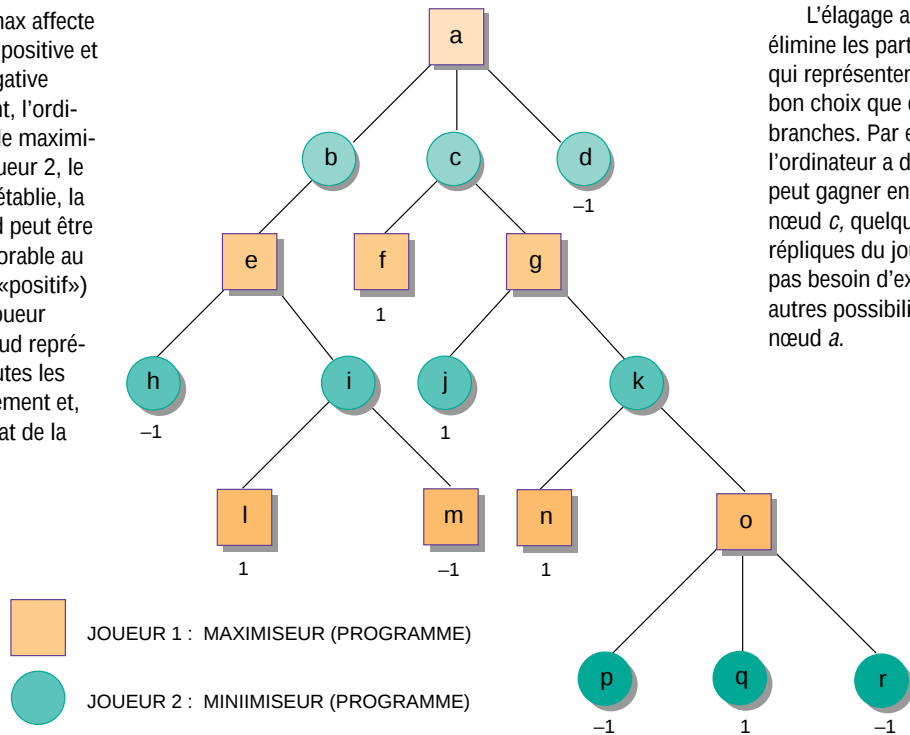


COMMENT «PENSENT» LES PROGRAMMES DE JEUX

L'algorithme minimax affecte à un joueur une valeur positive et à l'autre une valeur négative (dans l'exemple présent, l'ordinateur est le joueur 1, le maximiseur ; et l'homme le joueur 2, le minimiseur). Une fois établie, la valeur de chaque nœud peut être interprétée comme favorable au maximiseur (le joueur «positif») ou au minimiseur (le joueur «négatif»). Chaque nœud représente la position de toutes les pièces après un mouvement et, plus généralement, l'état de la partie.



L'élagage alpha-bêta élimine les parties de l'arbre qui représentent un moins bon choix que d'autres branches. Par exemple, si l'ordinateur a déterminé qu'il peut gagner en jouant le nœud *c*, quelque soient les répliques du joueur 2, il n'a pas besoin d'examiner les autres possibilités issues du nœud *a*.

tout moment de la partie il y a environ 250 coups possibles (contre approximativement 30 seulement aux échecs et à othello). Construire une table des fins de parties au go, comme celle concoctée par *Chinook*, est hors des possibilités de calcul de l'ordinateur.

Et les autres jeux ? Le combat pour le titre de meilleur joueur de backgammon est acharné, et cette quasi-égalité homme-machine persistera probablement, car la relative simplicité du jeu fait que joueurs et machines jouent presque à la perfection. Au scrabble aussi, le combat est douteux, mais ne le restera vraisemblablement pas, car les machines vont améliorer leur stratégie (les machines et les hommes n'ont tous deux aucune difficulté à trouver, à un point donné du jeu, le mot qui rapporte le plus, mais le scrabble à haut niveau impose aussi de bien gérer les lettres restantes et à minimiser les possibilités de l'adversaire). Les hommes ont gagné, en 1997, un match en deux parties, mais ils ont perdu un match en 11 parties en 1998.

La situation au bridge va probablement se resserrer d'ici cinq ans, car les machines sont de plus en plus puissantes et les algorithmes s'améliorent. Les hommes ont gagné de justesse un

match de deux heures en juillet dernier, et aux championnats du monde de bridge 1998, en août à Lille, mon programme de bridge s'est placé douzième parmi les 34 meilleurs joueurs de bridge du monde. Toutefois, il s'agissait de données préparées et uniquement le jeu de la carte (pas les enchères).

