

■ **EN DEUX MOTS** ■ Commander un groupe de robots en pilotant de façon centralisée les positions et les mouvements de chacun aboutit rapidement à une impasse technique. En s'inspirant du comportement de certains animaux, les spécialistes de la robotique ont mis au point des robots

qui peuvent décider eux-mêmes de leurs actions à partir de la perception locale qu'ils ont de leur environnement, selon des règles de comportements simples. Par un échange de signaux simples, chaque robot synchronise ses actions avec celles de ses congénères. Le groupe adopte ainsi des com-

portements « intelligents ». L'inévitable imprécision des communications se révèle fructueuse car elle peut conduire le groupe à opter pour des actions non envisageables avec des communications déterministes. Il en résulte une « sélection naturelle » des découvertes et des solutions.

## Quand les robots imitent la nature

Nul besoin d'individus sophistiqués pour accomplir des tâches complexes. Des chercheurs se sont inspirés de découvertes faites en éthologie au milieu des années 1980 pour la mise au point de robots simples mais doués d'un sens aigu de la communication. En leur laissant, à l'image des animaux, la latitude de se tromper.

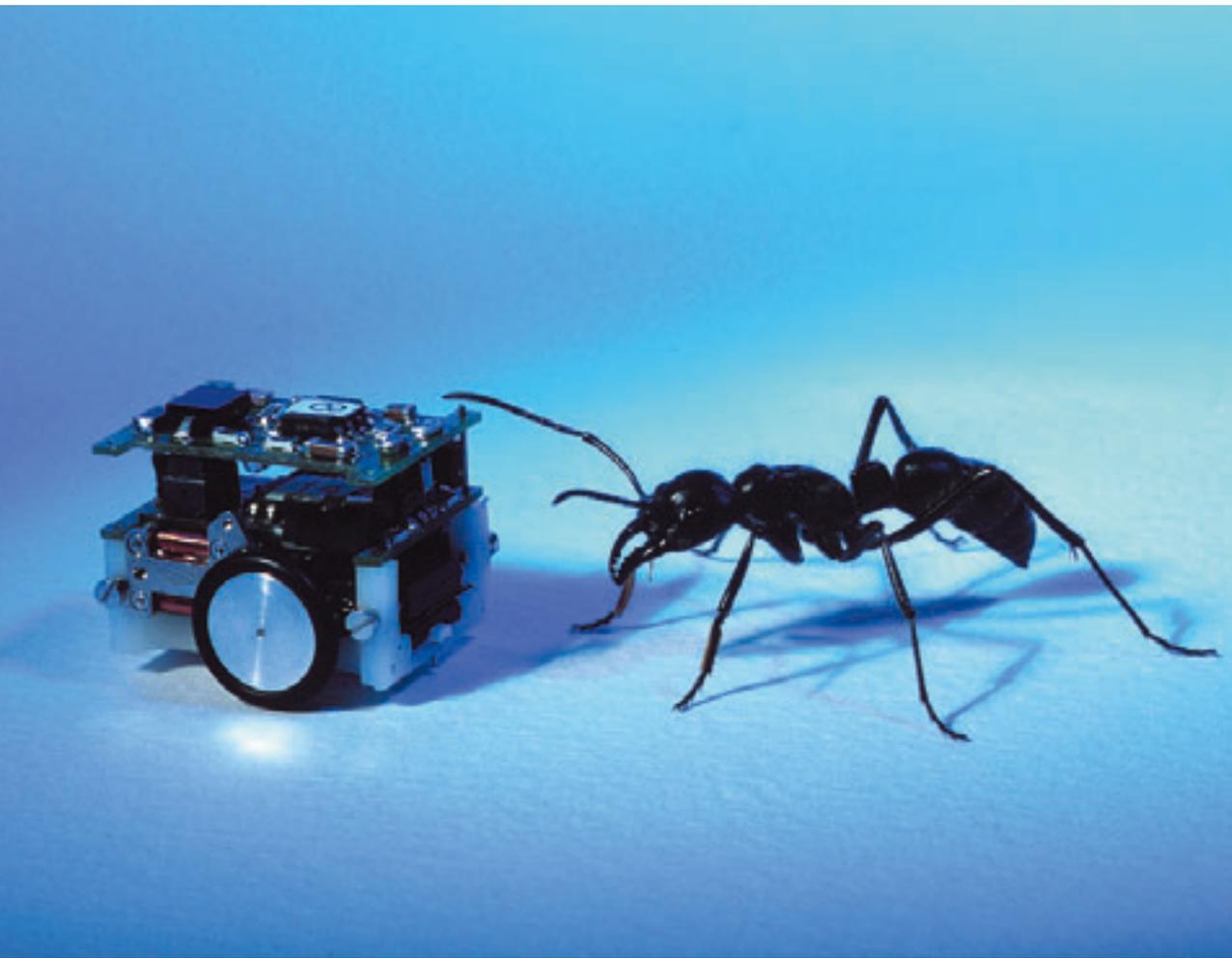
**Alcherio Martinoli  
Guy Theraulaz  
et Jean-Louis  
Deneubourg**

