercie ma belle-sœur et mes beaux-frères ainsi que leurs familles pour leur aide et leurs encouragements.

Mes remerciements à tous mes ami(e)s, et en particulier à Zahia, Ziane, Azeddine, Abdelkrim, Lahcen et Lounès, pour leur contributions à l'accomplissement de ce travail.

Abstract

This thesis deals with the nonlinear systems control problem using neural networks. The complexity of the stability and convergence analysis has held up the development of a general framework to solve this problem.

To take advantage of the neural networks capabilities without complicating the stability analysis, we have proposed a neuro-adaptive approach combining an open loop neural network controller, to deal with the nonlinearities, and a closed loop linear adaptive controller, to handle the perturbations.

The approach has been developed step by step and experimented on a simulated model of a river. The later is a nonlinear non-minimum phase system with a varying time-delay and submitted to perturbations. The approach can however be applied in a general context.

We have first proposed an adaptive control system using one linear neuron with one input and a bias. By reformulating the Widrow-Hoff rule using linear transfer functions, we found an on-line adjustment law for the adaptation rate to achieve a linearization by adaptation of the control system. This linearization allows to adaquately cope with the perturbations acting on a linear process corresponding to a river in a stationary state.

We have then put in a preminent position the ability of the neural networks to learn the varying time-delay characteristic of the nonlinear process.

To control the process, we have first trained a neural network to implement an open lopp controller. Since the process is a non-minimum phase system, we were obliged to propose and compare several methods to obtain a satisfactory controller.

To handle the perturbations, we have added a closed loop linear adaptive controller in parallel to the neural network open loop controller. Our experiments have shown the validity of this approach and we have proposed a preliminary stability analysis. The constraints of the analysis need to be made more flexible and the robustness of the approach must be evaluated.

Finally, we have proposed several variants of the distal in space learning approach. The theoretical analysis of these variants has shown their usefulness.

Key-Words

Neural Networks, Nonlinear Control, Connexionnist Learning Control, Adaptive Control, System Modelisation Using Neural Networks, Varying Time-Delay Systems, Non-Minimum Phase Systems, Regulation of Water Delivery Systems.

Résumé

Cette thèse traite du problème de la commande connexionniste de procédés non linéaires. La difficulté d'établir des preuves de stabilité et de convergence a empêché le développement de méthodes fiables de résolution de ce problème.

Pour exploiter les caractéristiques des réseaux de neurones sans compliquer l'étude de la stabilité du système, nous avons proposé une approche neuro-adaptative utilisant un réseau de neurones comme contrôleur en boucle ouverte pour compenser les non linéarités du procédé et un contrôleur adaptatif linéaire en boucle fermée pour traiter les perturbations.

L'approche a été développée graduellement et mise en oeuvre sur un modèle de simulation d'une rivière constituant un système non linéaire, à phase non minimale, soumis à des perturbations et ayant un temps de retard variant avec son état. Cependant, l'approche peut être appliquée dans un cadre général.

Nous avons d'abord proposé un système de commande adaptatif avec un neurone linéaire à une entrée et un biais. La formulation sous forme de fonctions de transfert de la régle de Widrow-Hoff nous a permis de déterminer une règle d'ajustement en ligne du pas d'adaptation et de réaliser une linéarisation par adaptation du système de commande, permettant ainsi un traitement adéquat des perturbations agissant sur un procédé linéaire correspondant à une rivière en régime permanent.

La capacité des réseaux de neurones à capter la nature des variations du temps de retard du procédé a été mise en évidence dans une étape préalable à sa commande.

Nous avons ensuite procédé à l'apprentissage d'un réseau de neurones pour commander le procédé en boucle ouverte. Ce dernier ayant une phase non minimale, nous avons du proposer et comparer plusieurs méthodes pour aboutir à un contrôleur adéquat.

Pour traiter les perturbations, nous avons ajouté, en parallèle avec le réseau de neurones, un contrôleur adaptatif linéaire en boucle fermée. Nous avons montré expérimentalement la faisabilité de l'approche et avons proposé une première étude de la stabilité du système. Les hypothèses restrictives posées gagneraient à être assouplies et la robustesse du système reste à évaluer.

