

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'origine des nombreux travaux actuels sur les réseaux de neurones formels en Automatique peut être trouvée dans les travaux de Norbert Wiener, qui introduisit les méthodes statistiques dans les domaines de l'Automatique et des Télécommunications dès 1949, et dans ceux de Kalman et Bucy, qui combinèrent méthodes statistiques et représentation d'état. Néanmoins, si les concepts sont anciens, le véritable essor des réseaux de neurones en Automatique ne remonte qu'aux cinq dernières années. Cet essor a notamment été favorisé par les résultats des travaux effectués auparavant pour les applications des réseaux de neurones à la classification ; c'est ainsi que divers apports, qu'ils soient fondamentaux, tels que les théorèmes d'approximation universelle, ou plus techniques, tels que la rétropropagation, ont un impact direct sur les applications à l'Automatique. Néanmoins, cette dernière discipline a sa problématique et ses exigences propres, qui nécessitent et justifient des développements spécifiques.

Les réseaux de neurones, ensembles d'opérateurs non linéaires interconnectés, forment une famille de fonctions non linéaires, qui permet de construire, par apprentissage, une très large classe de modèles et de correcteurs. Néanmoins, pour la modélisation de processus, il n'est pas suffisant de disposer d'une famille de modèles très large ; encore faut-il déterminer les performances optimales réalisables par un modèle, compte tenu notamment de perturbations aléatoires non mesurables, afin de poser correctement le problème de l'apprentissage. De même, pour la commande, il est nécessaire de caractériser les propriétés des systèmes de commande en matière de stabilité et de performance, indépendamment de la réalisation éventuelle du correcteur par un réseau de neurones. Il s'agit là de questions qui n'avaient pas été abordées, ou seulement de façon très schématique, lorsque notre travail a débuté. D'autre part, il existe très peu d'applications opérationnelles des réseaux de neurones pour la commande de processus industriels. Nous avons tenté de combler ce double manque dans notre travail, qui comporte deux parties : une étude théorique consacrée à la modélisation et à la commande de processus non linéaires, et une étude appliquée, consacrée au pilotage de REMI, véhicule autonome tout-terrain conçu et réalisé par la société SAGEM, dans laquelle sont mis en œuvre les concepts et techniques introduits dans la première partie.

Sur le plan théorique, nous présentons la modélisation et la commande de processus par réseaux de neurones dans un cadre aussi général que possible, en les plaçant dans la perspective de l'Automatique classique, linéaire en particulier. Du point de vue de la modélisation, les résultats concernant les systèmes linéaires nous aident à formuler des prédicteurs non linéaires optimaux théoriques correspondant à diverses hypothèses sur le bruit intervenant dans le processus à

modéliser ; une méthodologie d'apprentissage associée fournit des prédicteurs neuronaux qui sont des réalisations des prédicteurs théoriques. Nous proposons ensuite une famille de systèmes de commande neuronaux, dont nous étudions les propriétés et les liens avec les systèmes de commande classique, linéaire ou non, en insistant notamment sur la robustesse ; ceci nous conduit à la commande avec modèle interne.

Sur le plan pratique, nous illustrons notre démarche par une application industrielle, le pilotage du véhicule REMI, dont volant, accélérateur et freins sont commandés par des réseaux neuronaux.

Les deux parties de ce mémoire sont organisées comme suit :

La première partie est consacrée à la présentation théorique de la modélisation et de la commande non adaptatives par réseaux de neurones, accompagnée de nombreux exemples de mise en œuvre. Le chapitre 1 expose les propriétés mathématiques des réseaux de neurones, et les principes généraux de leur apprentissage pour la modélisation et la commande (les aspects pratiques de l'optimisation sont regroupés dans l'annexe I). Le chapitre 2 présente les différentes structures de modèles neuronaux que nous utilisons. Le chapitre 3 est consacré à la définition du système d'apprentissage associé à une structure de modèle donnée, et à la sélection d'un modèle parmi les modèles retenus. Le chapitre 4 montre la mise en œuvre des principes exposés pour la modélisation de processus non linéaires simulés, et pour celle de l'actionneur d'un bras de robot réel. Le chapitre 5 traite des systèmes de commande pour la régulation optimale de l'état d'un processus, ainsi que pour la poursuite de la sortie. Nous y analysons les propriétés de ces derniers systèmes (une étude dans le cas linéaire est proposée en annexe II), puis nous introduisons les systèmes d'apprentissage pour la synthèse des correcteurs. Nous nous attachons aux propriétés de robustesse des systèmes de commande étudiés, et développons particulièrement la commande neuronale avec modèle interne. Enfin, le chapitre 6 illustre la mise en œuvre de l'ensemble des systèmes étudiés, à l'aide des processus simulés du chapitre 4.

La deuxième partie de ce mémoire est consacrée au pilotage du véhicule tout-terrain REMI. Le chapitre 7, qui concerne sa modélisation, met en relief l'exploitation conjuguée de connaissances physiques sur le fonctionnement du véhicule, et des capacités de modélisation "boîte noire" des réseaux de neurones. Le chapitre 8 décrit le pilotage du véhicule, qui met en jeu deux systèmes d'asservissement : un système d'asservissement sur trajectoire qui illustre la mise en œuvre de réseaux de neurones pour la régulation optimale, et un système d'asservissement de vitesse qui montre l'intérêt et la faisabilité de la réalisation de systèmes de commande neuronaux avec modèle interne. Enfin, nous présentons les résultats obtenus avec le véhicule sur terrain plat et non accidenté, ainsi qu'en tout-terrain. Pour des raisons de confidentialité, les chapitres 7 et 8 sont regroupés dans un volume séparé. Deux articles publiés consacrés au pilotage de REMI sont néanmoins reproduits dans les annexes III et IV du volume non confidentiel du mémoire.