

Des réseaux de neurones auto-organisés

Des robots commandés par un nouveau type de réseau de neurones s'adaptent à des situations nouvelles, sans oublier ce qu'ils ont déjà «appris».

Les réseaux de neurones artificiels sont de plus en plus utilisés pour contrôler l'activité de robots que l'on nomme animats. Au cours de l'évolution d'un animat dans son environnement, son réseau de neurones change de configuration en fonction des stimulus qu'il reçoit, mais aussi de ses configurations antérieures. Ainsi, le réseau de neurones contient, à chaque instant, des informations sur les objets qui entourent l'animat et sur les conséquences de ses actions passées. Contrairement aux systèmes plus rigides dont le comportement est déterminé par des décisions définies à l'avance, l'animat est doué d'une certaine autonomie et d'une capacité d'apprentissage. Toutefois, les réseaux de neurones artificiels ont un grave défaut : ils ont tendance à apprendre de façon globale (ils codent toutes les informations avec le même niveau de priorité) et une modification notable de l'environnement peut les conduire à remettre en cause l'ensemble des comportements appris indépendamment du contexte : c'est l'«oubli catastrophique». Nous avons proposé et testé, au cours de simulations informatiques, un nouveau modèle de réseau capable de s'en affranchir.

Le plus souvent, pour éviter l'oubli catastrophique, on hiérarchise à l'avance les informations traitées par l'animat. Le

réseau de neurones est ainsi divisé en modules spécialisés, par exemple, dans les tâches de reconnaissance de l'environnement ou encore de gestion des mouvements. Toutefois, cette méthode est peu satisfaisante, parce que cette modularisation reflète davantage les *a priori* du chercheur qu'une division des tâches fondée sur la façon dont le robot extrait des informations pertinentes de son environnement.

Pour créer un nouveau modèle, nous nous sommes inspirés de la neurobiologie. En effet, selon les neurobiologistes, l'information traitée par un réseau de neurones – le cerveau – est codée non seulement dans les motifs formés par les groupes de cellules qui sont actives à chaque instant, mais aussi dans l'évolution au cours du temps de ces motifs. Cette dépendance temporelle provient, semble-t-il, du fait qu'un neurone n'est activé qu'après une phase pendant laquelle il ne fait qu'accumuler les impulsions émises par les neurones auxquels il est connecté. En conséquence, il change d'état d'autant plus vite qu'il a été fortement stimulé. Nos neurones artificiels simulent ce comportement de façon simple : à chaque séquence, le programme ne réévalue que l'état des neurones les plus stimulés à la séquence précédente. Nous avons appelé ce mode d'activation, le mode ordonnancé.

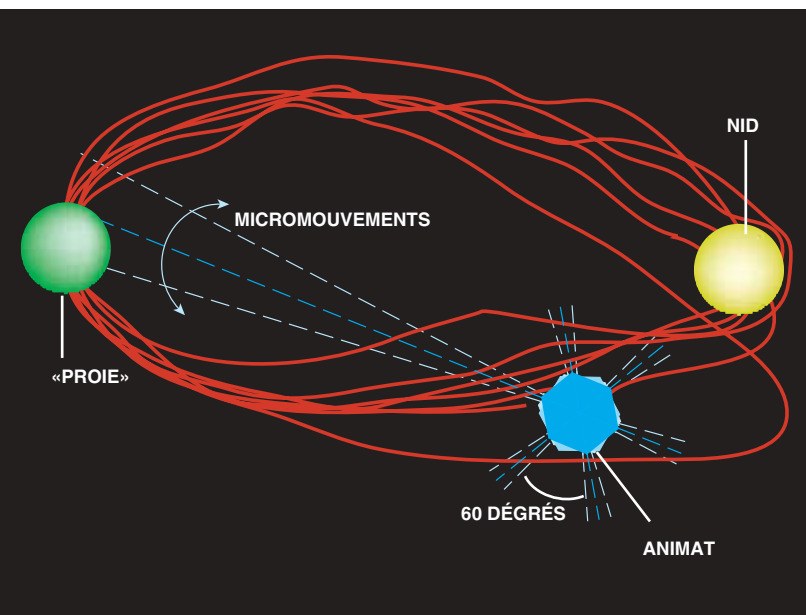
Notre animat évolue dans une pièce à deux dimensions contenant une «proie» qui se déplace aléatoirement et qu'il doit capturer et ramener à un «nid» fixe. Nous avons délibérément limité ses capacités sensorielles et motrices : il ne dispose d'aucune information sur sa propre position dans la pièce, ni sur celle du nid, ni sur la distance qui le sépare de sa cible. Ses six «yeux» lui indiquent simplement le secteur (de 60 degrés) où se trouve la cible et il ne perçoit les murs qu'à très faible distance. Par ailleurs, lors de sa «venue au monde», le réseau neuronal de l'animat est «brut» (nous n'avons introduit aucun module préalable) et toutes les cellules sont connectées entre elles. Au cours de l'évolution de l'animat, ces connexions sont renforcées ou affaiblies par un algorithme d'apprentissage qui favorise celles qui accompagnent les comportements à succès.