Avez-vous déjà observé la façon dont les fourmis conçoivent leurs cimetières ? Dans nombre de sociétés, elles rassemblent les cadavres des ouvrières à l'extérieur de leur nid et forment des petits tas. Si l'on disperse aléatoirement des cadavres ou des morceaux de cadavres sur la fourmilière, on voit également les ouvrières constituer en quelques heures des petits tas qui vont peu à peu s'organiser dans l'espace (voir figure p. 61). En observant de plus près, on s'aperçoit que le comportement des fourmis consiste à amplifier localement les dépôts : plus il y a de cadavres dans un tas, plus la probabilité qu'une fourmi y dépose le cadavre qu'elle transporte est importante. En outre, plus un tas est volumineux, plus la probabilité qu'une fourmi prenne un cadavre sur ce tas est faible [1]. Deux éléments étonnants : seul un petit nombre de fourmis participe à ce « rituel », et aucun ordre n'est donné aux ouvrières pour leur dicter la façon de s'organiser.

Cette observation ne serait restée qu'un trait intéressant du

comportement des fourmis si une équipe de chercheurs des universités de Bielefeld, de Bristol et de Bruxelles ne s'en était pas directement inspirée pour concevoir des robots capables de rassembler des palets éparpillés sur le sol, et ce, sans qu'ils aient besoin de communiquer entre eux [2]. Seule l'interaction entre le robot et le tas de palets importe : plus celui-ci est gros, plus il est facile pour le robot de le trouver et d'y déposer un nouveau palet.

Cette expérience a été conduite au début des années 1990, alors que la robotique collective n'en était qu'à ses débuts. Encouragés par les résultats prometteurs obtenus dans un premier temps avec un seul robot (notamment par Rodney Brooks, pionnier de la robotique autonome), deux chercheurs du laboratoire d'intelligence artificielle du Massachusetts Institute of Technology (MIT), Maja Mataric et Lynne Parker, ont formalisé les problèmes inhérents à la coordination des actions d'un petit groupe d'individus [3].



**LA TAILLE DES ROBOTS « ALICE »,** développés par Gilles Caprari et Roland Siegwart à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, est comparable à celle de certaines fourmis — ici une ouvrière de *Dinoponera gigantea*. Les microrobots nous permettront notamment de comprendre comment il est possible d'interagir avec des insectes afin de modifier leur comportement. © P. GOETGUELUCK

**Alcherio Martinoli** dirige le groupe de robotique collective au California Institute of Technology (Caltech) à Pasadena (Etats-Unis).

**Guy Theraulaz** est chargé de recherche au CNRS et travaille au Laboratoire d'éthologie et cognition animale à l'université Paul-Sabatier à Toulouse.

**Jean-Louis Deneubourg** est chargé de recherche au FNRS (Fonds national de la recherche scientifique ; Belgique) et professeur à l'Université libre de Bruxelles.

Question posée : comment commander des robots pour qu'ils parviennent à accomplir une tâche collectivement ? Réponse : il y a deux façons de faire.

La première est de centraliser les informations sur l'état et la position (acquise par exemple *via* un GPS) de chaque robot au moyen d'un ordinateur extérieur qui dispose d'une vue globale du groupe.

L'ordinateur devient le maître du jeu : il envoie à chacun les instructions nécessaires pour que sa mission soit remplie. Mais on peut aussi s'affranchir de l'ordinateur central. Chaque robot transmet alors directement ses informations à tous les membres du groupe. Tous disposent ainsi d'une vue d'ensemble et peuvent, à partir de là, décider individuellement des actions à entreprendre. Cette approche, récemment validée par Lynne Parker [4], est

## Lorsque le nombre de robots s'accroît, les risques de collisions et d'interférences radio augmentent.

très efficace pour les petits groupes de robots. En revanche, elle se révèle beaucoup moins performante dès que le nombre d'individus ou leur charge de travail deviennent trop importants. En effet, le réseau radio qui permet aux robots d'échanger les informations constitue un véritable goulet d'étranglement : dans la plupart des cas, tous se partagent une seule fréquence. Le problème est d'autant plus épineux que, lorsque le nombre d'acteurs s'accroît, la coordination des mouvements et des actions se complique, tandis que les risques de collisions et d'interférences radio augmentent.

