

2^e édition

Réseaux de neurones

Méthodologie et applications

G. Dreyfus, J.-M. Martinez, M. Samuelides
M. B. Gordon, F. Badran, S. Thiria, L. Hérault
Sous la direction de Gérard Dreyfus

© Groupe Eyrolles 2004,
ISBN : 2-212-11464-8

EYROLLES



Avant-propos

Le terme de réseaux de neurones « formels » (ou « artificiels ») fait rêver certains, et fait peur à d'autres. La vérité est à la fois plus prosaïque et plus rassurante ; les réseaux de neurones constituent maintenant une technique de traitement de données bien comprise et maîtrisée, qui devrait faire partie de la boîte à outils de tout ingénieur soucieux de tirer le maximum d'informations pertinentes des données dont il dispose : faire des prévisions, élaborer des modèles, reconnaître des formes ou des signaux, etc. Tous les cursus relatifs au traitement de l'information dans les universités ou grandes écoles consacrent une place plus ou moins importante à ces techniques. Néanmoins, la pénétration de celles-ci dans l'industrie et la finance en France reste très inégale – inférieure, en moyenne, à ce qu'elle est aux États-Unis, en Grande-Bretagne et dans les pays du nord de l'Europe : si telle grande entreprise française du secteur manufacturier utilise couramment les réseaux de neurones dans plusieurs de ses domaines d'activité, telle autre reste attachée, en toutes circonstances, à ses outils traditionnels.

Un ouvrage didactique français, joignant fondements théoriques et applications pratiques dans un langage accessible, s'adressant aux étudiants comme aux ingénieurs, peut contribuer à combler ce retard. Permettre aux décideurs, aux ingénieurs et aux chercheurs de bénéficier de méthodologies claires pour mettre en œuvre avec profit les réseaux de neurones dans des applications industrielles, financières ou bancaires, permettre aux étudiants d'acquérir des bases solides dans ces sujets qui les passionnent, tel a été le but des auteurs du présent ouvrage. Celui-ci apporte également une ouverture générale vers les techniques d'apprentissage, dont les réseaux de neurones constituent un des exemples les plus fréquemment mis en œuvre.

Cet ouvrage reflète l'état de l'art à un moment précis du développement des techniques neuronales : il est donc utile de le placer dans la perspective de l'évolution des méthodes de traitement de l'information. À cet égard, l'histoire des réseaux de neurones constitue un paradoxe : les quelques chercheurs qui, au début des années 1980, ont misé sur le développement de cette technique, ont gagné leur pari ; pourtant, les raisons de ce succès ne sont pas celles qu'ils envisageaient à l'époque. En effet, la motivation initiale du développement de réseaux de neurones formels était « neuromimétique ». Elle partait du constat que les organismes les plus simples – les invertébrés, par exemple – effectuent, sans effort apparent, des tâches que les ordinateurs ne réalisent qu'imparfaitement, au prix de lourds calculs : la reconnaissance d'objets indépendamment de leur taille, de leur orientation et de leur environnement, en est un exemple frappant. Dans ces conditions, pourquoi ne pas s'inspirer du fonctionnement des systèmes nerveux pour concevoir des machines plus habiles que les ordinateurs conventionnels ?

Cette idée avait déjà présidé aux premières recherches sur les réseaux de neurones dans les années 1960 ; elles avaient échoué faute d'outils mathématiques adaptés à la conception et à l'analyse de réseaux de complexité suffisante. De nos jours encore, une approche véritablement « neuromimétique » se heurterait à une difficulté majeure : nul ne sait comment fonctionnent les systèmes nerveux. En dépit des immenses progrès réalisés au cours des vingt dernières années dans le domaine de la neurobiologie expérimentale, des questions aussi fondamentales que celle du codage des informations par le cerveau restent l'objet de nombreuses recherches et de vives controverses, sans réponse définitive. S'il existe de très nombreux modèles du fonctionnement de telle partie du cerveau ou de tel système sensoriel, il n'existe pas de théorie du traitement de l'information par les systèmes nerveux.