À cause du mode d'activation ordonnancé, tout se passe comme si l'influx nerveux se propageait à une vitesse finie dans le réseau. Ainsi, le nombre de neurones activés dans un comportement donné est limité par la vitesse à laquelle l'environnement évolue autour de l'animat. L'algorithme d'apprentissage ayant tendance à fixer les motifs de neurones qui provoquent les «bons» comportements, des populations de neurones différenciées émergent et l'animat les utilise pour réaliser des comportements différents : tout se passe comme si une structure en modules apparaissait spontanément dans le réseau.

Cette modularité n'est pas contenue à l'avance dans la structure du réseau. Si elle est difficile à observer directement, elle est mise en évidence par le fait, vérifié lors des simulations, que le phénomène d'oubli catastrophique disparaît. En outre, on observe d'intéressantes conséquences dans le comportement de l'animat. Il développe, notamment, des stratégies de repérage et d'approche de la cible fondées sur des micro-mouvements (de petites fluctuations du mouvement autour d'une trajectoire moyenne). Ces stratégies sont intéressantes parce qu'elles rappellent celles que l'on observe chez un grand nombre d'animaux et parce qu'elles émergent spontanément (nous n'avons en rien favorisé leur apparition).

Ce modèle offre un nouveau champ de recherche. Il devra être testé pour des tâches et des environnements dynamiques plus complexes. Ainsi, l'animat devra bientôt affronter le monde réel...

Guillaume BELSON et Hédi SOULA,
Institut national des sciences appliquées de Lyon



Le robot (en bleu) commandé par un réseau de neurones ne perçoit de ses cibles, la «proie» (en vert) ou le «nid» (en jaune) que leur présence ou non dans des secteurs de 60 degrés. Grâce au nouveau réseau de neurones, il adopte spontanément une stratégie «astucieuse» : à l'aide de petites fluctuations de sa trajectoire, il maintient sa cible entre deux capteurs ce qui améliore sa précision. Ces «micro-mouvements» rappellent, par exemple, ceux qui animent les yeux des mouches. Dans le cas où la cible est immobile, cette stratégie qui vise à maintenir une orientation moyenne constante entre le robot et la cible explique l'allure quasi elliptique de la trajectoire qu'il apprend, de lui-même, à parcourir.

Bouillants noyaux

Lorsque qu'un noyau atomique se «vaporise», sa température baisse brièvement.

Avez-vous déjà renversé de l'eau sur une plaque chauffante à 300 °C? Loin de disparaître, les perles liquides qui se forment sont projetées de droite et de gauche, parce que leur base se vaporise instantanément au contact de la plaque. Selon les lois classiques de la thermodynamique, sa température se maintient à 100 °C tant qu'une goutte «survit». Philippe Chomaz du GANIL, et Francesca Gulminelli, à l'Université de Caen, ont émis l'hypothèse que la température d'une goutte assez petite baisse brièvement pendant son ébullition ! Ils ont eu cette intuition après qu'un autre physicien du GANIL, Bernard Borderie, a observé un phénomène thermodynamique comparable à ce qui arrive à une goutte d'eau sur une plaque chauffante : la «vaporisation nucléaire».

Au GANIL, ces physiciens étudient le comportement thermodynamique d'un système nucléaire dont on augmente l'énergie interne. Pour cela, ils précipitent des noyaux les uns contre les autres, et fabriquent des «systèmes nucléaires chauds», c'est-à-dire des milieux intermédiaires constitués de nucléons (protons ou neutrons). En faisant varier l'énergie du choc, ils en modifient la température. Ils ont ainsi mesuré trois régimes différents de collision : l'évaporation nucléaire, la multifragmentation et la vaporisation nucléaire. L'évaporation se produit à des énergies de collision relativement basses ; les deux noyaux sont peu modifiés, mais laissent échapper des particules légères, telles que des protons (des noyaux d'hydrogène) ou des deutons (un proton et deux neutrons). Quand l'énergie du choc augmente (dès 2×10^{13} joules par nucléon), le milieu nucléaire intermédiaire émet de nombreuses particules et des fragments lourds (plus lourds que des noyaux d'hélium) : c'est la multifragmentation. La vaporisation a lieu lorsque l'énergie de collision dépasse 5×10^{15} joules par nucléon ; le

milieu nucléaire intermédiaire est alors comparable à un gaz de particules constitutives des noyaux, contenu dans un volume triple de celui des noyaux avant la collision. Alors que les deux premiers régimes étaient connus depuis plusieurs années, la vaporisation a été découverte récemment au GANIL.

