

Drs. John SEAL et Thierry HASBROUCQ,
Laboratoire de Neurosciences Cognitives,
C.N.R.S.,

Dr. Akira TERAQ,
Ecole pour les Etudes et la Recherche en
Informatique et Electronique,
Laboratoire d'Etudes et de Recherche en
Informatique,
Parc Georges Besse, 30000 Nîmes.

31, chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille.

Etude pluridisciplinaire du mouvement volontaire

Tout animal se déplaçant dans un environnement est soumis à des stimulations qui appellent des actes comportementaux. Chez les espèces supérieures, la faculté d'établir des liaisons sensori-motrices nouvelles libère l'animal des stéréotypies comportementales de type réflexe où le stimulus appelle nécessairement une réponse. La plasticité sensori-motrice dont font preuve les systèmes biologiques de traitement de l'information constitue la base de tout apprentissage. A ce titre, elle relève d'un mécanisme cérébral élémentaire que nous souhaitons précisément élucider.

La question de savoir si tout le comportement des espèces supérieures, y compris l'homme, peut être ainsi décrit en termes de liaisons adaptatives entre stimuli et actions est en lui même le sujet d'un grand débat. Il faut cependant remarquer que du point de vue expérimental, il est difficile, sinon impossible, de séparer ces deux aspects: la perception d'un stimulus ne peut être vérifiée qu'au travers d'actions qui en dépendent (reconnaissance ou confirmation), tandis qu'une action volontaire ne peut être dissociée de l'ensemble des stimuli qui l'ont précédée, éventuellement en des temps très éloignés.

Aspects psychologiques

Pour le psychologue cognitiviste, l'étude des processus mentaux repose sur l'analyse des *représentations* et de leurs *transformations*, considérées comme des concepts fondamentaux, communs à l'ensemble de ces processus et nécessaires à leur élaboration. On peut définir les représentations comme des codes d'information passifs et les transformations comme des opérateurs actifs qui modifient ou engendrent des représentations.

Le paradigme du temps de réaction (TR), qui repose sur les inférences que permet l'analyse des variations systématiques du temps nécessaire à déclencher une activité motrice en réponse à une stimulation sensorielle, constitue le moyen d'accès traditionnel à la dynamique des transformations. On admet que le TR reflète au plan comportemental la durée des processus de traitement de l'information qui correspondent à ces transformations. L'analyse et la formalisation des processus mis en oeuvre au cours du TR repose sur le postulat selon lequel l'activité mentale est réductible à une série d'étapes ou niveaux de traitement qui correspondent à autant de transformations.

Si ce postulat fait l'unanimité, la nature de la transmission de l'information entre les différents niveaux est l'objet d'un débat dont l'issue semble devoir déterminer l'avenir du paradigme du TR. Selon une première hypothèse, cette transmission s'effectue de façon discrète. En d'autres termes, seul le produit final de la transformation réalisée au cours du niveau de rang N-1 serait transmis au niveau de rang N. Ainsi, il n'y aurait aucun recouvrement temporel entre les transformations réalisées au cours des différents niveaux de traitement de l'information. Selon une seconde hypothèse, la transmission de l'information s'opère de façon continue. En d'autres termes, tous les produits intermédiaires de la transformation réalisée au cours du niveau de rang N-1 seraient transmis au niveau de rang N. Ainsi, la transformation réalisée au niveau de rang N commencerait à s'opérer sur la base d'informations partielles transmises par le niveau N-1 sans pour autant que les transformations réalisées au cours des niveaux de rang inférieur soient encore terminées. Ces deux hypothèses ne sont pas symétriques du point de vue des inférences qu'elles permettent de réaliser. En effet, les modèles "discrets" ont une valeur heuristique que ne partagent pas les modèles "continus".

En dépit de leur sophistication croissante, les techniques comportementales ne permettent pas de tester ces hypothèses. En effet, la transmission de l'information concerne les relations entre chacun des niveaux individuels de traitement alors que le TR représente le produit global de l'ensemble de la chaîne perceptivo-motrice. En revanche, les techniques d'enregistrement et d'analyse de l'activité neuronale unitaire permettent d'aborder directement le problème de la communication entre les différents niveaux de traitement. La mise en oeuvre de cette méthodologie dans le cadre de protocoles de TR requiert une étroite collaboration entre psychologues, neurophysiologistes et ingénieurs.

Aspects neurophysiologiques

L'étude anatomique du système nerveux a montré que le cortex cérébral est constitué d'un réseau de structures distinctes auxquelles la neuropsychologie a conduit à attribuer des fonctions particulières. Cette répartition peut être mise en parallèle avec celle du traitement de l'information sensori-motrice en étapes fonctionnelles, telle que suggérée par les études comportementales décrites ci-dessus. On peut ainsi faire l'hypothèse d'une correspondance entre les

différentes structures du cortex cérébral et les étapes de traitement que la psychologie cognitive a permis d'isoler. Cette hypothèse simple est à l'origine de nos études. Nous nous proposons d'étudier les mécanismes neuronaux par lesquels les structures corticales traduisent en activité motrice volontaire les signaux sensoriels biologiquement pertinents qu'elles reçoivent de l'environnement. Les tâches sensori-motrices les plus simples peuvent être décomposées en trois étapes sérielles au moins: la perception du stimulus, la traduction stimulus-réponse et l'élaboration de la réponse. Si les étapes les plus périphériques semblent être mises en oeuvre au niveau des aires corticales dites "primaires" dont les fonctions sensorielles et motrices sont bien décrites, les mécanismes neuronaux qui sous-tendent l'étape centrale de traduction stimulus-réponse restent encore incompris. C'est pourquoi nous concentrons nos efforts sur ces mécanismes particuliers.