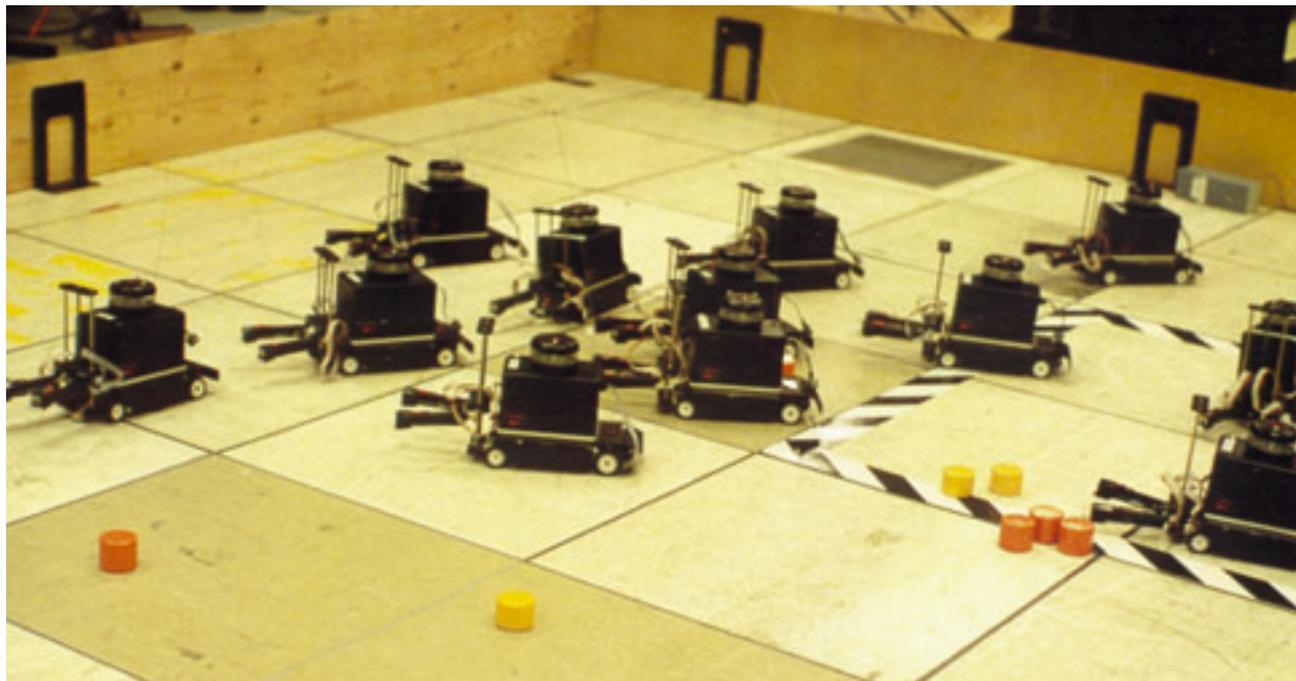
Compte tenu de cet obstacle technique, il est intéressant de constater que les insectes sociaux (termites, fourmis, guêpes) sont, eux, capables de s'organiser au sein de colonies qui comptent jusqu'à plusieurs millions d'indivi- ➔

[1] G. Theraulaz *et al.*, *Proc. Natl. Acad. of Sci. USA*, 99, 9645, 2002.

[2] R. Beckers *et al.*, in R. Brooks et P. Maes (éd.), *Proc. of the Fourth Workshop on Artificial Life*, The MIT Press, 181, 1994.

[3] M.J. Mataric, *Interaction and Intelligent Behavior*, thèse de doctorat, MIT, 1994 ; L.E. Parker, *Heterogeneous Multi-Robot Cooperation*, thèse de doctorat, MIT, 1994.

[4] L.E. Parker, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 14 (2), 220, 1998.



**CES ROBOTS, DÉVELOPPÉS AU MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY et baptisés « R1 », ont pour tâches de rechercher, de récolter et de rassembler les palets disséminés sur la table. Chacun est équipé d'une pince, d'un système de positionnement et d'un système de communication radio. Ils accomplissent cette mission collectivement : chacun profite des informations récoltées par les autres robots pour trouver les palets.** © MAJA MATARIC

⇒ dus. D'où l'idée, suggérée par plusieurs spécialistes de ces animaux (dont Rémy Chauvin, l'un des précurseurs) de prendre ces insectes comme modèle pour la robotique collective.