Comment, dès lors, pourrait-on s'inspirer utilement de fonctionnements que l'on ne connaît pas ? Si l'analogie avec les systèmes nerveux vivants n'a apporté qu'une inspiration et une impulsion initiales aux

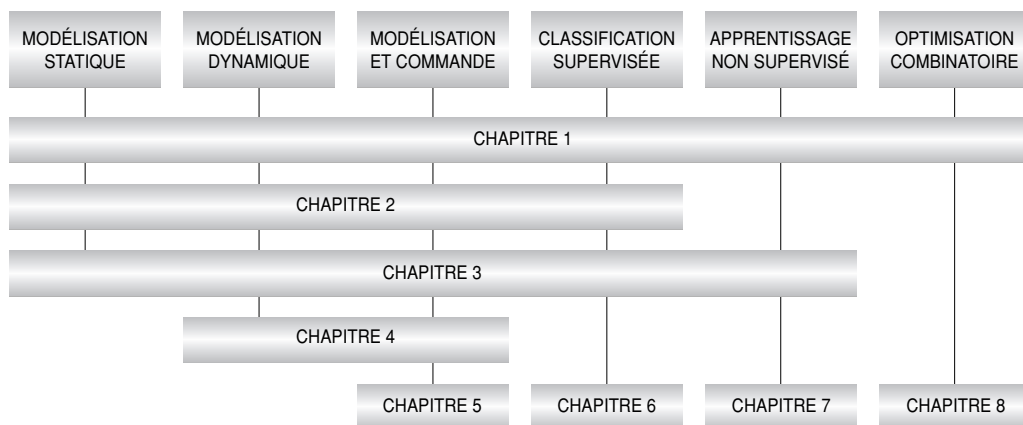
réseaux de neurones formels, comment s'expliquent donc l'utilisation croissante de ces derniers, et les succès qu'ils remportent ? Le présent ouvrage montrera aux étudiants, ingénieurs et chercheurs, que c'est précisément en s'éloignant du paradigme « neuromimétique », et en considérant les réseaux de neurones comme des objets mathématiques qui doivent être étudiés avec les outils conceptuels des sciences dites « dures » (mathématique, statistique, physique), que de grands progrès ont été accomplis, tant pour l'analyse que pour la conception de ces réseaux.

Ainsi, aujourd'hui, ce n'est pas le paradigme neurobiologique qui contribue au développement des réseaux de neurones formels : au contraire, ce sont les réseaux de neurones formels qui contribuent, de plus en plus fréquemment, à la compréhension des systèmes neuronaux vivants, car ils constituent des outils précieux pour en construire des modèles, simples mais utiles. Peut-être cette situation changera-t-elle dans l'avenir : les progrès réalisés dans l'analyse des systèmes vivants pourraient conduire, à leur tour, à la conception de réseaux de neurones formels plus efficaces que ceux que nous décrivons aujourd'hui. Il y a là un champ de recherche fascinant, complètement ouvert.

C'est pour contribuer à une meilleure utilisation des techniques « neuronales » dans leurs domaines d'activité que trois grands organismes français, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), le Centre national d'études spatiales (CNES) et l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), ont organisé, en mars 2001, une « École de printemps » sur les réseaux de neurones et leurs applications à l'aéronautique, au spatial et à l'environnement. Le présent ouvrage, issu des principaux cours délivrés à l'occasion de cet événement, est le reflet de l'expérience acquise par les auteurs dans l'enseignement des réseaux de neurones (troisième cycle des universités, grandes écoles, formation permanente) et dans la recherche, tant fondamentale qu'appliquée.

Guide de lecture

La variété des motivations qui peuvent amener le lecteur à aborder cet ouvrage justifie l'existence d'un guide de lecture. En effet, les applications des réseaux de neurones ne nécessitent pas toutes la mise en œuvre des mêmes techniques mathématiques.



Le premier chapitre, « Les réseaux de neurones, pourquoi et pour quoi faire ? », constitue une présentation générale du sujet, dans laquelle sont fournies les définitions essentielles, et où sont présentées des applications très diverses, représentatives de ce que peuvent faire les réseaux de neurones. Il est donc destiné au lecteur qui n'a pas d'idée précise sur les réseaux de neurones, mais qui cherche à savoir si ces techniques peuvent l'aider à résoudre les problèmes dont il a la charge. Ce chapitre permettra également à ce lecteur de déterminer dans quelle classe se situent ces problèmes : il l'aidera donc à s'orienter dans les chapitres suivants.

Les lecteurs qui s'intéressent à un problème de *modélisation statique* liront ensuite le chapitre 2, « Modélisation à l'aide de réseaux de neurones : principes et méthodologie de conception de modèles », jusqu'à la section « Sélection de modèle » incluse. Ils liront ensuite le chapitre 3, « Compléments de méthodologie pour la modélisation : réduction de dimension et validation de modèle par ré-échantillonnage ».

Les lecteurs qui se posent un problème de *modélisation dynamique* liront le chapitre 2 en entier, le chapitre 3, et le chapitre 4, « Identification "neuronale" de systèmes dynamiques commandés et réseaux bouclés (récurrents) ». S'ils veulent utiliser ce modèle au sein d'un dispositif de *commande de processus*, ils liront ensuite le chapitre 5, « Apprentissage d'une commande en boucle fermée ».