Finalement, nous avons proposé plusieurs variantes de l'approche d'apprentissage du réseau de neurones contrôleur et avons mis en évidence leurs apports par des analyses théoriques.

Mots-Clés

Réseaux de Neurones, Commande Non Linéaire, Commande par Apprentissage Connexionniste, Commande Adaptative, Modélisation Connexionniste, Systèmes à Temps de Retard Variable, Systèmes à Phase Non Minimale, Régulation des Cours d'eau.

Sommaire

Notations

y	sortie du procédé en absence de perturbations.
y_p	sortie du procédé en présence de perturbations.
y^*	consigne de contrôle.
y_m	sortie d'un modèle du procédé.
u	commande calculée par un contrôleur.
u^*	commande idéale (produisant une erreur nulle en sortie de procédé).
x	état du système.
θ	vecteur de paramètres d'un modèle connexionniste du procédé.
η	vecteur de paramètres d'un contrôleur connexionniste.
t	temps.
k	numéro d'itération du processus d'apprentissage.
∇f	gradient de la fonction f.
$Re\{X\}$	partie réelle de X
Val.prop.[M]	veleurs propres de M.

INTRODUCTION

La théorie de contrôle fournit des outils d'analyse et de synthèse de contrôleurs pour les procédés linéaires. Appliquée à un procédé non linéaire, la théorie permet d'obtenir un contrôleur pour un modèle linéaire du procédé. Ce modèle étant proche du procédé au voisinage du point de fonctionnement où il a été identifié, le contrôleur est valable pour le procédé dans ce voisinage. Cependant, il suffit que le procédé s'éloigne suffisamment de ce point, sous l'effet d'une perturbation par exemple, pour que les performances du contrôleur se détériorent.

Afin de combler cette limite, et obtenir des contrôleurs valables sur de larges plages de fonctionnement, la théorie de contrôle fournit quelques techniques (le contrôle robuste et le gain scheduling, par exemple). Le contrôle adaptatif représente une autre alternative. Dans ce cas, le contrôleur a toujours une structure linéaire mais ses paramètres sont adaptables afin de maintenir une bonne performance. Un tel contrôleur permet de commander un procédé linéaire inconnu et, sous certaines conditions, des lois d'adaptation stables faisant converger les paramètres vers leurs bonnes valeurs ont été définies. Plus encore, un tel contrôleur peut commander un procédé linéaire variant, mais lentement, dans le temps. Plusieurs travaux ont montré la possibilité d'utiliser le contrôle adaptatif sur des procédés non linéaires, mais dans ce cas les paramètres du contrôleur ne convergent pas vers des valeurs fixes. L'adaptation ne peut donc être arrêtée. Ceci est dû au fait qu'un contrôleur linéaire ne peut pas modéliser la dynamique inverse non linéaire du procédé. De plus, le procédé doit être faiblement non linéaire, dans le sens où le changement de la dynamique en cours de fonctionnement est suffisamment lent pour que le procédé puisse être assimilé à un procédé linéaire variant dans le temps.

Pour arriver à synthétiser des contrôleurs fixes pour des procédés non linéaires, il faut pouvoir concevoir des contrôleurs non linéaires. La théorie de contrôle non linéaire a déjà obtenu plusieurs résultats théoriques (voir par exemple [Isidori 89]). Les réseaux connnexionnistes constituent une autre voie pour aborder le problème du contrôle non linéaire.

Après plusieurs années d'hibernation, les réseaux connexionnistes ont connu un formidable regain d'intérêt depuis le milieu des années 80. Ce réveil a été favorisé, entre autres, par l'échec des techniques d'intelligence artificielle classique sur des problèmes nécessitant la manipulation de grandes quantités de données numériques, et par le développement d'ordinateurs très puissants permettant la simulation de systèmes complexes.

Les réseaux connexionnistes ont montré des vertus qui ont permis leur application dans des domaines très variés. Sans être exhaustif, on peut citer: la classification et la reconnaissance des formes, le traitement d'images [Viennet 92], la reconnaissance de la parole [Bottou 91], du locuteur [Bennani 92] et des langages [Graïne 94][1].