Jouer ensemble agréablement

Depuis les débuts de l'intelligence artificielle, les progrès des algorithmes séquentiels amènent succès après succès. Ces succès ne se limitent pas à la programmation des jeux : les algorithmes séquentiels sont les méthodes les plus efficaces pour décider de l'ordre d'assemblage des différentes pièces d'un Boeing 747. Ces algorithmes fournissent des plans de production 10 à 20 pour cent plus rapides que ceux élaborés par les hommes. L'identification des structures et les techniques parallèles ne sont pas très bien adaptées aux problèmes de planification de tâches complexes, car un plan qui a l'air bon peut ne pas l'être.

Dans un futur proche, les hommes seront meilleurs que les machines pour résoudre les problèmes parallèles, et

les machines resteront supérieures pour les traitements par voie séquentielle. Il n'y a là rien de particulièrement surprenant ou d'effrayant ; nous avons conçu des machines (avions et chariots élévateurs) pour accomplir des tâches dont nous sommes incapables, comme voler ou soulever des charges extrêmement lourdes. Aux Jeux olympiques, nous ne nous sentons pas tenus de mettre en compétition les chariots élévateurs et les haltérophiles.

Les machines intelligentes ne sont pas nos concurrentes, mais nos collaboratrices. Les complémentarités de l'homme et de la machine permettent de résoudre des problèmes qu'aucun des deux n'aurait pu résoudre isolément. Et après tout, ce sont les hommes qui programment les machines...

Matthew GINSBERG est chercheur à l'Université de l'Oregon et fondateur du *Computational Intelligence Research Laboratory* (CIRL) de cette université. Ginsberg pense que son programme de bridge, GIB, sera champion du monde d'ici cinq ans.

La mathématique des jeux, Éditions Pour la Science, 1988.

L'intelligence des robots

ARAB ALI CHÉRIF

Pour organiser les tâches d'un groupe de robots mobiles, les roboticiens les dotent d'une organisation sociale sous la forme de règles économiques et constitutionnelles.

Première loi : un robot ne peut porter atteinte à un être humain ni, restant passif, laisser cet être humain exposé au danger.

Deuxième loi : un robot doit obéir aux ordres donnés par les êtres humains, sauf si de tels ordres sont en contradiction avec la première loi.

Troisième loi : un robot doit protéger son existence, dans la mesure où cette protection n'est pas en contradiction avec la première ou avec la deuxième loi.

Les lois de la robotique, Isaac Asimov

Dans les années 1950, l'écrivain de science-fiction Isaac Asimov énonçait les trois lois de la robotique. Dans un monde où cohabitent humains et robots, ces lois devaient éviter les conflits et assurer l'harmonie sociale. Au fil de ses romans, Asimov montrait les paradoxes et les conflits qui émergeaient de la stricte application de ses lois. Ces lois «de bons sens» étaient insuffisantes et nous verrons, à la lueur des recherches actuelles, que des énoncés plus élaborés sont nécessaires.

L'utilisation d'un groupe de robots pour effectuer une tâche renoue avec les origines de l'intelligence artificielle des années 1960 : à l'époque, on cherchait à fabriquer des robots intelligents. Aujourd'hui, les difficultés ne sont pas tant les perfectionnements d'un robot, mais la coordination des efforts de plusieurs. En particulier, le risque de collisions et de conflits, augmente avec le nombre de robots.

Comment amener les robots à coopérer ? Une solution consiste à utiliser un contrôleur extérieur qui dispose d'une vue globale sur le groupe de robots. Cependant, cette solution centralisée est peu fiable et peu efficace, puisqu'elle exclut la parallélisation des tâches, ainsi que l'autonomie de décision. Le robot

envoyé sur Mars lors de la mission *Pathfinder*, en juillet 1997, devait attendre 20 minutes chaque ordre émanant de la Terre. Face à une situation de crise, ce délai peut être fatal : l'autonomie est indispensable. Aussi avons-nous exploré une nouvelle voie : le contrôle distribué, où la coordination se fait localement, et où chaque robot synchronise son action avec les autres robots.

Cette démarche présente plusieurs avantages. Premièrement, les calculs sont autonomes, et la réaction aux événements, tels que l'évitement d'obstacles et la communication entre robots, se fait en temps réel. Deuxièmement, la redondance des unités autonomes augmente la fiabilité du système : la disparition d'un robot est pénalisante, mais pas rédhibitoire. De surcroît, alors qu'un système centralisé doit coordonner tous les robots et leurs capteurs, un robot autonome ne gère que ses propres capteurs et actionneurs, de sorte que la gestion de la commande est allégée. Troisièmement, nous voyons apparaître expérimentalement des comportements nouveaux entre robots, tels des comportements «égoïstes», sans que ces comportements soient explicitement programmés. Enfin, cette structure permet la spécialisation d'un robot, ou d'un groupe de robots, pour une tâche déterminée, comme l'entretien ou la recharge en énergie des autres robots.