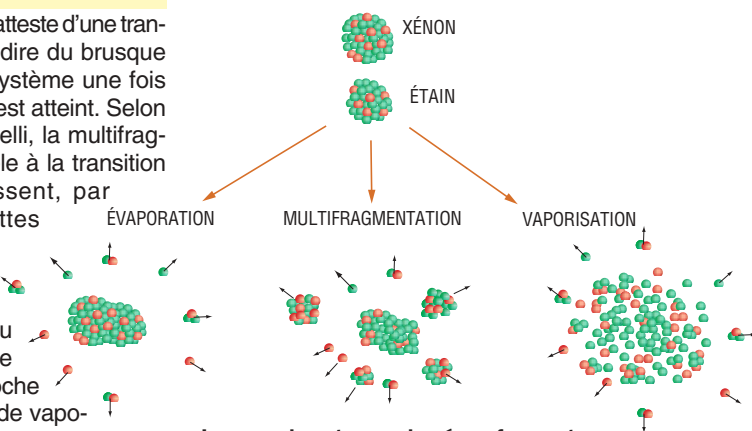
B. Borderie et ses collègues ont notamment envoyé un faisceau de noyaux de xénon (54 protons et 77 neutrons) sur une cible d'étain (50 protons et 69 neutrons). Dans le cas d'une collision frontale, ces deux noyaux fusionnent en un seul système nucléaire chaud, dont l'énergie dépend des conditions du choc. Après de multiples collisions, l'équipe a déterminé la capacité calorifique du milieu nucléaire intermédiaire en fonction de son énergie interne. La capacité calorifique d'un système est l'énergie qu'il faut lui fournir pour augmenter sa température de un kelvin. Cette grandeur est en général positive. Toutefois, dans le cas du milieu nucléaire intermédiaire, on constate que lorsque l'énergie interne atteint 4×10^{13} joules – soit l'équivalent d'une température de 70 milliards de degrés ! – la capacité calorifique devient brièvement négative. L'énergie interne du milieu nucléaire intermédiaire décroît durant un court instant avant de recommencer à augmenter. Sur la courbe tracée par les physiciens, le phénomène se traduit par une «divergence».

Un tel comportement atteste d'une transition de phase, c'est-à-dire du brusque changement d'état du système une fois qu'un seuil énergétique est atteint. Selon P. Chomaz et F. Gulminelli, la multifragmentation est comparable à la transition liquide-gaz que subissent, par exemple, des gouttelettes d'eau déposées sur une plaque chauffante. Tandis que dans la phase d'évaporation, le milieu nucléaire est comparable à un liquide, il se rapproche d'un gaz dans la phase de vaporisation. Toutefois, à la température critique, un «liquide nucléaire» a une capacité calorifique négative ; il se refroidit brièvement pendant la multifragmentation.

Comment s'explique cette particularité ? Pour produire et lancer les fragments

qui constituent le milieu vaporisé, le système consomme de l'énergie. Quand le nombre de particules qui le constituent est grand, le refroidissement associé à cette dépense énergétique n'a guère d'influence sur le comportement du système global. En revanche, un système constitué d'un petit nombre de particules (c'est le cas d'un milieu nucléaire) devient sensible au coût énergétique de la vaporisation.

Jusqu'à présent, on n'avait encore jamais décrit de système qui se refroidit pendant une transition de phase ! Toutefois, les lois de la thermodynamique ont été élaborées pour les systèmes macroscopiques. P. Chomaz et F. Gulminelli pensent que les propriétés thermodynamiques des transitions de phase de systèmes à grand nombre de particules ne subsistent pas lorsqu'on étudie les changements d'états de système à petit nombre de particules. Selon eux, les transitions de phase à l'échelle élémentaire seraient toujours accompagnées d'un bref refroidissement du milieu à la température critique. Si tel est le cas, le phénomène devrait se retrouver pour tout corps subissant une transition de phase à cette échelle, notamment pour les microgouttelettes d'eau sur une plaque chauffante. Hellmut Haberland et son équipe de l'Université de Fribourg l'ont également observé lors de la fusion de minuscules morceaux de sodium qui ne comportent que 147 atomes.



Lorsque des atomes de xénon frappent une cible d'étain, il se produit soit une évaporation, où les deux noyaux sont peu modifiés et laissent échapper des protons, notamment ; soit une multifragmentation, où diverses particules et des fragments lourds sont émis ; soit une vaporisation libérant un gaz de particules.

Vous cherchez des services personnalisés d'information scientifique ?

//connectsciences.inist.fr

Le portail CNRS d'information scientifique et technique

Un service de l'Institut de l'Information Scientifique et Technique du CNRS

www.inist.fr