



# 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

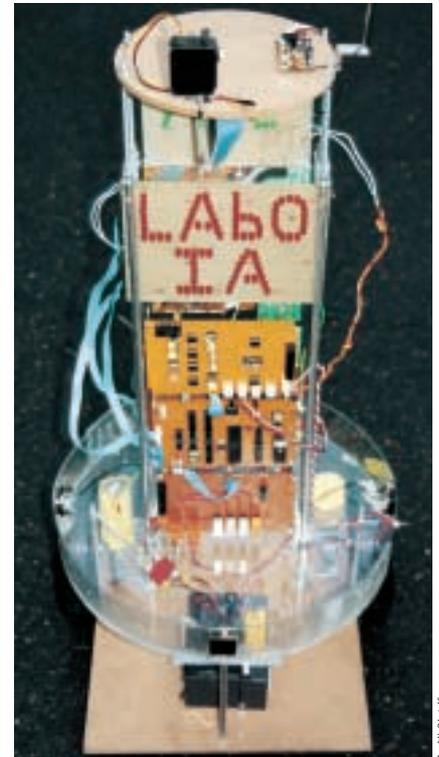
de robots virtuels dotés d'un système de communication : autrement dit, on simulait l'interaction d'un groupe de robots réactifs, mais on ne faisait pas d'expériences en vraie grandeur.

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.

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.

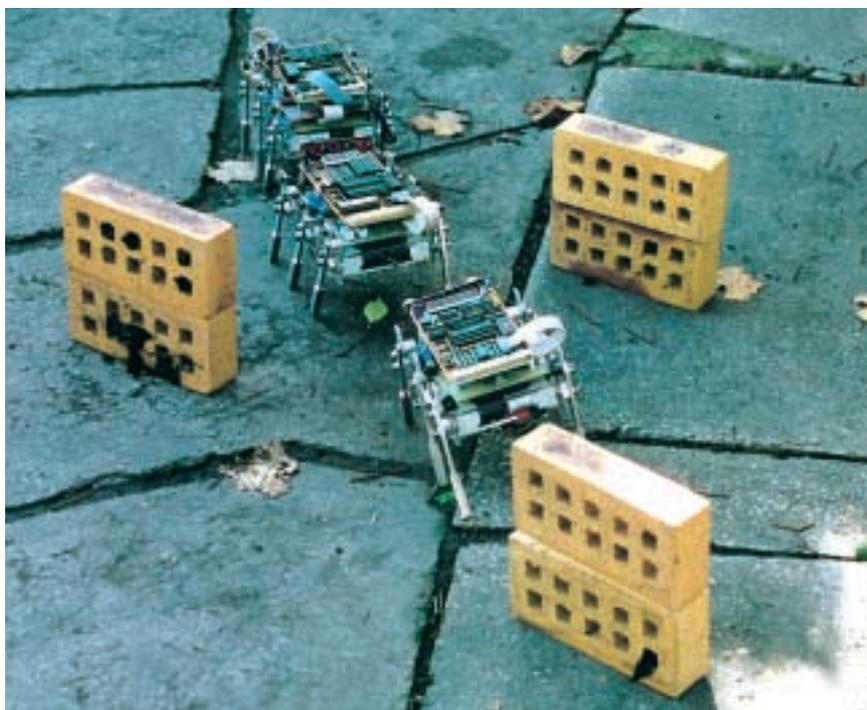
### Les intérêts individuels et les intérêts collectifs

Le modèle microéconomique de coopération place chaque robot face aux autres membres du groupe comme producteur de ressource, où 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 payé 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.

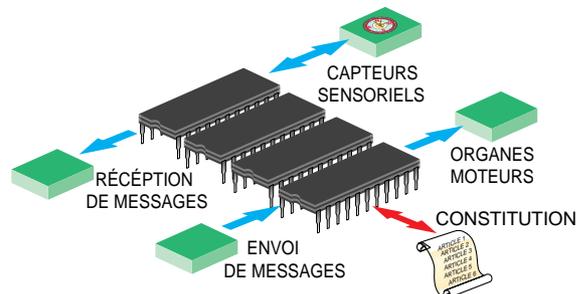
duction d'une économie dans une organisation collective régule la coopération, la division du travail et le partage des ressources entre les robots.

