



paire

pli

L'intelligence en essaim

ÉRIC BONABEAU • GUY THÉRAULAZ

S'inspirant des fourmis et des insectes sociaux, des informaticiens ont créé des «agents» qui coopèrent pour résoudre des problèmes complexes. Ils automatisent notamment la gestion des données dans les réseaux de télécommunications.

Dans son livre *La vie des termites*, le poète belge Maurice Maeterlinck (1862-1949) écrit à propos de ces insectes : «Qui est-ce qui donne des ordres, prévoit l'avenir, trace des plans, équilibre, administre, condamne à mort? Tout cela n'est-il que jeu de chaos?» Ces questions préoccupent également les biologistes : dans une colonie d'insectes sociaux, tels les fourmis, les abeilles, les termites, etc., pourquoi le groupe est-il cohérent alors que chaque individu semble autonome? Comment les activités de tous les individus sont-elles coordonnées sans supervision? Les éthologistes qui étudient le comportement des insectes sociaux observent que la coopération au sein des colo-

nies est auto-organisée : souvent, elle résulte d'interactions entre les individus. Bien que ces interactions puissent être simples (par exemple, une fourmi se contente de suivre la trace laissée par une autre), elles permettent à la collectivité de résoudre des problèmes difficiles, telle la recherche du chemin le plus court entre le nid et une source de nourriture, parmi d'innombrables voies possibles. Chez les insectes sociaux, le comportement collectif qui émerge des comportements simples des individus est nommé intelligence en essaim.

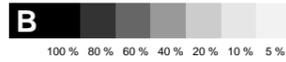
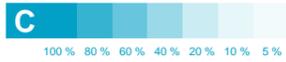
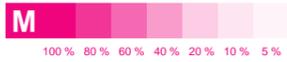
Ces phénomènes d'intelligence en essaim sont de plus en plus étudiés en informatique et en robotique, où des systèmes de contrôle centralisés

gagnent à être remplacés par d'autres, plus autonomes et plus flexibles, fondés sur les interactions d'éléments simples. Dans cet article, nous détaillerons plusieurs applications qui montrent les avantages et la pertinence de ce type de système : une nouvelle méthode de modification du trafic d'un réseau de télécommunications saturé, calquée sur le comportement des fourmis à la recherche de nourriture ; des algorithmes de commande pour des robots plus efficaces, inspirés de la coopération des fourmis qui transportent une grosse proie ; une nouvelle analyse des données bancaires copiée sur la manière dont les insectes agrègent les cadavres d'ouvrières de la colonie et trient leurs larves.



Guy Théraulaz, CNRS Toulouse





pli

impaire



1. LES FOURMIS ŒCOPHYLLES CONSTRUISSENT UN NID grâce à une coopération de tous les individus de la colonie. Pour joindre deux feuilles, des fourmis forment des chaînes vivantes de plus en plus

importantes (page de gauche). Puis ces chaînes rétrécissent et, enfin, des fourmis maintiennent les deux feuilles (en haut) pendant que d'autres utilisent la soie sécrétée par les larves pour les fixer (en bas).



paire

pli

Des fourmis virtuelles

À Bruxelles, Jean-Louis Deneubourg et ses collègues ont été des pionniers de l'intelligence en essaim. Ils ont montré que les processions de fourmis résultent de la sécrétion par les individus d'une phéromone, une molécule

qui attire d'autres fourmis (voir *La détection des phéromones*, par Kjell Døving et Didier Trotier, *Pour la Science*, septembre 1999). La création d'une telle piste marquée est une bonne stratégie pour trouver le chemin le plus court entre un nid et une source de nourriture.

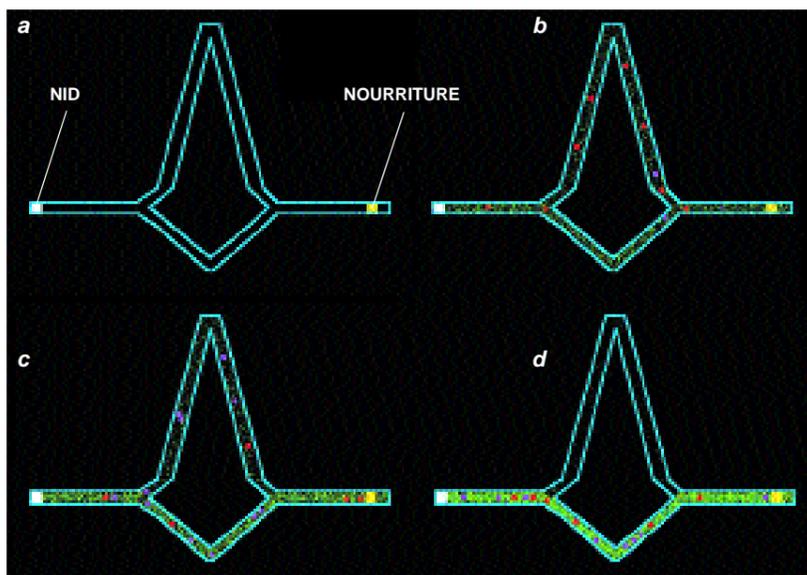
Dans une expérience, des fourmis d'Argentine *Linepithema humile* étaient séparées d'une source de nourriture par deux voies, l'une d'une longueur double de l'autre ; en quelques minutes, elles choisissaient le chemin le plus court. Comment? Les fourmis suivent des pistes marquées par une phéromone et elles en déposent derrière elles. Les premières fourmis qui retournent au nid à partir de la source de nourriture ont emprunté le chemin le plus court dans les deux sens : ce chemin, marqué deux fois par la phéromone, attire plus les autres fourmis que le long chemin, marqué une seule fois (voir la figure 2).