Depuis le milieu des années 1980, de nombreuses découvertes en éthologie avaient révélé comment, pour accomplir certaines tâches collectives, les insectes s'organisaient spontanément en faisant agir une multitude d'interactions entre eux et avec l'environnement [5]. Ces comportements collectifs (mouvements coordonnés, synchronisation d'activités, constructions collectives, division du travail, etc.) ne sont pas forcément le résultat d'une complexité

comportementale et cognitive propre à chaque individu : ils peuvent spontanément émerger d'interactions entre des insectes qui n'ont qu'une vue partielle de l'action du groupe et qui ne sont capables que de comportements simples.

Autre découverte importante qui incite à prendre les insectes sociaux comme modèle pour la robotique : dans leurs sociétés, il n'existe pas de contrôle hiérarchique ou centralisé des activités de chacun. Les problèmes d'engorgement autour d'un élément central ou au sein d'un réseau de communication global disparaissent de ce fait, et ce, quel que soit le nombre d'individus.

Le modèle peut même dépasser le cadre des insectes

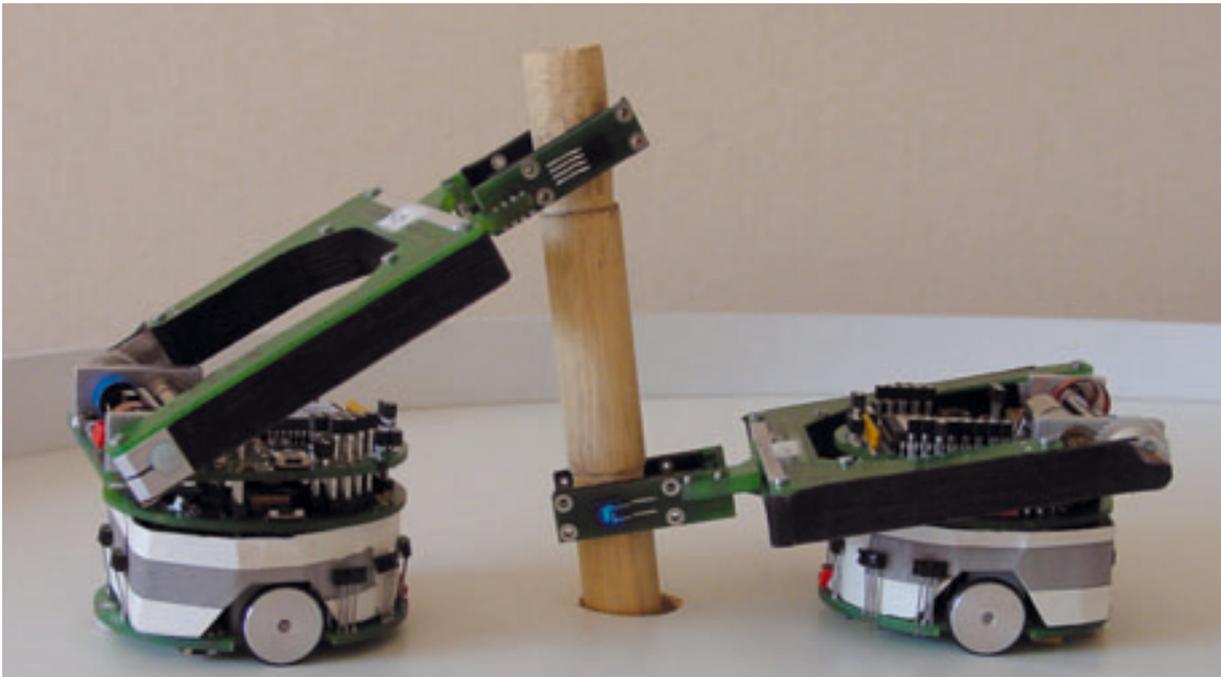
sociaux puisqu'il est capable de s'inspirer d'autres espèces : les oiseaux, lorsqu'ils effectuent un vol en formation, ou les poissons, lorsqu'ils se déplacent par bancs, ont des comportements collectifs similaires aux insectes.

## Des essaims d'insectes à la robotique en essaim

Forts de ces observations, les chercheurs n'avaient plus qu'à les transposer à la robotique pour inventer ce que l'on appelle aujourd'hui la robotique en essaim (*swarm robotics*, en anglais). Son principe : laisser à chaque robot le soin d'agir selon des règles comportementales simples, en fonction de la perception qu'il a de son environnement immédiat. Ainsi, dans l'expérience de l'agrégation des palets, chaque robot perçoit les palets qui l'entourent grâce à ses capteurs, et agit suivant des règles comportementales du type : s'il y a plus de trois objets dans le tas, je les laisse en place ; s'il y en a un ou deux, je les prends avec ma pince.