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.

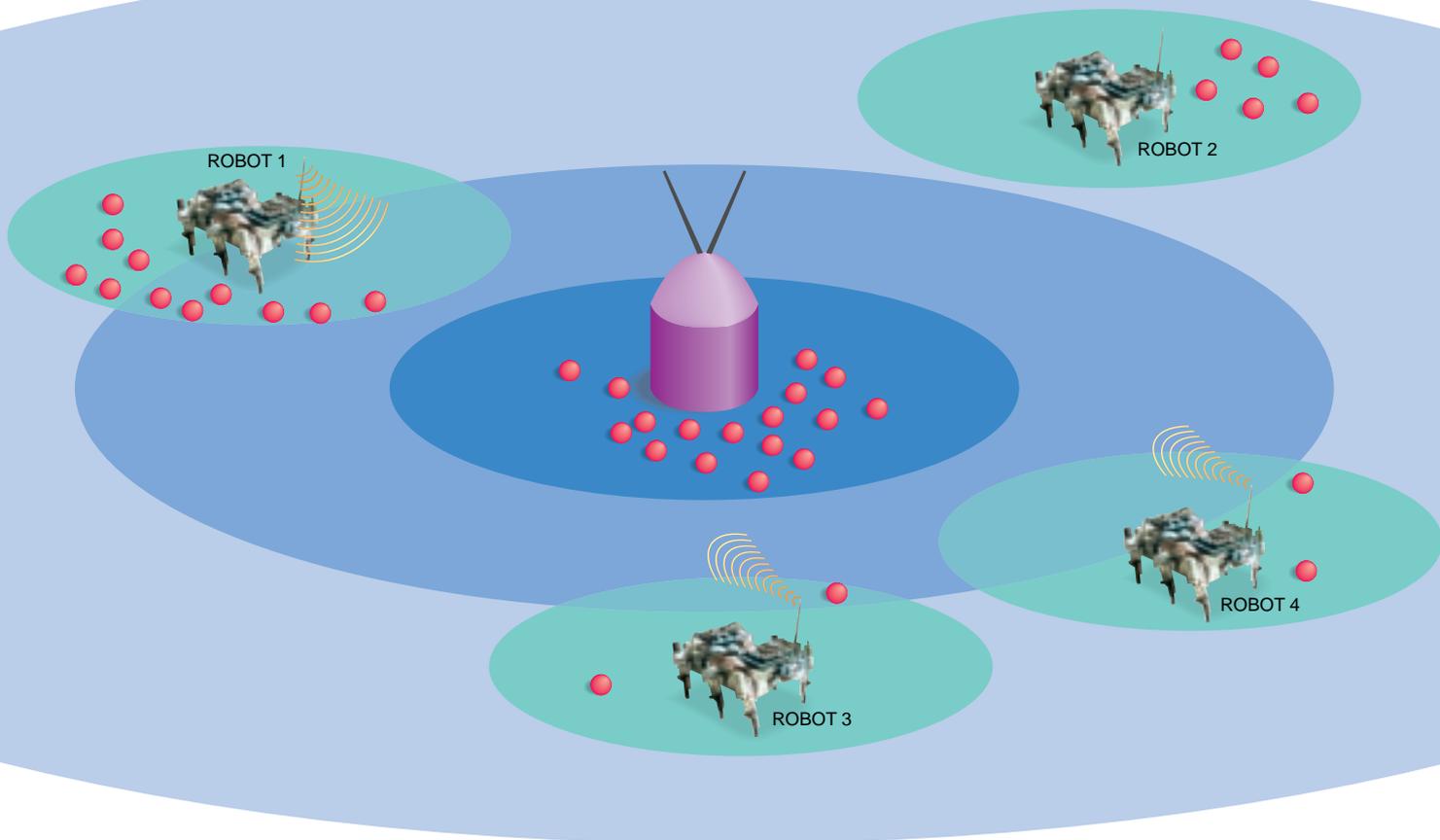
Certaines situations de coopération rencontrées sont analogues au dilemme du prisonnier. Dans ce dilemme, on interroge deux prisonniers sur la culpabilité de leur complice et l'«autorité» détermine la sévérité de leur peine selon leur réaction. Si tous deux coopèrent (ne dénoncent pas leur complice),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