Toutefois, quand le chemin le plus court n'est ouvert qu'après le chemin plus long, déjà marqué à la phéromone, les fourmis continuent de parcourir le chemin plus long. Dans les systèmes artificiels, les informaticiens évitent cet écueil en employant des phéromones volatiles : ainsi, les pistes de phéromone subsistent difficilement sur les chemins les plus longs. Les fourmis virtuelles empruntent alors les voies plus courtes, même quand elles ont été découvertes plus tardivement. Grâce à cette propriété, le système ne se stabilise pas sur des solutions médiocres. Notons que, chez *Linepithema humile*, les concentrations en phéromone décroissent effectivement, mais très lentement.

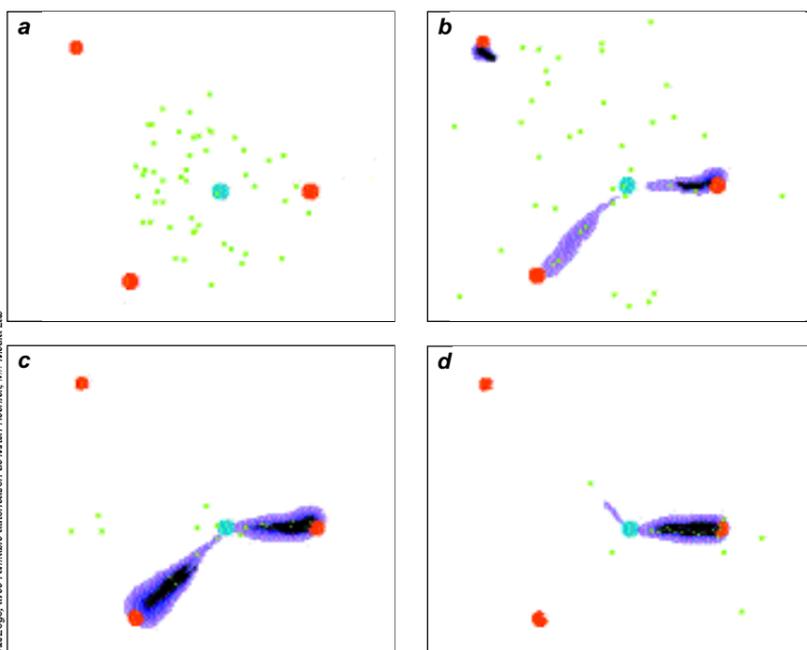
Dans une simulation informatique où les phéromones s'évaporent, les informaticiens ont présenté à une colonie artificielle des sources de nourriture identiques, à des distances différentes du nid : les fourmis virtuelles ont exploré leur environnement au hasard, puis elles ont établi des pistes qui relient toutes les sources de nourriture au nid. Elles n'ont d'abord exploité que les sources les plus proches, en entretenant les pistes qui y menaient. Enfin, quand cette nourriture est épuisée, les fourmis virtuelles se sont dirigées vers les sources plus éloignées. Quelle application peut avoir une telle simulation?

Marco Dorigo et ses collègues de l'Université libre de Bruxelles ont transposé cette stratégie pour résoudre le « problème du voyageur de commerce ». Il s'agit de trouver le plus court chemin passant une seule fois par des villes reliées par des chemins fixes. La formulation est simple, mais le problème est difficile : pour seulement 15 villes, il y existe environ 90 milliards de trajets possibles.