Grâce à leur capacité d'apprentissage à partir de données empiriques et leur qualité d'approximateurs universels [Hornik et al. 89], les réseaux connexionnistes sont apparus comme des candidats de choix pour l'implémentation de contrôleurs non linéaires. L'idée de base est d'exploiter les caractéristiques de ces modèles pour acquérir, par apprentissage, l'information manquante a priori permettant la conception de contrôleurs non linéaires.

Spécificité de la tâche des réseaux connexionnistes en contrôle

Lors de l'application des méthodes connexionnistes en classification et en reconnaissance des formes, on exige essentiellement des réseaux d'avoir un pouvoir discriminant, pour séparer les différentes classes. Par exemple, dans un problème à deux classes, en codant les classes par +1 et -1, on peut se contenter que le réseau réponde par une sortie positive là où il doit répondre +1 et par une sortie négative là où il doit répondre -1. De plus, un taux de reconnaissance de, par exemple, 98% des formes est généralement considéré comme une très bonne performance.

Par contre, en contrôle, on exige de la précision. Il peut ainsi arriver qu'une erreur relative de 1% se révèle inacceptable. Ceci parce qu'en contrôle, les réseaux sont incorporés dans des systèmes dynamiques et, par conséquent, les erreurs commises à un instant donné peuvent avoir des répercussions sur la qualité des calculs futurs. Des problèmes de stabilité et de robustesse sont donc à prendre en considération.

Plan

Ce rapport de thèse est composé de deux parties:

- La première partie présente un état de l'art du contrôle connexionniste et regroupe les différentes approches du domaine, développées au cours de ces dernières années.

- La deuxième partie comporte des exemples de mise en oeuvre des méthodes d'apprentissage connexionniste à des fins de modélisation et de contrôle.

---

[1] Pour ne citer que quelques thèses réalisées en France.

Le contenu des deux parties est détaillé ci-dessous.

Partie 1: Etat de l'art

Le chapitre 1 comporte des généralités, des définitions préliminaires et les notations nécessaires pour comprendre la suite de ce rapport.

Le chapitre 2 est consacré aux modèles de réseaux connexionnistes qui ont été utilisés dans cette thèse ainsi qu'aux algorithmes d'apprentissage correspondants.

Parce qu'un contrôleur adaptatif peut être vu comme un réseau de neurones linéaire, le contrôle connexionniste peut être vu comme une extension non linéaire du contrôle adaptatif. Le but de cette extension est de doter le contrôleur de capacités d'apprentissage. Les similitudes et les différences entre le contrôle adaptatif et le contrôle par apprentissage sont considérées au chapitre 3.

Parce qu'une bonne partie des méthodes de commande, connexionniste ou non, fait appel à des modèles du procédé à contrôler, la présentation des méthodes de modélisation des procédés non linéaires était nécessaire. Ceci a été fait au chapitre 4.

Malgré les difficultés théoriques du contrôle non linéaire, la littérature fourmille d'exemples d'application des réseaux connexionnistes en contrôle. La grande variété des tâches considérées, aussi complexes les unes que les autres, ont tendance à faire penser que les réseaux connexionnistes sont capables de contrôler n'importe quel procédé. Le chapitre 5 présente les différentes approches qui ont emergé ainsi que quelques travaux entrant dans le cadre de chacune d'elles.

Les principales questions théoriques sont celles relatives à la stabilité du système de contrôle connexionniste et à la convergence des paramètres du réseau contrôleur. Le manque d'information a priori, la présence des non linéarités et de la boucle d'apprentissage rendent difficile le traitement de ces questions. Quelques tentatives ont cependant été effectuées. Elles sont regroupées au chapitre 6.

Partie 2: Mise en oeuvre

Dans notre travail, nous nous sommes intéressé à l'utilisation de réseaux connexionnistes pour la commande d'une rivière. Celle-ci constitue un système non linéaire mono-variable (c'est à dire, à une entrée et une sortie) dont l'entrée est le débit à l'amont de la rivière et dont la sortie est le débit à son aval.