6. LE TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION est une zone de dix mètres de diamètre. Au centre, une balise de repérage auprès de laquelle les robots déposent le minéral ramassé. Les robots explorent leur environnement. Dans sa zone de prospection (*disque vert*), le robot 1 trouve plus de minéral qu'il ne peut en ramasser. Il émet alors un message pour recruter un robot. Deux robots (3 et 4) sont intéressés par l'offre (le robot 2 n'est pas intéressé, car il a du travail

dans sa zone de prospection). Si les robots 3 et 4 veulent tout deux répondre à l'offre, ils soumettent leur désaccord à la constitution (un ensemble de lois, embarqués par chaque robot). Celle-ci départage les robots sur des critères d'intérêt pour le groupe : par exemple, elle favorisera celui qui n'a pas travaillé depuis le plus longtemps afin qu'il puisse recharger ses batteries (les travaux sont rémunérés par de l'énergie électrique).

nier doit-il être pris en charge ou abandonné? Dans ce cas, la prise en charge est plus utile à la communauté que l'abandon : le robot abandonné est perdu pour la communauté, alors que soutenu, il peut aider au ramassage du minéral. Toutefois, la coopération peut entraîner des blocages.

### La résolution des conflits

Lorsque plusieurs robots sont amenés à collaborer, donc à négocier, ils doivent à un certain moment arrêter de négocier. Cet arrêt peut être explicitement programmé après un temps donné, auquel cas on ne peut plus parler d'une négociation, dans la mesure où elle n'a pas abouti.

La seconde possibilité est que les robots s'arrêtent de négocier mutuellement, par exemple lorsqu'ils ont « conscience » d'avoir obtenu chacun le maximum dans la négociation. C'est là le nœud de la programmation d'un groupe de robots : comment un robot peut-il optimiser sa satisfaction?

Pour résoudre ces problèmes, nous avons décidé d'implémenter une

constitution – au sens politique du mot. Nous avons introduit deux premiers articles qui obligent les robots à protéger leurs existences, mutuellement et collectivement. Ces articles ressemblent à la troisième loi d'Asimov que nous avons évoquée en début d'article. Dans le cas où les robots sont chargés de ramasser du minéral, les six articles de notre constitution sont :

- Article un. Aucune action individuelle ou collective ne doit mettre le groupe en danger.
- Article deux. Aucune action individuelle ou collective ne doit mettre un membre du groupe en danger
- Article trois. Aucun robot ne peut fixer seul le prix officiel du minéral non ramassé.
- Article quatre. Un robot est libre de négocier le prix d'une ressource avec un autre robot.
- Article cinq. Pour réviser un règlement de la constitution, il faut que les deux tiers du groupe soient d'accord.
- Article six. La durée d'une négociation est limitée.

Seuls les deux premiers articles ne sont pas modifiables par les membres

du groupe. Les deux premiers articles interdisent à un robot ayant d'importantes réserves d'énergie de refuser son aide à un robot menacé (dont les batteries sont presque vides), dans la mesure où cela ne le met pas lui-même en danger.

Chaque robot embarque un exemplaire de la constitution. Si, lors d'une négociation ou d'un conflit, deux ou trois membres du groupe ne sont pas en mesure de s'accorder sur une action qui engage le groupe, chacun soumet localement à la constitution l'ensemble des propositions et des points de désaccord. Comme tous les robots ont la même constitution, le résultat de la soumission est identique, et les robots exécutent le résultat proposé. Chacun des articles composant la constitution est défini par des fragments de programmes de quelques lignes ou par des fonctions électroniques câblées directement sur le robot.