Nous pouvons envisager que, dans son passage à travers les différents réseaux de neurones reliant les récepteurs sensoriels aux muscles, l'information sensorielle initiale codée dans les trains de modification de l'activité neuronale est transformée en l'activité motrice nécessaire au mouvement. Beaucoup de ce qui est actuellement connu à propos des mécanismes neuronaux supportant les flux d'information à l'intérieur du système nerveux central provient d'expériences basées sur l'enregistrement de l'activité neuronale unitaire chez des animaux éveillés. L'activité neuronale a été enregistrée dans différentes structures du cerveau pendant l'exécution de tâches apprises et les caractéristiques des différentes populations neuronales ont été décrites à l'aide de nouvelles méthodes d'analyse de données. Grâce aux résultats obtenus, il a été possible de décrire non seulement des neurones avec des propriétés sensorielles ou motrices, mais aussi des populations de neurones présentes dans plusieurs aires associatives, et qui montrent des propriétés à la fois sensorielles et motrices. Nous proposons que ces neurones interviennent dans le processus de transformation du sensoriel au moteur.

Aspects théoriques

En quoi un ingénieur en modélisation de réseaux de neurones réels et en développement de réseaux de neurones artificiels peut-il aider à la compréhension d'un phénomène psychophysique tel que le mouvement volontaire ? Pour un ingénieur, la modélisation est une étape obligée de la compréhension d'un phénomène. Un modèle est avant tout une image concrète de l'idée que l'on se fait du déroulement d'un phénomène observé. La validité d'un modèle est évaluée par son pouvoir prédictif, c'est-à-dire par la quantité d'information qu'il permet de générer en accord avec les observations (passées ou futures). L'un des problèmes les plus fondamentaux de la modélisation des flux d'information en neurophysiologie est la nature statistique des observations expérimentales. En effet, l'activité neuronale semble comporter une composante aléatoire, de telle sorte que les données brutes doivent être traitées avec des moyens statistiques pour fournir des grandeurs stables et comparables d'une expérience à l'autre. Or des résultats statistiques contiennent moins d'informations que des résultats bruts et se prêtent donc moins à des raisonnements inductifs, en même temps que la vérification du pouvoir prédictif des modèles élaborés est moins rigoureuse.

A cela s'ajoute le dialogue difficile entre chercheurs de compétences différentes, ce qui explique que la compréhension des phénomènes neurophysiologiques est souvent biaisée chez les ingénieurs. Le décalage s'accroît encore lorsque ces ingénieurs se mettent en tête d'implémenter des systèmes artificiels à partir des modèles neurobiologiques. Ces systèmes n'ont en réalité pas de compte à rendre aux systèmes réels dont ils s'inspirent, puisque leur but est utilitaire et non scientifique. Mais cela heurte souvent les biologistes qui les considèrent comme des caricatures, ou même des erreurs. Ces extensions sont pourtant intéressantes à plus d'un titre. Elles ont en tout cas le mérite d'interpeller les biologistes et les interroger sur ce qui fait réellement la différence entre les réseaux réels et artificiels, les forcer à être plus précis sur les principes sur lesquels repose leur savoir. Parfois, elles peuvent aussi dévoiler de nouvelles façons de voir les choses, ou de nouvelles interprétations possibles. Les essais d'implémentation de réseaux de neurones artificiels (RNA) ont ainsi tout de suite fait apparaître l'importance de la phase d'apprentissage, alors que cet aspect n'était souvent même pas envisagé par les neurobiologistes. Apparaît également le problème du niveau auquel doivent être interprétés les signaux neuronaux enregistrés, celui d'un éventuel codage qui permettrait de comprendre les informations transmises. En ce domaine, il commence à être admis qu'il faut considérer des populations de neurones plutôt que des neurones individuels. Mais il n'apparaît pas encore clairement comment il faut appréhender ces comportements de populations.

Pour l'instant, les RNA restent à un niveau assez réductionniste, où le comportement global peut se comprendre directement soit par une amplification du comportement individuel, soit par un moyennage. Par contre, on arrive difficilement à imaginer des modèles où il se produirait une véritable "émergence" de propriétés nouvelles, à un niveau supérieur à celui des individus, et qui se décrirait en des termes totalement distincts. Un exemple d'un tel système est celui des gaz, formés d'un grand nombre de molécules caractérisées par des grandeurs telles que la vitesse et la masse, mais qui peuvent se décrire à un niveau macroscopique en termes de pression, de volume et de température. Cela pose d'une part le problème de savoir s'il y a effectivement un tel effet d'émergence de nouvelles propriétés dans les systèmes neuronaux biologiques, et d'autre part si, dans ce cas, la pensée elle-même peut comprendre ce phénomène d'émergence par lequel elle existerait. Le développement de moyens informatiques de plus en plus puissants permettent aujourd'hui de réaliser la simulation du comportement de grandes populations d'individus (particules, individus d'une société, neurones,...), mais la compréhension et donc la modélisation suppose une intégration au sein de la pensée humaine, non d'une machine. La pensée humaine peut-elle s'intégrer elle-même ?