Cependant, la non disponibilité de données sur une rivière réelle et l'impossibilité de tester nos réseaux de neurones sur une telle rivière nous ont poussé à travailler sur un modèle de simulation réalisé avec le logiciel Matlab. Ce modèle constitue un système non linéaire mono-variable à temps discret. L'entrée correspond au débit à l'amont de la rivière et la sortie correspond au débit à son aval. Le système est aussi à phase non minimale (c'est à dire, à inverse instable), avec un temps de retard variable et soumis à des perturbations correspondant à des prélèvements et/ou à des apports, prévus ou non, d'eau effectués sur la rivière. Le temps de retard correspond au temps de transfert d'eau de l'amont vers l'aval de la rivière.

La régulation classique de ce genre de systèmes s'effectue sous l'hypothèse d'un temps de retard fixe égal au temps de transfert correspondant à un régime de fonctionnement donné. Cette hypothèse pose un certain nombre de problèmes que nous espérons résoudre par l'utilisation des réseaux connexionnistes. Afin d'expliciter ces problèmes et de fixer les objectifs de cette partie du rapport, nous avons conçu au chapitre 7 un régulateur linéaire selon un schéma de prédiction de Smith [Smith 59]. Dans ce chapitre sont aussi définis les critères d'évaluation et de comparaison des différents contrôleurs développés dans cette partie.

Avant d'aborder le problème plus complexe de la commande du procédé non linéaire, nous nous sommes intéressé, au chapitre 8, à la commande adaptative d'un procédé linéaire avec retard et soumis à des perturbations. Le procédé correspond à une rivière en régime permanent et les perturbations correspondent à des prélèvements ou à des apports d'eau effectués sur la rivière. Nous avons montré comment un contrôleur aussi simple qu'un neurone linéaire avec biais doté de la règle du delta est capable de commander le procédé. De plus, nous avons déterminé une loi d'ajustement en ligne du pas d'adaptation permettant un traitement adéquat des perturbations.

Les méthodes d'apprentissage de contrôleurs que nous avons considérées pour le procédé non linéaire sont indirectes. Elles font donc appel à des modèles du procédé. Au chapitre 9, nous avons considéré les problèmes d'acquisition de ces modèles.

La commande du procédé non linéaire est considérée aux chapitres 10, pour les problèmes de variations du temps de retard et d'inversion de systèmes, et 11, pour le problème des perturbations. Pour ce dernier problème, nous avons proposé une architecture de contrôle neuro-adaptative dans laquelle nous avons combiné un réseau de neurones et un contrôleur adaptatif linéaire pour résoudre la tâche globale de commande en présence de perturbations. Nous avons également proposé une analyse théorique de la stabilité d'une telle architecture.

Enfin, nous avons procédé, au chapitre 12, à une analyse théorique de l'approche d'apprentissage distant, approche utilisée au chapitre 10 pour la conception des contrôleurs. L'accent est mis, dans ce chapitre, sur la vitesse de convergence de l'algorithme d'apprentissage.

PARTIE 1: ETAT DE L’ART

1. GENERALITES ET DEFINITIONS PRELIMINAIRES

Introduction

Cette thèse se situe au carrefour de deux grands domaines de recherche: l'automatique et l'informatique. Pour faciliter la lecture de ce mémoire à ceux qui ne sont ni en informatique ni en automatique, nous introduisons dans ce chapitre des notions de base de l'automatique et de l'analyse des systèmes.

1.1. Système

Il n'existe pas de définition générale des systèmes, étant donnée leur grande variété. Toutefois, dans le cadre de cette thèse, nous utiliserons la définition d'une classe resteinte de systèmes qui est la suivante.

1.1.1. Définition

Un **système** est un ensemble de variables en interaction.

Parmi les variables qui interagissent au sein d'un système, nous distinguerons trois types:

1. **Les variables de sortie**: ce sont les variables dont le comportement nous intéresse, et que nous cherchons à contrôler. Nous les regrouperons dans le vecteur y.

2. **Les variables d'entrée**: ce sont les variables dont le comportement influe sur celui des variables de sortie. On en distingue deux sortes:

- **Les entrées de commande**: ce sont les variables sur lesquelles on peut agir, en particulier pour contrôler les variables de sortie. Nous les regrouperons dans le vecteur u.

- **Les entrées de perturbation**: ce sont les variables qu'on ne peut pas contrôler, mais qui agissent quand même sur les variables de sortie. Nous les regrouperons dans le vecteur p.