Evidemment, pas question pour un robot de mettre en œuvre un signal chimique, comme pourrait le faire une fourmi ! Il optera en revanche pour des signaux mécaniques ou électromagnétiques : par exemple, la force exercée par un tas d'objets sur la pince, ou l'intensité d'un signal infrarouge. Ainsi, les robots doivent-ils être dotés de moyens sensoriels élémentaires (capteurs d'obstacle, compte-tours pour chaque roue, etc.) leur permettant de réagir simplement aux changements de leur environnement et de

**Plusieurs spécialistes des insectes sociaux ont suggéré de prendre ces animaux comme modèle pour la robotique collective.**



**CES DEUX ROBOTS KHEPERA NE COMMUNIQUENT PAS ENTRE EUX** et, pourtant, ils parviennent à collaborer pour extraire une baguette d'un trou. Celle-ci est trop longue pour qu'un robot puisse la sortir seul. Aussi, le premier robot soulève la baguette à mi-hauteur, puis le second robot l'extrait complètement. Les seules informations qui parviennent au robot sont liées à son environnement, notamment la position de la baguette. © A. KJERSTIN EASTON

communiquer de manière sommaire avec leurs équipiers. Chaque robot synchronise ses activités avec celles de ses voisins, en fonction de la tâche à accomplir et des contraintes de l'environnement dans lequel il est plongé : densité d'équipiers, nombre d'objets à manipuler, présence d'obstacles, etc. Quels sont les traits essentiels de cette robotique en



**LES DÉPLACEMENTS DES BARRACUDAS** paraissent parfaitement organisés. Pourtant, chaque individu ne dispose que de peu d'informations sur son environnement et ignore la globalité de la structure qu'il forme avec ses congénères. Il se contente de suivre des règles comportementales simples et peu nombreuses. © D. BRANDELET / PHONE

essaim ? Elle repose sur le parallélisme (plusieurs robots travaillent de manière autonome et simultanément à la même mission), le contrôle distribué (chaque robot prend des décisions localement sans en référer à un contrôleur central), ainsi que sur des formes de communication explicites (d'un individu à l'autre, par exemple *via* un signal infrarouge) ou implicites (indirectement, en modifiant l'environnement, par exemple en changeant la distribution des palets). Les informations échangées par les individus (*via* des signaux mécaniques ou lumineux d'intensités différentes) varient en fonction de la tâche à accomplir : elles peuvent être directement liées à une perception environnementale (l'estimation de la taille d'un tas d'objets) ou à un état interne (un seuil de réponse à un stimulus de construction ou de destruction d'un tas). Les contraintes physiques ou géométriques de l'environnement (la longueur d'un bâton à manipuler, la présence d'obstacles, les dimensions de l'enceinte expérimentale) affectent directement la propagation des signaux échangés par les robots et, par là même, agissent sur les réponses individuelles et sur le reste du groupe.

Une fois acquises ces règles comportementales inspirées des animaux, la première expérience suggérée par les cimetières de fourmis n'est pas restée sans suite. Une équipe de l'université d'Alberta, au Canada, a ainsi montré que plusieurs robots pouvaient pousser une boîte sans aucune communication explicite entre équipiers [6]. A l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), ⇨

[5] J.L. Deneubourg et S. Goss, *Ethology, Ecology & Evolution*, 1, 295, 1989 ; J.M. Pasteels *et al.*, in « From individual to collective behavior in social insects », *Experientia Supplementum*, 54, Birkhäuser, 155, 1987 ; E. Bonabeau *et al.*, *Trends in Ecology and Evolution*, 12, 188, 1997 ; S. Camazine, *et al.*, *Self-Organization in Biological Systems*, Princeton University Press, 2001.

[6] R.C. Kube et H. Zhang, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2085, 1996.



