

MESURES, n° 699, novembre 1997

LES RÉSEAUX DE NEURONES, UNE TECHNIQUE OPÉRATIONNELLE POUR LE TRAITEMENT DES DONNÉES INDUSTRIELLES, ÉCONOMIQUES ET FINANCIÈRES

G. DREYFUS

École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI)
Laboratoire d'Électronique

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 rassurante : les réseaux de neurones sont maintenant une technique de traitement de données bien comprise et maîtrisée, qui fera bientôt partie de la boîte à outils de tout ingénieur préoccupé de tirer le maximum d'informations pertinentes des données qu'il possède : faire des prévisions, élaborer des modèles, reconnaître des formes ou des signaux, etc. Si cette vérité est largement admise aux États-Unis, au Japon et en Grande-Bretagne, elle semble plus difficile à faire reconnaître en France, en dépit de la disponibilité commerciale d'outils logiciels 100 % français d'excellente qualité ; pourtant, de nombreuses applications sont opérationnelles dans notre pays, et un effort de formation considérable est fait depuis plusieurs années¹.

QU'EST-CE DONC QU'UN RÉSEAU DE NEURONES ?

C'est une fonction mathématique, comprenant, comme toute fonction, des variables et un résultat ; elle comprend de plus des paramètres ajustables appelés poids. Le calcul du résultat est effectué par n'importe quel ordinateur ; celui-ci peut être muni d'un logiciel spécifique de traitement de données par réseaux de neurones, ou bien l'utilisateur peut écrire lui-même un court programme dans le langage de son choix. Un réseau de neurones n'est que très exceptionnellement un objet matériel (circuit électronique spécialisé) ; cela peut être le cas pour des applications ayant de très fortes contraintes de vitesse de traitement ou de miniaturisation.

QUE PEUT-ON FAIRE EXACTEMENT AVEC UN RÉSEAU DE NEURONES ?

Étant donné un ensemble de données (par exemple des mesures, ou des résultats de calcul, ou des indices économiques ou financiers, etc.), on peut ajuster un réseau de neurones à ces données en calculant convenablement les paramètres du réseau. La technique des réseaux de neurones est donc, dans son principe, une méthode de régression, analogues aux méthodes de régression linéaire ou polynomiale disponibles dans n'importe quel tableur.

Une fois que l'ajustement des paramètres a été effectué, le réseau de neurones peut interpoler entre les données ; il peut ainsi prévoir le résultat de mesures qui n'ont pas encore été faites, expliquer des résultats obtenus dans le passé, etc. De façon générale, un réseau de neurones convenablement ajusté constitue un *modèle statistique non linéaire* des données. Bien entendu, un réseau de neurones ne fait pas de miracles : puisqu'il résulte d'un calcul statistique, le modèle qu'il constitue n'a de validité que dans le domaine où on l'a ajusté. Un réseau de neurones peut très bien *interpoler*, mais il ne peut pas *extrapoler* valablement. Ainsi, il peut prévoir des événements futurs à condition que les facteurs qui influençaient les événements passés (à partir desquels on a calculé les poids du réseau) restent les mêmes ; si un nouveau facteur, inconnu dans le passé, fait son apparition, le réseau de neurones créé à partir des données anciennes n'est plus valable (mais on peut le réajuster).

Dans le jargon des réseaux de neurones, l'ajustement des paramètres s'appelle *apprentissage*. On dit parfois que les réseaux de neurones sont des logiciels qui *apprennent par l'exemple* ; ce n'est pas inexact, mais il faut se rappeler que la méthode des moindres carrés, connue depuis le 18^{ème} siècle, repose exactement sur le même principe...

QUEL EST L'AVANTAGE DES RÉSEAUX DE NEURONES PAR RAPPORT AUX AUTRES TECHNIQUES DE TRAITEMENT DES DONNÉES ?

Les réseaux de neurones sont *parcimonieux* : pour obtenir un modèle *non linéaire* de précision donnée, un réseau de neurones a besoin de moins de paramètres ajustables que les méthodes de régression classiques. Or le nombre de données nécessaires pour ajuster le modèle de manière statistiquement significative est directement lié au nombre de ses paramètres. Par conséquent, un réseau de neurones nécessite moins de données qu'une régression polynomiale (par exemple) pour élaborer un modèle non linéaire de précision équivalente ; ou encore, un réseau de neurones permet de créer, à partir d'un même ensemble de données, un modèle non linéaire plus précis.