Ce problème est « NP-complet » : le nombre d'étapes de calcul augmente



2. LES PISTES DE PHÉROMONE que suivent les fourmis permettent à celles-ci de chercher efficacement leur nourriture. Des fourmis quittent le nid (en rouge), et suivent au hasard l'une des deux voies où elles déposent de la phéromone (en vert). Les fourmis qui ont emprunté le chemin le plus court retournent au nid le plus vite (en violet) : cette piste est alors davantage marquée à la phéromone ; elle attirera davantage de fourmis que le chemin plus long.



3. DANS CETTE SIMULATION INFORMATIQUE, trois sources de nourriture identiques sont situées à des distances inégales d'un nid (en bleu). Après avoir cherché au hasard (a), les fourmis atteignent les sources à proximité du nid (b et c), puis sélectionnent la plus proche (d). À mesure que la nourriture s'épuise, la concentration en phéromone diminue, et les fourmis exploiteront une source plus éloignée.



pli

impair

plus vite que n'importe quelle puissance du nombre de villes. Pourtant, M. Dorigo a trouvé une solution quasi optimale à l'aide de fourmis artificielles qui déposent l'équivalent numérique de pistes de phéromone volatiles.

Des fourmis représentantes

Le programme commence à lâcher au hasard sur le réseau de villes des fourmis virtuelles indépendantes, qui vont au hasard de ville à ville, en privilégiant les trajets les plus courts (les fourmis connaissent les distances des villes grâce à des tables qui les répertorient). Après avoir visité toutes les villes, chaque fourmi rebrousse chemin, déposant à nouveau une certaine quantité de phéromone virtuelle sur les liaisons qu'elle parcourt. La quantité de phéromone déposée est inversement proportionnelle à la longueur totale du chemin parcouru par la fourmi. Comme la phéromone s'évapore, les liaisons des parcours longs sont moins chargées en phéromone que celles des trajets les plus courts. Lorsque toutes les fourmis ont terminé, les quantités de phéromone déposées par chaque fourmi sont superposées. Parmi toutes les liaisons, celles qui sont les plus riches en phéromone appartiennent à un plus grand nombre de trajets courts.

Puis les fourmis artificielles sont de nouveau libérées au hasard : elles sont maintenant guidées par les pistes de phéromone déposées précédemment (les liaisons à forte concentration sont favorisées), ainsi que par les distances entre les villes (les localités les plus proches ont priorité). La concentration en phéromone et la distance entre deux villes ont une influence égale dans le choix d'une piste.

Quand toutes les fourmis sont de retour dans leur ville de départ, on réitère l'opération. À mesure des essais, le trajet des fourmis artificielles se réduit et, au final, les liaisons favorisées, mises bout à bout, constituent un trajet total court (voir la figure 4).

Quelquefois, de nombreux trajets contiennent une liaison courte qui ne fait pas partie d'un trajet court : cette liaison est donc très marquée sans faire partie d'un trajet optimal. M. Dorigo a découvert que cette liaison n'est utilisée que lors de quelques itérations. Rapidement, une autre liaison, qui fait partie d'un trajet court, est choisie : elle est davantage renforcée que la liaison

précédente, qui perd alors son attrait à mesure que la phéromone s'évapore. Cette optimisation résulte de l'interaction du renforcement et de l'évaporation de la phéromone.

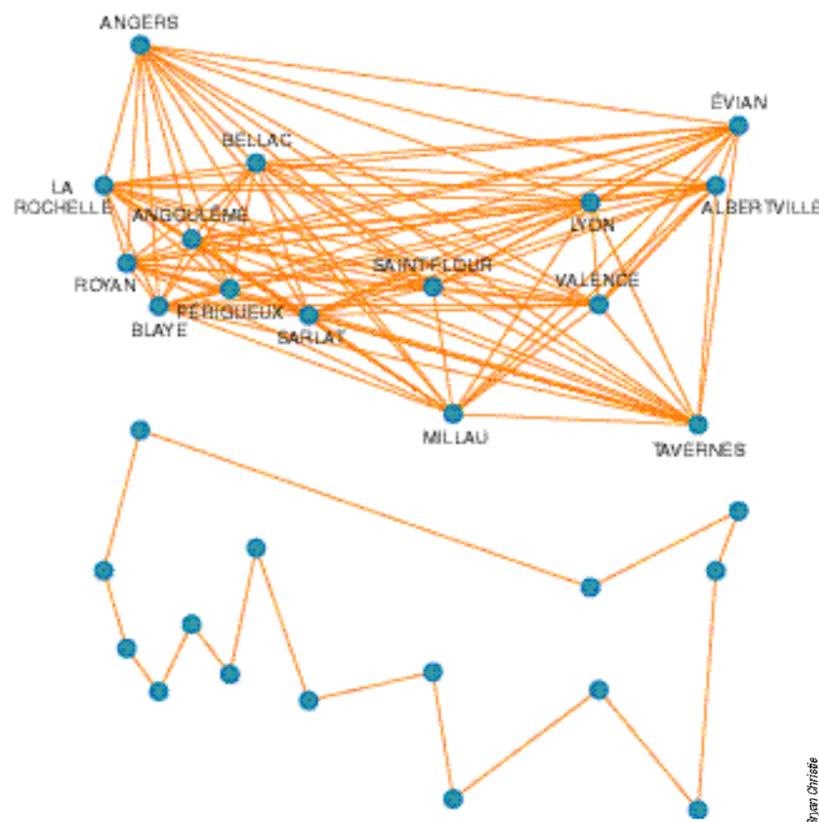
À l'inverse, une liaison longue est parfois indispensable à un trajet court. Cette liaison est initialement moins empruntée, mais, comme dans le cas précédent, elle sera rapidement renforcée après qu'elle aura été choisie.