**LA QUÊTE DE NOURRITURE DES FOURMIS** est un exemple de travail en coopération dont se sont inspirés les spécialistes de la robotique : les fourmis participent individuellement à la quête, mais une fois la nourriture trouvée (ici, un œuf de lézard), elles se rassemblent pour la rapporter à la fourmilière. © MOFFETT / J. HALIOUA

⇒ Francesco Mondada et l'un d'entre nous (Alcherio Martinoli) ont fait construire des murs de briques à un groupe de Khepera (un robot mobile miniature de 5,5 centimètres de diamètre qui peut être équipé d'une pince), et extraire un bâton d'un trou. Cela à partir des seules interactions indirectes avec l'environnement [7]. Les spectaculaires progrès de la miniaturisation ont permis à l'équipe de l'EPFL de réaliser toutes leurs expériences sur une simple table. Ces différents exemples ont pratiquement tous leur équivalent biologique, si ce n'est que la taille des robots n'a plus grand rapport avec lui. Les insectes, en somme, ont beaucoup appris aux roboticiens. Et bien plus encore que l'on ne l'avait imaginé au départ : les chercheurs ont aussi découvert que, comme l'information n'est pas traitée de la même façon au niveau individuel et à l'échelle collective, le groupe d'insectes ou de robots qui s'auto-organise peut, face à un problème, trouver une solution inaccessible à des individus isolés. Et cela sans faire appel à une quelconque représentation de l'environnement.

Exemple de « succès collectif », qui passe par un processus dit de recrutement : un individu qui découvre un site intéressant « encourage » ses congénères à l'exploiter en émettant un signal simple (par exemple, un signal infrarouge). Ceux-ci, après avoir visité le site, recruteront à

leur tour d'autres individus. La découverte faite par un robot est ainsi « amplifiée ». De plus, une véritable compétition s'instaure entre les différentes découvertes, notamment en raison des contraintes imposées par l'environnement (le chemin pour atteindre l'une des sources pouvant être plus long ou plus tortueux que celui qui mène à l'autre).

## Une « sélection naturelle » des découvertes

Les groupes de robots peuvent aussi trouver des solutions inattendues. En particulier parce que les signaux qu'ils émettent peuvent être réfléchis ou arrêtés par un obstacle, les récepteurs mal orientés, etc. Or, il arrive qu'un message mal compris permette d'atteindre des solutions optimales qu'il serait peu probable, voire impossible, d'obtenir avec des communications parfaites. Le jeu du hasard et les problèmes de communication conduisent à une véritable « sélection naturelle » des découvertes et des solutions [8] que les chercheurs tentent d'exploiter au maximum.

Cette compétition entre les découvertes, ces solutions inattendues et cette « sélection naturelle » ont conduit Gérardo Beni, de l'université de Californie à Riverside [9], à parler d'intelligence en essaim (*swarm intelligence*, en anglais) [10] pour décrire le comportement des robots : les robots sont dotés de capacités cognitives restreintes mais, collectivement, ils peuvent avoir des comportements « intelligents ». Aujourd'hui, après avoir beaucoup progressé et dans l'attente d'une prochaine révolution technologique ou conceptuelle, la robotique collective en est au stade de l'évaluation et de la validation des outils qu'elle a développés.

Parmi les tests les plus récents : les parties de football entre robots (voir l'encadré : « Les robots se mettent au football ») ou de nouvelles expériences inspirées par les fourmis en quête de nourriture. Dans ce second exemple, le but, pour un robot, est de récolter sa « nourriture »,

**Les robots sont dotés de capacités cognitives restreintes mais, collectivement, ils peuvent avoir des comportements « intelligents ».**

des petits cylindres en plastique, en fonction de la quantité de cylindres déjà présente dans le « nid » à un instant donné. Les résultats sont spectaculaires, mais le temps qu'il aura fallu aux chercheurs pour les obtenir a dissuadé d'autres équipes de poursuivre dans la même voie [11].

S'il ne fait guère de doute que l'invention de la robotique en essaim a montré la voie à suivre pour commander un grand groupe de robots, les premières expériences ont permis d'affirmer de façon tout aussi certaine que la recherche empirique de solutions par les robots devenait trop fastidieuse lorsque leur mission est complexe. Pour franchir cet obstacle, les roboticiens n'ont eu d'autre

[7] A. Martinoli et F. Mondada, in O. Khatib et J.K. Salisbury (éd.), *Proc. of the Fourth Int. Symp. on Experimental Robotics*, 3, 1995.

[8] J.-L. Deneubourg, et al., *J. of Theoretical Biology*, 105, 259, 1983 ; J.-L. Deneubourg, *Nouvelles de la Science et des Technologies*, 2, 47, 1984.

[9] G. Beni et J. Wang, *Proc. of the Seventh Annual Meeting of the Rob. Soc. of Japan*, 425, 1989.