Examinons le cas d'un robot qui trouve un gisement de minéral dont il sait, par expérience et apprentissage, que deux robots suffisent à l'exploiter : il cherche alors à engager

un seul autre robot. Deux robots, 3 et 4, répondent à son offre. Chacun calcule sa fonction d'utilité. Le robot recruteur choisit alors la robot dont la fonction d'utilité est supérieure. Lorsque les deux fonctions d'utilité sont voisines, le robot recruteur a du mal à choisir, et les deux robots disponibles peuvent ne pas s'accorder. Les deux robots soumettent alors leur désaccord à la constitution.

Celle-ci vérifie que les fonctions d'utilité des robots est bien positive (sinon ils sont en danger) ; elle vérifie l'état des capteurs des deux robots (un robot peut avoir un capteur abîmé ce qui nuirait à son efficacité sur le terrain) ; enfin, elle examine si l'un des deux robots a moins travaillé que l'autre. Dans 99 pour cent des cas, la constitution résout ainsi les conflits en choisissant le robot le plus apte, pour le bien de la société. Lorsqu'à l'issue de cet examen, la constitution ne parvient pas à départager les robots, elle fait un choix aléatoire.

Dans notre expérience, les robots utilisés sont des robots à six pattes, munis d'un système de communication et d'un détecteur de minerai (voir la figure 3). Chaque robot connaît sa position par rapport à une base. Cette dernière n'est pas un organe central de contrôle, mais uniquement un repère fixe pour les robots mobiles. Nous avons analysé la quantité de minerai ramassé en fonction de plusieurs paramètres : le nombre de robots, et selon que le système de communication radio est connecté ou non (suppression du recrutement).

Conformément à nos attentes, la quantité de minerai ramassé augmente avec le nombre de robots du groupe : en passant de trois à quatre robots, le nombre d'échantillons de minerai ramassés après une heure de travail est passé de 16 à 28. En revanche, avec cinq robots, la quantité de minerai ramassé a légèrement diminué, car l'un des robots n'a rien trouvé et que le minerai était plus dispersé que dans les expériences précédentes.

Pourquoi faire des expériences alors que des simulations pourraient reproduire ce phénomène ? Parce que nos expériences sont plus «réelles» que les simulations. La simulation numérique est une forme particulière de l'expérience : elle revêt les apparences d'un système en reproduisant

## L'intérêt individuel, moteur de la coopération

La capacité individuelle de survie d'un robot se définit, soit en considérant sa probabilité de survie dans un environnement donné, soit en analysant son bilan énergétique, c'est-à-dire la différence entre la quantité d'énergie qu'il reçoit et celle qu'il dépense, par unité de temps. Lorsque ce bilan est positif, le robot est capable de survivre et d'investir cette énergie dans la coopération.

Le modèle microéconomique de coopération place chaque robot face aux autres membres du groupe comme producteur de ressources ou comme consommateur. À chaque interaction, le robot calcule sa fonction d'utilité :

$$U_{\text{robot}} = \text{GAIN}_{\text{proposé}} - \text{ÉNERGIE}_{\text{déplacement}} - \text{ÉNERGIE}_{\text{résolution}}$$

où  $\text{GAIN}_{\text{proposé}}$  est le gain d'énergie proposé par le robot recruteur ou offreur de service,  $\text{ÉNERGIE}_{\text{déplacement}}$  l'énergie cinétique nécessaire au robot pour se rendre au site de travail et  $\text{ÉNERGIE}_{\text{résolution}}$  l'énergie nécessaire à la résolution de la tâche.

- Si cette quantité est positive, l'action proposée est rentable pour le robot. Il peut l'accepter immédiatement s'il n'est pas en situation de mieux faire. Sinon l'offre est mémorisée par le robot pour une action différée, en accord avec le robot recruteur ou offreur de service.
- Si la fonction d'utilité est négative, l'action proposée n'est pas intéressante pour le robot, 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 la proposition est aléatoire.

une partie de son comportement ou de sa forme, mais sans en avoir l'ensemble des caractéristiques. Le modèle y est limité aux seules propriétés nécessaires pour mener à bien la tâche que l'on s'est fixé. Dans une expérience ordinaire, l'expérimentateur exerce une action immédiate sur l'objet étudié ; dans une simulation, ce contact n'existe pas : l'expérimentateur agit uniquement sur le modèle de l'objet.