Les lecteurs qui s'intéressent à un problème de *classification supervisée* (ou discrimination) liront la section « Réseaux de neurones à apprentissage supervisé et discrimination » du chapitre 1, puis le chapitre 2 jusqu'à la section « Sélection de modèle » incluse, le chapitre 6, « Discrimination », et à titre de complément, le chapitre 3.

Les lecteurs qui cherchent à résoudre un problème qui relève de l'*apprentissage non supervisé* passeront du chapitre 1 au chapitre 3, puis au chapitre 7, « Cartes auto-organisatrices et classification automatique ».

Enfin, les lecteurs qui se posent un problème d'*optimisation combinatoire* passeront du chapitre 1 au chapitre 8, « Réseaux de neurones sans apprentissage pour l'optimisation ».

Gérard DREYFUS

Professeur à l'ESPCI

Détail des contributions

Chapitres 1 et 2 **Gérard Dreyfus** est professeur à l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI), et directeur du Laboratoire d'Électronique de cet établissement. Il enseigne les méthodes de modélisation par apprentissage à l'ESPCI, ainsi que dans plusieurs DEA et DESS. Depuis 1988, il organise chaque année deux sessions de formation continue pour ingénieurs, consacrées aux réseaux de neurones et à leurs applications industrielles et financières. Depuis 1982, les recherches de son laboratoire sont entièrement consacrées à la modélisation et à l'apprentissage, pour l'ingénierie et la neurobiologie.

ESPCI, Laboratoire d'Électronique, 10 rue Vauquelin, F – 75005 Paris – France

- Chapitre 3 **Jean-Marc Martinez**, ingénieur au Centre d'Études de Saclay, effectue des recherches dans le domaine des méthodes adaptées à la supervision de la simulation. Il enseigne les méthodes d'apprentissage statistique à l'INSTN de Saclay et à Evry en collaboration avec le LSC, unité mixte CEA – Université.
DM2S/SFME Centre d'Études de Saclay, 91191 Gif sur Yvette - France
- Chapitres 4 et 5 **Manuel Samuelides**, professeur à l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (Supaéro), et chef du département de Mathématiques Appliquées de cette école, enseigne les probabilités, l'optimisation et les techniques probabilistes de l'apprentissage et de la reconnaissance des formes. Il effectue des recherches sur les applications des réseaux de neurones au Département de Traitement de l'Information et Modélisation de l'ONERA.
École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, département Mathématiques Appliquées, 10, avenue Édouard Belin, BP 4032, 31055 Toulouse Cedex – France
- Chapitre 6 **Mirta B. Gordon**, physicienne et directrice de recherches au CNRS, est responsable de l'équipe Apprentissage au Laboratoire Leibniz, de l'Institut de mathématiques appliquées de Grenoble (IMAG). Elle effectue des recherches sur la modélisation des systèmes complexes adaptatifs, et sur la théorie et les algorithmes d'apprentissage, et enseigne les modèles de mémoire et d'apprentissage au Master Information Cognition Apprentissages de Grenoble.
Laboratoire Leibniz – IMAG, 46 avenue Félix Viallet, 38000 Grenoble – France
DRFMC/SPSMS/Groupe Théorie, CEA Grenoble, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9 – France
- Chapitre 7 **Fouad Badran**, professeur au CNAM (CEDRIC), y enseigne les réseaux de neurones.
Awa Niang est maître-assistant à l'École Supérieure Polytechnique. Université Cheikh Anta DIOP de Dakar. Elle effectue sa recherche en collaboration avec le LODYC (Laboratoire d'Océanographie DYnamique et de Climatologie) de l'Université de Paris 6. Ses travaux de recherche portent sur l'interprétation des données géophysique à l'aide de la modélisation neuronale.
Sylvie Thiria est professeur à l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, chercheur au LODYC (Laboratoire d'Océanographie DYnamique et de Climatologie). Elle effectue des recherches sur la modélisation neuronale et sur son application à des domaines comme la géophysique.
Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie (LODYC), case 100, Université Paris 6, 4 place Jussieu 75252 Paris cedex 05 – France
- Chapitre 8 **Laurent Hérault** est chef de projet au CEA – LETI, où il coordonne des recherches sur les réseaux de neurones et l'optimisation combinatoire appliqués à des problèmes industriels. Expert senior auprès du CEA depuis 1998, ses travaux se focalisent aujourd'hui sur le traitement du signal pour les télécommunications sans fils.
CEA-LETI, DSIS/SIT, CEA Grenoble, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9 – France