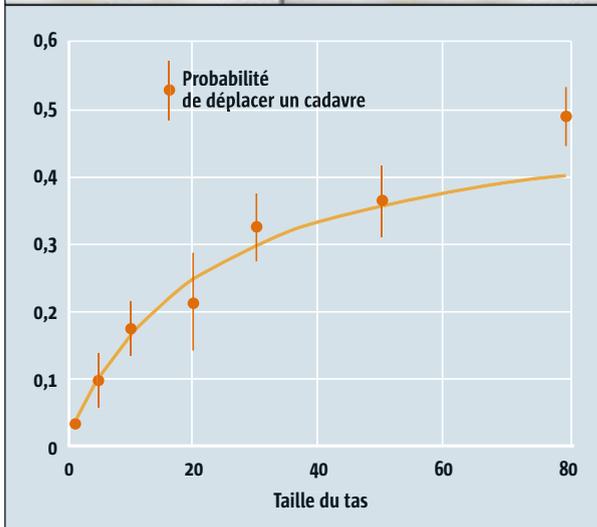
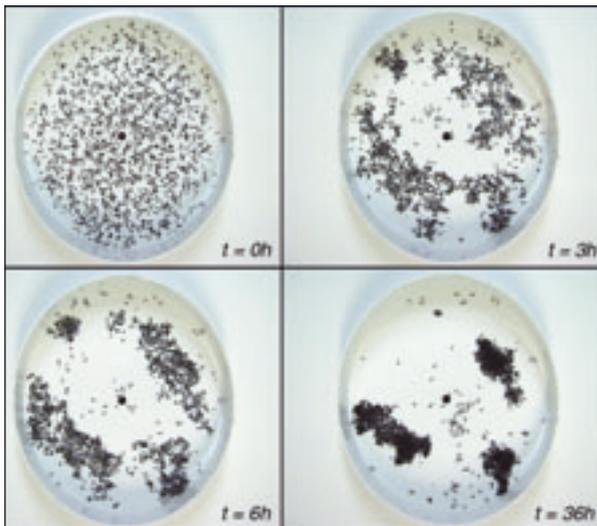
[10] E. Bonabeau et al., *Swarm Intelligence : from Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, 1999.

[11] M.K. Krieger et J.-B. Billeter, *Robotics and Autonomous Systems*, 30, 1-2, 65, 2000.

[12] A.J. Ijspeert et al., in *Autonomous Collective Robotics : The Stick Pulling Experiment*, *Autonomous Robots*, 11(2), 149, 2001.

[13] K. Lerman et al., *Artificial Life*, 7(4), 375, 2001.

# ROBOTIQUE



**AGRÉGATION DES CADAVRES CHEZ LA FOURMI *MESSOR SANCTA*.** Au début de l'expérience, 1 500 cadavres de fourmis sont éparpillés au hasard (en haut à gauche). Après trente-six heures, les ouvrières ont formé trois tas (en bas à droite). La probabilité de déposer un cadavre sur un tas déjà formé augmente rapidement avec la taille des tas (graphique). © PHOTO G. TERAULAZ

choix que de se lancer dans le développement d'outils de modélisation : comme c'est la règle en ingénierie, il leur fallait avoir une idée du comportement de leurs robots et l'optimiser avant de les fabriquer. Les premières tentatives de modélisation ont été menées en 1997 dans le cadre d'un projet commun entre l'EPFL et l'IDSIA (Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale, à Lugano en Suisse). Aujourd'hui, c'est notamment au California Institute of Technology (Caltech) que les chercheurs poursuivent dans cette voie.

On peut désormais modéliser le comportement d'un groupe qui compte jusqu'à plusieurs centaines de robots [12,13]. Pour concevoir et optimiser des systèmes de commande de robots, on fait appel depuis peu aux ⇨

## Les robots se mettent au football

Chez les robots, les compétitions de football confrontent en général des équipes de trois à cinq joueurs. Toutes n'ont pas les mêmes règles et le degré d'autonomie des robots est différent selon les cas.

Le règlement des compétitions ouvertes aux robots de petite taille (15 cm de diamètre au maximum) autorise les roboticiens à utiliser une caméra située au-dessus du terrain pour surveiller le jeu (la balle comme les robots). Dans ce cas, la commande des robots est en général entièrement centralisée et assurée par un ordinateur externe. Celui-ci décide de la stratégie à adopter et émet les signaux de commande destinés à tous les équipiers, allant parfois même jusqu'à commander di-

rectement tous les moteurs de chaque robot. Dans les compétitions où évoluent des robots de taille moyenne (50 cm de diamètre au maximum), aucune aide externe n'est autorisée : tous les capteurs, moteurs, moyens de communication et de calcul doivent être embarqués. Beaucoup de progrès ont été réalisés entre le premier tournoi à Nagoya en 1997 [18] – époque où la victoire était essentiellement affaire de hasard et non de stratégie – et celui qui s'est déroulé en 2001, à Seattle, auquel ont participé pas moins de 11 équipes (photo ci-dessous) [19]. Sans encore être très spectaculaire, cette dernière catégorie de compétitions permet de valider les avancées en robotique autonome.



