

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

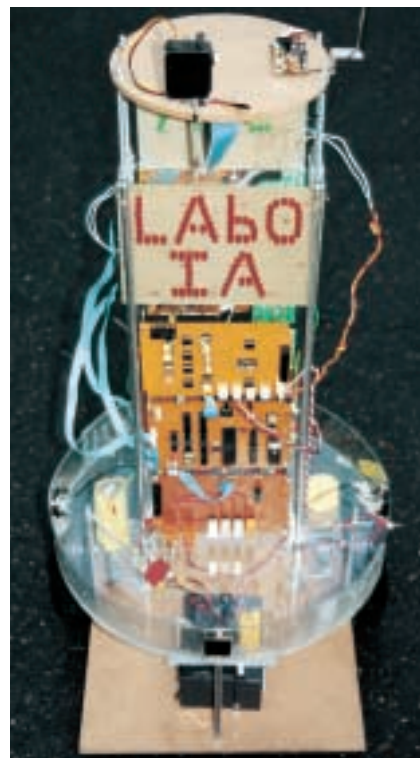
de robots virtuels dotés d'un système de communication : autrement dit, on simulait l'interaction d'un groupe de robots réactifs, mais on ne faisait pas d'expériences en vraie grandeur.

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

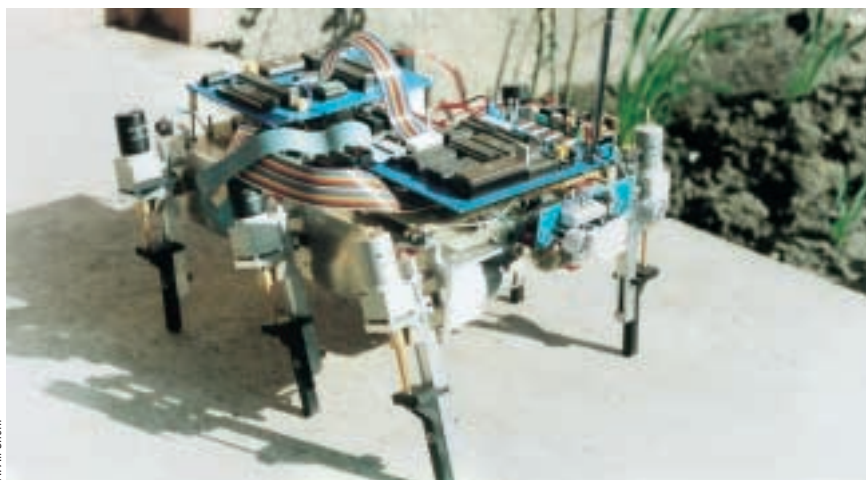


2. LE ROBOT EXPÉRIMENTAL APE est programmé pour aller chercher du café. Mais, il ne distingue pas le café du chocolat : il n'est pas adapté à un environnement varié.

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.

nisation légale formée d'une microéconomie et d'une constitution. À cet effet, nous introduisons la notion d'intérêt matériel pour chaque robot. Trois principaux comportements d'économie de marché structurent le groupe : le partage rémunéré de capacités sensorielles, le partage rémunéré de la mémoire, enfin la négociation pour l'achat et la vente d'informations sur l'environnement. De son côté, la constitution, implémentée dans chaque robot, garantit la stabilité de la structure du groupe, qui peut être perturbée par les conflits issus des négociations.

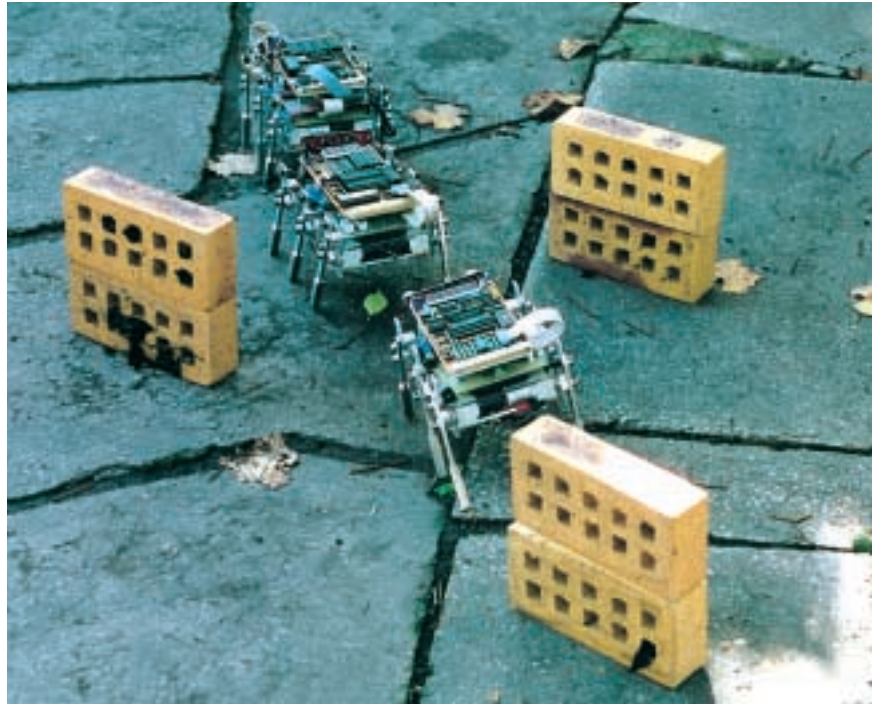
Les intérêts individuels et les intérêts collectifs

