

CONCLUSION GÉNÉRALE

Tout au long du présent travail, nous avons tiré parti de deux caractéristiques fondamentales des réseaux de neurones :

- *la propriété d'approximation universelle parcimonieuse*, dont l'apport est manifeste pour la modélisation et la commande de processus non linéaires ;
- *l'existence d'algorithmes d'apprentissage également universels*, au sens où leur mise en œuvre ne dépend pas de l'application considérée ni de la complexité du réseau soumis à un apprentissage.

Dans un premier temps, nous avons complété le cadre de l'apprentissage des réseaux de neurones élaboré par O. Nerrand pour des réseaux de type entrée-sortie, en l'étendant aux réseaux les plus généraux que sont les réseaux d'état ; nous avons ainsi disposé d'outils algorithmiques complets et puissants pour la modélisation et la commande de processus dynamiques.

C'est en nous appuyant sur ces deux caractéristiques fondamentales des réseaux de neurones que nous avons :

- déterminé les arguments de la fonction théorique que doit réaliser le réseau de neurones selon la tâche considérée (le prédicteur théorique associé à un modèle-hypothèse donné pour une tâche de modélisation, le correcteur théorique associé au modèle d'un processus pour une tâche de commande) : la propriété d'approximation universelle affirme alors que, si cette fonction existe, elle est réalisable par un réseau de neurones ;
- construit un système d'apprentissage du réseau de neurones (éléments constitutifs, algorithme) conduisant à une réalisation de la fonction théorique, si elle existe : l'universalité des algorithmes d'apprentissage garantit que, en pratique, cette réalisation est possible, quelle que soit la complexité de la fonction.

Dans le domaine de la commande de processus, cette démarche nous a conduit à définir une famille de systèmes de commande fondés soit sur le correcteur-S, qui impose à un système une sortie de référence, soit sur le correcteur-D, qui lui impose une dynamique de référence. Cette famille recouvre une grande partie des systèmes de commande utilisés en Automatique, et notamment en commande "neuronale". Nous avons étudié les avantages et les inconvénients respectifs de ces systèmes, en particulier du point de vue de leur robustesse vis-à-vis de défauts du modèle d'une part, et de défauts du correcteur dus à son apprentissage d'autre part. C'est ainsi que nous avons établi les modalités de la mise en œuvre de systèmes de commande neuronaux avec modèle interne.

Par leur conception même, ces systèmes de commande neuronaux avec modèle interne présentent une bonne tolérance aux défauts de modélisation et aux perturbations ; comme il s'agit de systèmes non adaptatifs, le problème de la stabilité des systèmes d'apprentissage ne se pose pas. Néanmoins, ces systèmes de commande ne sont réalisables, avec des réseaux de neurones, que pour des processus dont le modèle est à inverse stable, alors qu'avec des méthodes classiques, il est possible de modifier la synthèse des correcteurs pour éviter cette restriction. Un développement souhaitable consisterait à élaborer les modifications à apporter au système d'apprentissage lorsque le modèle du processus est à inverse instable (comme cela a été fait pour les méthodes de commande avec modèle interne classiques). La commande prédictive neuronale constitue un autre axe de recherche pour la commande de processus à inverse instable.

Tous les exemples illustratifs choisis présentent une dynamique nettement non linéaire excluant une approche linéaire classique, et mettent en lumière l'apport des réseaux de neurones pour une approche non linéaire. L'application industrielle, le pilotage d'un véhicule autonome en tout-terrain, souligne également cet apport. Pour le pilotage latéral, auparavant réalisé à la SAGEM avec des techniques linéaires, la prise en considération des non linéarités par le correcteur neuronal a permis d'améliorer les performances, sans qu'il soit nécessaire de procéder à aucun réglage après l'apprentissage et la mise en œuvre sur le véhicule. Pour le pilotage longitudinal, aucune technique linéaire ne s'est avérée satisfaisante, et le système de commande neuronal avec modèle interne a obtenu des performances comparables à celle du système non linéaire mis au point à la SAGEM. Ces performances sont très encourageantes dans la mesure où le système de commande n'a fait, ici non plus, l'objet d'aucun réglage supplémentaire. Nous avons ainsi pu vérifier les propriétés de la régulation et de la commande avec modèle interne neuronales, et démontrer la pertinence de l'approche neuronale dans son ensemble sur un problème réel complexe.

L'un des aspects originaux de notre démarche est l'utilisation systématique, pour la conception de modèles et de correcteurs "neuronaux", des connaissances mathématiques du domaine d'application ; nous avons ainsi tiré parti de l'introduction d'éléments ad-hoc dans les réseaux, éléments déterminés par une analyse physique des phénomènes mis en jeu (modélisation), ou du type de performance souhaité (commande). D'un point de vue conceptuel, nous avons décrit et illustré une approche qui est fondamentalement très voisine de celle de l'automaticien classique. Loin de participer de démarches inconciliables, les synthèses classiques et neuronales de modèles ou de systèmes de commande de processus utilisent des concepts et des méthodes communs, et bénéficient mutuellement de leurs contributions originales respectives.