Certes, la simulation est nécessaire lorsque l'expérimentation directe est impossible (impossibilité technique ou expériences trop longues). Le travail de simulation sur l'évolution des espèces, par exemple, justifie pleinement le choix d'une telle démarche. Toutefois, lorsqu'une réalisation demeure possible, pourquoi essayer de reproduire imparfaitement un environnement dont nous disposons sachant que, de toute manière, il n'est pas possible de reproduire pleinement ce milieu ?

Dans la réalité, les robots se fatiguent : après quelques heures, l'un des robots se déplaçait mal, en raison d'une surchauffe de moteur et du frottement de deux pignons. Ce pro-

blème de fatigue, voire de panne du robot, n'est pas pris en compte dans des simulations.

### Constitution nécessaire

Peut-on obtenir un comportement efficace, analogue à celui que nous avons observé, sans l'introduction d'une constitution ou d'une notion d'économie ? Selon nous, une organisation sociale, même artificielle, doit être régulée ; sinon les conflits sont inévitables. Dès lors qu'il y a communication, coopération et négociation, les outils économiques sont indispensables. Dans d'autres réalisations d'intelligence artificielle, ces mécanismes de régulation portent des noms différents, mais ils s'inspirent également de mécanismes économiques, qui seuls peuvent gérer les relations de dépendance complexe dans un système d'interaction collective.

La microéconomie étudie le comportement d'individus rationnels, dans un environnement où toute l'information n'est pas disponible et où les décisions individuelles ne sont pas coordonnées par une autorité centrale. La microéconomie reconnaît que la

concurrence parfaite est une référence abstraite qui ne peut avoir de valeur normative, car les échanges de biens sont inévitablement soumis à des coûts de transaction et à des défauts de coordination. Ainsi, les marchés ne fonctionnent jamais selon l'hypothèse de la concurrence parfaite.

L'analyse des comportements de nos robots dans certaines situations nous a permis de déceler des sources systématiques d'inefficacité de transaction marchande (comportement égoïste, par exemple). Si notre société de robots fonctionne, c'est parce que nous l'avons dotée d'une constitution qui pallie ces lacunes en maintenant la cohésion du groupe.

L'économiste écossais Adam Smith (1723-1790) prétendait que, si chaque agent économique améliore sa situation, la situation du groupe est améliorée. Contrairement à cette intuition, la microéconomie montre que les décisions individuelles égoïstes sont le plus souvent incompatibles avec l'intérêt général. En l'absence de coordination, les individus font des choix qui impliquent un gaspillage de ressources.

Dans les années 1970, l'éthologue Nicholas Humphrey écrivait que l'intelligence des animaux et celle de l'homme résulteraient d'une adaptation, non aux vicissitudes de l'environnement physique (intelligence physique), mais aux contraintes de l'environnement social et à la nécessité de maintenir la cohésion du groupe auquel on appartient (intelligence sociale). Selon cette conception, l'intelligence sert essentiellement à préserver la structure d'un groupe, malgré les tendances individuelles à l'exploitation et à la manipulation des autres. Dans cette mesure, notre groupe de robots est intelligent.

---

Arab ALI CHÉRIF est chercheur au Laboratoire d'intelligence artificielle de l'Université Paris 8 (Saint-Denis). Il enseigne la robotique à la formation MIME de cette université.

R. TANGUY, *Coopération et coordination des robots autonomes*, Colloque IAC, Université Paris 8, février 1997.

J.-P. DELAHAYE, *Logique, informatique et paradoxes*, Bibliothèque Pour la Science, 1995.

D. BLAIR, *La logique du choix collectif*, in *Pour la Science*, octobre 1983.

---