Ainsi, de manière générale, un réseau de neurones permet de tirer un meilleur parti des données dont on dispose, lorsque l'on a besoin d'un modèle non linéaire. En revanche, si un modèle *linéaire* suffit à modéliser les données, les réseaux de neurones n'ont aucun intérêt, et il vaut beaucoup mieux utiliser les techniques de régression linéaire classiques.

¹ Depuis environ dix ans, le Laboratoire d'Électronique de l'ESPCI organise chaque année deux sessions de formation permanente pour ingénieurs, comprenant des cours, des travaux pratiques et des études de cas. Les sessions sont annoncées sur le site <http://www.neurones.espci.fr>.

La parcimonie des réseaux de neurones résulte du fait que le nombre de poids ajustables varie proportionnellement au nombre de variables du processus à modéliser, alors qu'il varie *exponentiellement* avec ce nombre pour les méthodes de régression non linéaire multiple. Par conséquent, pour les processus ayant un très petit nombre de variables (une ou deux), les réseaux de neurones ne présentent pas d'avantage décisif par rapport aux autres méthodes.

IL PARAÎT QUE L'APPRENTISSAGE DES RÉSEAUX DE NEURONES EST TRÈS LENT ET DEMANDE DES MACHINES PUISSANTES

C'était vrai il y a dix ans, mais cette réputation colle aux réseaux de neurones bien qu'elle ne soit plus du tout justifiée, probablement parce que la plupart des outils logiciels commerciaux utilise des algorithmes d'apprentissage très inefficaces. Il existe des algorithmes très rapides qui permettent de réaliser de vrais développements industriels sur des PC ; seuls quelques logiciels "neuronaux" commerciaux en disposent. Il est donc tout à fait inutile de disposer de stations de travail puissantes, et encore moins de processeurs spécialisés, pour mettre en œuvre des applications industrielles, économiques ou financières des réseaux de neurones.

QUELS SONT LES DOMAINES D'APPLICATION DES RÉSEAUX DE NEURONES ?

La modélisation non-linéaire de données statiques

Les réseaux de neurones sont très avantageux chaque fois que l'on veut modéliser des données indépendantes du temps, qui dépendent de plus de deux facteurs. Ainsi, on utilise les réseaux de neurones pour prédire les propriétés de molécules à partir de descripteurs que l'on peut calculer sans synthétiser ces molécules (leur masse, leur volume, leur nombre d'atomes, les charges électriques portées par ceux-ci) ; ainsi, si le réseau de neurones prédit qu'une molécule n'a pas les propriétés (pharmacologiques par exemple) que l'on cherche à obtenir, on peut économiser une synthèse chimique coûteuse. De même, on peut prédire les propriétés mécaniques de caoutchoucs pour pneumatiques à partir de la composition des mélanges utilisés (collaboration Michelin - ESPCI).

La modélisation non-linéaire de processus dynamiques

Pour modéliser des processus dynamiques, on utilise des réseaux de neurones "bouclés" (appelés "récurrents" en français). A partir de chroniques de mesures effectuées sur le processus, il est possible de réaliser des modèles très précis qui permettent, par exemple, de prévoir l'évolution future du processus ; on peut ainsi réaliser des simulateurs utilisables pour l'aide à la conception, ou pour la formation de personnel d'exploitation du procédé, ou encore pour réaliser des boucles de commande.

La détection d'anomalies

Comme les réseaux de neurones peuvent réaliser des modèles non linéaires, très rapides et précis, du comportement normal de processus, on peut les utiliser pour détecter des anomalies de fonctionnement : il suffit en effet d'utiliser le modèle neuronal pour prédire ce que sera l'évolution du processus si son mode de fonctionnement est normal, et de comparer les prévisions du modèle avec les mesures effectuées : si les mesures s'écartent des prédictions de manière statistiquement significative, c'est que le processus est dans un mode de fonctionnement anormal. Ainsi, un système de détection précoce d'anomalies de fonctionnement a été réalisé pour Elf-Atochem par la société Netral S.A. (à l'aide de son logiciel de développement NeuroOne). Dans le même esprit, Sollac est en train de développer un système de diagnostic de qualité de soudures par points : à partir des mesures effectuées pendant la durée de la soudure, un réseau de neurones déterminera si la soudure a été normale ou s'il est nécessaire d'effectuer une nouvelle soudure à proximité.