Les premiers travaux sur les groupes de robots mettaient en œuvre des robots réactifs, c'est-à-dire des robots qui réagissent à un stimulus externe, comme un obstacle. Nous verrons que les groupes de robots réactifs ne sont pas adaptés à l'accomplissement de tâches complexes, puis, nous examinerons la solution adoptée pour le travail collectif des robots : un groupe de robots auto-

nomes qui interagissent à l'aide de règles microéconomique et dont les conflits sont gérés par une constitution. Dans notre cas, nous avons programmé notre société de robots pour ramasser du minerai, mais d'autres tâches peuvent être assignées, tel le déminage.

Des fourmis aux robots

La plupart des travaux sur la robotique collective sont essentiellement des modélisations et des simulations. Bien avant l'apparition de la discipline de la vie artificielle, des chercheurs étudiaient les capacités collectives de certains insectes, tels les termites, les fourmis ou les guêpes, en vue d'appliquer ces capacités à la robotique ou, plus généralement, à l'informatique.

Les fourmis rousses, par exemple, fabriquent des dômes de brindilles dont le diamètre atteint 20 centimètres. Comment des fourmis sans compétences particulières s'organisent-elles pour fabriquer un dôme dont, individuellement, elles n'ont pas conscience ? En 1972, l'éthologue français Rémy Chauvin et l'économiste Georges Galais-Hamonno ont modélisé cette construction du dôme de brindilles. De ces exemples naturels émergea une idée : un groupe d'individus pouvait être plus efficace qu'un unique individu hyperspécialisé autonome.

En 1986, sous l'impulsion de Rodney Brooks, de l'Institut de technologie

1. LES ROBOTS FOOTBALLEURS illustrent le fonctionnement en groupe des robots. Dans ce jeu d'équipe, la commande des robots est assurée par un ordinateur central qui collecte et analyse les données d'une caméra pour établir la stratégie de jeu. Lorsque l'objectif n'est pas de marquer un but, mais de déminer un terrain, ou de ramasser du minerai, une stratégie coopérative non centralisée est mieux adaptée.



du Massachusetts (MIT), apparut une nouvelle conception de la robotique : alors que les spécialistes de l'intelligence artificielle cherchaient à construire des machines autonomes au comportement élaboré, c'est-à-dire capables d'actions intelligentes résultant d'un raisonnement calqué sur le raisonnement humain, la nouvelle conception hiérarchisait les comportements.

Cette architecture décompose le comportement global d'un robot en un ensemble de tâches élémentaires. La priorité entre les comportements est définie par le concepteur et elle est figée une fois pour toutes. Aussi le choix des priorités adéquates est-il primordial. Les robots fondés sur cette architecture sont nommés réactifs, car leur comportement est dicté par une réaction à un stimulus extérieur. L'un des robots réactifs le plus simple est un robot qui modifie sa route à chaque obstacle détecté.

Cette architecture semble efficace pour les tâches simples, telles que l'exploration d'environnements inconnus, l'évitement d'obstacles, le ramassage des canettes vides de boisson gazeuse. En revanche, pour des tâches complexes où existeraient des priorités de même niveau, elle est difficile à mettre en œuvre, même si des méthodes de gestion de priorités de même niveau ont été mises au point.

En 1988, Marvin Minsky, du MIT, a proposé d'utiliser des groupes d'agents (des logiciels) pour obtenir un comportement global intelligent. Malheureusement, l'application de cette démarche était limitée à un groupe

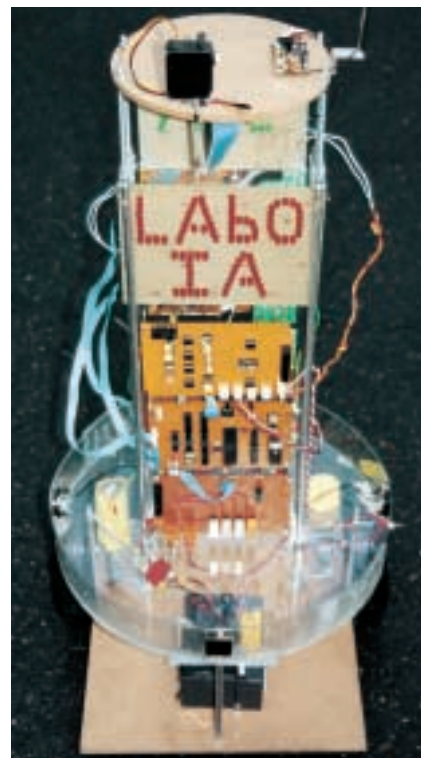
de robots virtuels dotés d'un système de communication : autrement dit, on simulait l'interaction d'un groupe de robots réactifs, mais on ne faisait pas d'expériences en vraie grandeur.