Le modèle microéconomique de coopération place chaque robot face aux autres membres du groupe comme producteur de ressource, ou comme consommateur. Lorsqu'un robot veut en recruter un autre pour une tâche donnée, les robots disponibles calculent leur fonction d'utilité : le gain d'énergie proposé par le robot recruteur, moins l'énergie nécessaire au robot pour se rendre sur le site de travail, moins l'énergie nécessaire à la résolution de la tâche (initialement, les robots ont leurs batteries électriques pleines, et ils sont payés en énergie électrique).

Si cette quantité est positive, l'action proposée est rentable. Si la fonction d'utilité est négative, l'action proposée n'est pas rentable, car la dépense d'énergie nécessaire pour satisfaire la demande est supérieure au gain. Si la fonction d'utilité est nulle, le choix d'accepter ou de refuser est aléatoire.

Cette minimisation des coûts de déplacement est également présente dans l'économie des transports urbains. Dans la plupart des grandes villes, les voyageurs ont le choix, pour se rendre à leur travail, entre les transports en commun et le véhicule individuel. Pour choisir entre les possibilités, chaque voyageur prendra en compte le temps de parcours, le temps d'attente et le coût. En attribuant une valeur à chacune de ces caractéristiques, il calculera une fonction d'utilité dont le résultat déterminera son choix. Pour un robot, l'évolution de la fonction d'utilité déterminera ses actions.

Ainsi, dans notre construction, la motivation personnelle de chaque robot est l'intérêt matériel. L'intro-



4. LES TROIS ROBOTS MARCHEURS coopèrent : dans un environnement couvert d'obstacles, le robot de tête met son sonar à la disposition des robots qui le suivent. Ces derniers économisent ainsi leurs ressources en énergie.

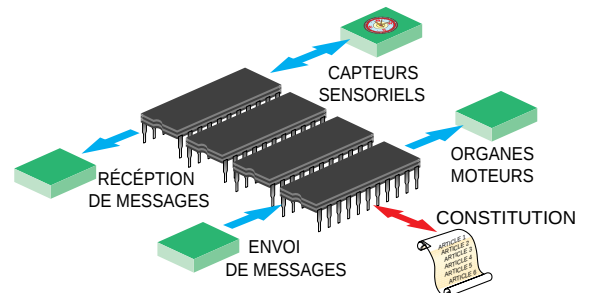
duction d'une économie dans une organisation collective régle la coopération, la division du travail et le partage des ressources entre les robots.

Avec pour motivation personnelle un enrichissement matériel, nous voyons apparaître des structures d'organisation collective : coalitions de robots pour la recherche du minerai, contrats entre robots pour le prêt et la location d'organes sensoriels, des contrats de services de robots pour d'autres robots contre une rémunération fixée après négociation, voire des quiproquos entre robots qui ne se comprennent pas bien.

Certaines situations de coopération rencontrées sont analogues au dilemme du prisonnier. Dans ce dilemme, on interroge deux prisonniers sur la culpabilité de leur complice et l'«autorité» détermine la sévérité de leur peine selon leur réaction. Si tous deux coopèrent (ne dénoncent pas leur complice), l'autorité leur inflige une peine de prison de un an ; lorsque les deux trahissent (en se dénonçant), il se voit infliger chacun une peine de cinq ans ; quand l'un des prisonniers trahit, tandis

que l'autre coopère, le traître est libéré et l'autre est condamné à dix ans de prison. Les prisonniers doivent-ils s'entraider ou non ?

Imaginons la situation où l'un des robots trouve un gisement de minerai tellement important que, ne pouvant l'exploiter seul, il souhaite engager la totalité du groupe. Les robots disponibles calculent leur fonction d'utilité qu'ils transmettent au robot recruteur. Ce dernier calcule alors la fonction d'utilité du groupe qui est la somme des fonctions d'utilité individuelle des robots. Si cette fonction est positive, et si, individuellement, l'un des robots a une fonction d'utilité négative, ce der-



5. LE ROBOT MARCHEUR traite l'information à l'aide de quatre microprocesseurs. Ce sont eux qui font les calculs nécessaires aux négociations microéconomiques. En cas de conflit entre deux robots, la constitution embarquée par chaque robot (des petits programmes et des circuits logiques) est chargée de les départager.