⇒ algorithmes génétiques ou à l'apprentissage par renforcement [14]. Les résultats sont là : dans une expérience de recherche d'un nuage odorant (par exemple, une fuite de gaz d'une installation chimique), un groupe qui compte jusqu'à six robots est, après optimisation, deux

fois plus rapide que lorsqu'il cherche une solution de façon empirique [15,16]. Plusieurs défis restent aujourd'hui à relever. Le premier est de combiner les avantages de l'intelligence en essaim avec ceux de la communication explicite de robot à robot (échange radio des états, des positions, etc.). Cette combinaison devra être optimisée selon la tâche à accomplir et le nombre de robots. Les résultats seront très différents selon qu'il s'agira d'explorer une nouvelle planète (où l'on ne disposera pas de signal GPS) ou des surfaces agricoles (où le GPS et les communications radio seront disponibles).

### Demain, un robot chien de berger ?

Second défi, la conception et le contrôle de systèmes collectifs composés de centaines, voire de milliers de robots. Pour l'heure, les travaux n'ont porté que sur des groupes composés, au maximum, d'une vingtaine de robots – essentiellement pour des questions de coût. Il est probable que, avec un grand nombre d'unités, les avantages de l'intelligence en essaim nous apparaîtront en premier lieu pour des robots de petite taille, car, de fait, la complexité de ceux-ci sera minimale.

Troisième défi, la mise au point de méthodologies de conception et de modélisation applicables à toutes les tailles de groupes de robots ainsi qu'à tout type de système distribué interagissant avec l'environnement. L'enjeu est ici de disposer d'outils qui pourraient se révéler utiles pour étudier d'autres systèmes ayant des caractéristiques similaires à celles des groupes de robots : voitures ou bus intelligents, essaims de micro-satellites, etc.

Si le succès est au bout du chemin, il y aura peut-être, demain, des robots capables de surveiller l'état de nos réseaux d'eau ou de gaz, ou d'explorer des environnements lointains... D'autres applications seraient encore plus inattendues : par exemple, transformer un robot en chien de berger pour diriger un troupeau de moutons ou emmener des vaches brouter dans un champ déterminé. Ou encore concevoir un robot capable d'empêcher les paniques collectives dans certains élevages avicoles [17]. ■■

A. M., G. T. et J.-L. D.

### POUR EN SAVOIR PLUS

[14] A.T. Hayes et al., *IEEE Sensors, Special Issue on Artificial Olfaction*, 2, 3, 260, 2002.

[15] A. T. Hayes et al., *op. cit.*

[16] A.T. Hayes et al., *Robotica*, sous presse.

[17] G. De Schutter et al., *Annals of Mathematical and Artificial Intelligence*, 31, 223, 2001.

[18] RoboCup, Nagoya, août 1997 ([www.robocup.org/games/97nagoya/311.html](http://www.robocup.org/games/97nagoya/311.html)).

[19] RoboCup, Seattle, août 2001 ([www2.cs.cmu.edu/~robocup2001/](http://www2.cs.cmu.edu/~robocup2001/)).

■ E. Bonabeau et G. Theraulaz, *Intelligence Collective*, Hermès, 1994.

■ P. Arnaud, *Des moutons et des robots*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000.

■ E. Bonabeau, M. Dorigo et G. Theraulaz, *Swarm Intelligence : from Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, 1999.

■ T. Balch et L. Parker (éd.), *Robot Teams : from Diversity to Polymorphism*,

A. K. Peters Ltd, 2002.

■ « Les nouveaux robots », numéro spécial, *La Recherche* février 2002.

■ Guy Theraulaz, Eric Bonabeau et Jean-Louis Deneubourg, « Les insectes architectes ont-ils leur nid dans la tête ? », *La Recherche* octobre 1998.

[dmtwww.epfl.ch/isr/asl/](http://dmtwww.epfl.ch/isr/asl/)

■ Le laboratoire des systèmes autonomes de l'EPFL.

[www.k-team.com/](http://www.k-team.com/)

■ Le site de l'équipe qui a conçu les robots Khepera.

[www.robotics.usc.edu/](http://www.robotics.usc.edu/)

■ Le laboratoire de robotique

de l'université de Californie du Sud.

[www.coro.caltech.edu/](http://www.coro.caltech.edu/)

■ Le groupe de robotique collective du California Institute of Technology.

*D'autres références et d'autres liens sur notre site [www.larecherche.fr](http://www.larecherche.fr)*