Lorsque l'on fait interagir un groupe de robots réactifs virtuels (en pratique, des programmes), on peut résoudre des problèmes complexes, à condition de faire interagir de très nombreux robots virtuels et de coordonner les réactions simples de ces robots pour atteindre un objectif complexe. Ces problèmes d'échelle et de coordination sont résolus partiellement par la simulation : la puissance de calcul permet de faire interagir de nombreux robots virtuels, tandis que les langages de programmation autorisent la programmation de toutes sortes de comportements.

Ainsi, grâce aux simulations, on explore des situations qui prendraient trop de temps avec des expériences. Cependant, dans la réalité, quel sera le comportement d'un robot réactif en présence de N stimulus conduisant à N réactions possibles, dont certaines peuvent être contradictoires ? Comment se comportera un robot réactif face à un environnement sans stimulus ?

La limite des robots réactifs

Si l'on souhaite qu'un robot ramasse des échantillons de minerai, il faut que le robot ait ce réflexe dès qu'il voit un minerai. Cela suppose donc qu'il distingue un caillou quelconque d'un minerai. Nous avons été confrontés à

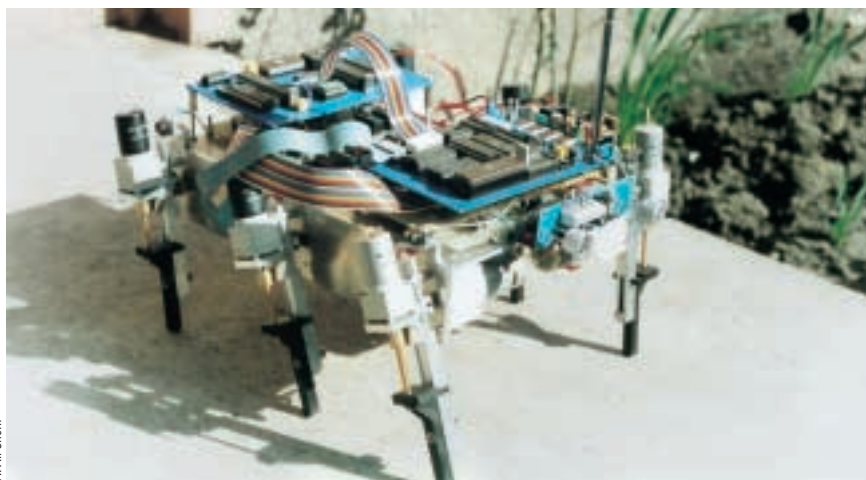


2. LE ROBOT EXPÉRIMENTAL APE est programmé pour aller chercher du café. Mais, il ne distingue pas le café du chocolat : il n'est pas adapté à un environnement varié.

ce type de problèmes avec notre robot APE (voir la figure 2). Ce robot, conçu pour aller chercher du café à la machine à café de l'étage et pour le rapporter au Laboratoire d'intelligence artificielle, ne distingue pas le café du chocolat. Autrement dit, l'environnement doit être parfaitement adapté à cette «action réflexe» ou l'on doit faire en sorte que le mécanisme de reconnaissance du café, sur lequel porte l'action réflexe, soit prévu. Ainsi, la nature d'une action réflexe doit être définie au préalable.

Cet exemple illustre la difficulté de confier une mission explicite à un robot réactif. L'utilisation d'un groupe de robots semble mieux adaptée à la réalisation d'une tâche complexe, mais pose de nouvelles questions. Quels modèles de comportement les robots doivent-ils adopter ? Comment arbitrer et résoudre les conflits engendrés par la coopération et par le partage de ressources (sensorielles, par exemple) entre robots ? Comment chaque robot doit-il travailler pour atteindre l'objectif final assigné au groupe ?

Pour structurer notre groupe de robots, nous l'avons muni d'une orga-



3. LE ROBOT MARCHEUR, utilisé dans les expériences de comportement collectif, est équipé de douze moteurs électriques, d'une architecture parallèle qui comprend quatre processeurs, d'un sonar, d'une radio multi-fréquences et d'une boussole électronique. Selon le type d'application (ramassage de minerai ou déminage), on lui adjoint les instruments nécessaires.