La reconnaissance de formes

Dans le domaine de la reconnaissance de formes, la classification automatique tient un rôle important. Or, en raison de leur propriété d'approximateurs universels, les réseaux de neurones sont susceptibles d'estimer de manière précise la probabilité d'appartenance d'un objet inconnu à une classe parmi plusieurs possibles. Ainsi, des systèmes de lecture des codes postaux, utilisant des réseaux de neurones, sont opérationnels dans les centres français de tri postal. Plus difficile encore, un système de lecture automatique des montants écrits en toutes lettres sur les chèques a été conçu et réalisé par la Société A2iA ; il est en service dans des banques.

L'économie et la finance

Les réseaux de neurones sont de plus en plus fréquemment utilisés pour modéliser des données financières ou économiques. Ainsi, la Caisse des Dépôts et Consignations, en collaboration avec l'ESPCI, a mis en place un système d'aide à la gestion de portefeuille d'actions, qui évalue la valeur d'entreprises, considérées comme des supports d'investissements, en fonction des données du bilan et de compte d'exploitation. Les mêmes partenaires ont réalisé un système d'évaluation de la solvabilité des collectivités locales, en fonction de données démographiques, économiques et fiscales.

On trouve également dans la littérature de nombreuses mentions de systèmes de prévision des cours de bourse ; il est néanmoins difficile d'évaluer le sérieux de ce genre d'annonces, notamment en ce qui concerne la durée de validité du modèle proposé.

Une application originale a été réalisée à l'ESPCI, dans un domaine plus sociologique qu'économique : la prédiction des résultats des élections législatives en fonction des sommes dépensées pendant la campagne électorale.

La commande de processus

Puisque les réseaux de neurones sont capables d'approcher n'importe quelle fonction non linéaire, ils peuvent évidemment être utilisés pour réaliser des lois de commande non linéaires, donc pour commander des processus non linéaires. Il existe plusieurs applications de ce type, dans la sidérurgie par exemple. Une autre application spectaculaire est le pilotage "neuronal" automatique d'un 4x4 Mercedes entièrement autonome, équipé par la SAGEM de capteurs et d'actionneurs : le volant, l'accélérateur et le frein sont commandés par des réseaux de neurones, de manière que le véhicule reste sur une trajectoire donnée, avec un profil de vitesse donné, en tout-terrain, indépendamment des perturbations telles que la pente de la route, les bourrasques de vent, les virages en dévers, des dérapages, etc. Cette application a permis d'effectuer des comparaisons entre les méthodes "neurales" et les méthodes classiques de commande de processus non linéaires ; elle a montré que les réseaux de neurones permettent d'obtenir une grande précision de la commande, avec une mise en œuvre très simple et rapide.

LA MODÉLISATION NEURONALE DE CONNAISSANCES

Contrairement à une idée répandue, les réseaux de neurones ne sont pas nécessairement des "boîtes noires", que l'on construit uniquement à partir des données en oubliant toutes les connaissances physiques, chimiques, économiques, etc. que l'on peut avoir sur le processus. La technique de *modélisation neuronale de connaissances* permet d'utiliser, pour la conception du réseau de neurones, toutes les connaissances disponibles qui sont exprimées par des équations mathématiques. Alors les poids du réseau de neurones ont une signification précise, de sorte qu'il est possible de les interpréter et de les utiliser, par exemple à des fins de diagnostic, ou pour reconstruire l'état d'un processus pour lequel toutes les variables d'état ne sont pas mesurées. Cette méthode de conception s'est avérée particulièrement précieuse dans plusieurs applications mentionnées ci-dessus : la prédiction des propriétés mécaniques des caoutchoucs, la détection d'anomalies de fonctionnement d'une colonne à distiller, et le pilotage de véhicule.

EN CONCLUSION

Les réseaux de neurones sont des techniques puissantes de traitement non linéaire de données, qui ont fait leurs preuves dans de nombreux domaines. Des outils de développement d'application, à caractère industriel, sont disponibles commercialement, et un savoir-faire important existe en France. Il serait dommage que l'industrie française ne bénéficie pas de cette nouvelle avancée technologique.

Contact : G. DREYFUS, ESPCI, Laboratoire d'Électronique, 10 rue Vauquelin, 7505 PARIS. Tél. : 01 40 79 45 41 ; fax : 01 40 79 44 25 ; courrier électronique : Gerard.Dreyfus@espci.fr ; site Web : <http://www.neurones.espci.fr>