3. **Les variables d'état**: ce sont des variables internes au système. Comme leur nom l'indique, elles désignent l'état dans lequel se trouve le procédé à un instant donné et résument en quelque sorte son passé. Nous les regrouperons dans le vecteur x.

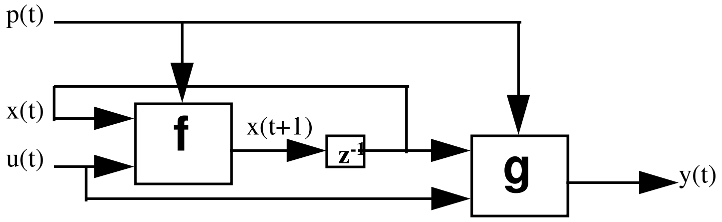
Nous définissons maintenant les interactions entre ces différentes variables par:

$$(S_1)\ \begin{cases} x(t+1) = f(x(t), u(t), p(t)) \\ y(t) = g(x(t), u(t), p(t)) \end{cases}$$

où f et g sont des fonctions déterministes[2], et t désigne la variable de temps discret[3].

(S_1) représente la description des systèmes la plus générale utilisée dans le cadre de la modélisation et du contrôle: c'est la **représentation dans l'espace d'état**.

La figure (1.1.1) montre une représentation diagrammatique de (S_1).



z^{-1} représente l'opérateur de délai.

Figure 1.1.1. Diagramme de la représentation dans l'espace d'état.

Bien souvent, nous serons amenés à utiliser des **représentations entrée/sortie** des systèmes. Ce type de représentation ne fait pas intervenir l'état x du système et permet de décrire le comportement du système telle qu'il est vu par un observateur extérieur. Elle se présente sous la forme:

(S_2) $y(t) = h(y(t-1),...,y(t-n), u(t-r),...,u(t-r-m), p(t-s),...,p(t-s-q))$

où r est le temps de retard du système.

La figure (1.1.2) montre la représentation diagrammatique de (S_2) que nous utiliserons tout au long de cette thèse. Toutefois, nous serons quelques fois amenés à utiliser la représentation plus explicite de la figure (1.1.3).

---

[2] Des fonctions stochastiques peuvent être considérées.

[3] Nous ne considérons dans cette thèse que les systèmes à temps discret. Des développements similaires peuvent être effectués pour les systèmes à temps continu.

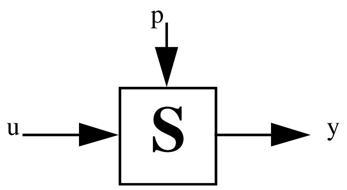


Figure 1.1.2. Diagramme implicite de la représentation entrée/sortie.

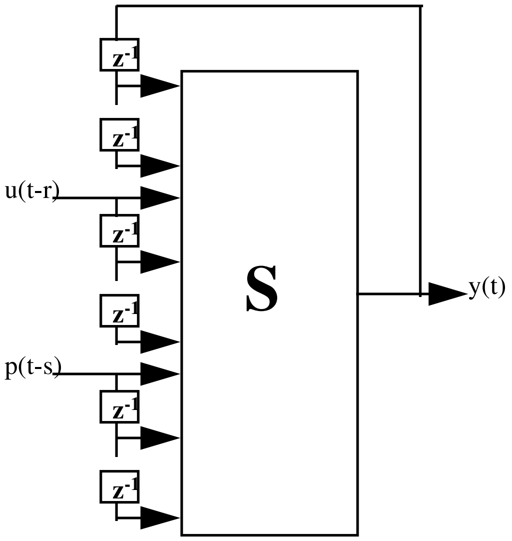


Figure 1.1.3. Diagramme explicite de la représentation entrée/sortie.

1.1.2. Procédé

Nous appellerons **procédé** le système particulier que l'on désire modéliser ou commander.

1.1.3. Système linéaire

Un système décrit par sa représentation S_1 dans l'espace d'état est dit linéaire si les fonctions f et g sont linéaires. On écrit alors, en absence de perturbations :

$$(S_1)\begin{cases} x(t+1) = A.x(t) + B.u(t) \\ y(t) = C.x(t) + D.u(t) \end{cases}$$

où A, B, C, et D sont des matrices constantes.