Si cette méthode inspirée par le comportement des fourmis est efficace pour trouver des chemins courts, elle n'identifie pas nécessairement le plus court. On se contente toutefois de telles solutions quasi optimales, car la recherche du meilleur chemin nécessite une quantité excessive de calculs. En outre, ce système est flexible : les fourmis artificielles explorent continuellement différentes voies ; les différentes pistes de phéromone fournissent donc des plans de secours. Ainsi, lorsqu'une voie est coupée, des solutions de rechange sont déjà prêtes. Cette propriété, qui explique sans doute le succès écologique des vraies fourmis, est cruciale pour de nombreuses applications.

Des approches similaires ont résolu d'autres tâches d'optimisation. Par exemple, des fourmis artificielles ont résolu le problème d'affectation quadratique, où l'on veut répartir la fabrication de divers produits dans différentes usines en minimisant la distance totale que chaque élément doit parcourir entre les diverses installations. David Gregg, de la Société *Unilever*, et Vince Darley et Alberto Donati, de la Société *Bios Group*, ont mis au point un modèle fondé sur le comportement des fourmis pour réduire le temps de production dans une usine de la Société *Unilever* : le système organise l'emploi des réservoirs de stockage, des mélangeurs chimiques, des chaînes d'emballage et d'autres équipements.

Outre les problèmes d'optimisation, qui sont statiques, les agents de type fourmi résolvent également les problèmes de systèmes dynamiques, tel le flux d'un réseau de télécommunications ou de la production dans une usine où une machine tombe en panne.

Un réseau de téléphone, par exemple, est dynamique et imprévisible : un appel de A vers B passe par des



4. PARMIS TOUS LES CHEMINS qui relient 15 villes (en haut), les fourmis virtuelles déterminent un des chemins les plus courts (en bas) en déposant des pistes de phéromones que leurs congénères suivent.



paire

pli

La flexibilité du travail

Dans une colonie d'abeilles, les individus ont une spécialité qui dépend de leur âge. Par exemple, les abeilles les plus vieilles sont plutôt des butineuses, tandis que les jeunes sont les nourrices. L'attribution des tâches n'est pas rigide: lorsque la nourriture manque, les nourrices butinent également.

Cette répartition souple du travail nous a inspiré, avec Michael Campos, de l'Université Northwestern, une technique de programmation des cabines de peinture dans une entreprise de construction automobile. Dans l'usine, les cabines peignent les véhicules assemblés, et chaque cabine, à la manière d'une abeille artificielle, est spécialisée dans une couleur. Le changement de couleur d'une cabine est long et coûteux.

Nous avons supposé qu'un individu abandonne une tâche s'il perçoit un besoin important pour une autre fonction. Ainsi, une cabine à peinture rouge utilisera cette couleur jusqu'à ce qu'il soit urgent de peindre un véhicule en blanc, alors que les cabines spécialisées pour le blanc sont saturées.

Malgré la simplicité des règles, le système des abeilles permet aux cabines de peinture d'être programmées plus efficacement, notamment avec moins de changements de couleur, qu'avec un ordinateur centralisé. D'autre part, la méthode s'adapte aux souhaits des consommateurs : quand la demande de véhicules blancs augmente de façon inattendue, des cabines renoncent rapidement à leur couleur de spécialisation et reçoivent les véhicules non affectés. En outre, le système traite facilement les contretemps, telles les pannes de cabines, que d'autres stations compensent rapidement en partageant le travail supplémentaire.



LES ABEILLES adaptent leur travail aux besoins de la ruche. La façon dont ces tâches sont réparties inspire aux informaticiens des améliorations dans la façon de programmer les équipements d'une usine automatisée (à droite), telle une usine automobile.

nœuds intermédiaires, ou stations de commutation. Comment planifier le trajet du message? Un algorithme qui gère ainsi les messages ou les appels doit éviter les zones congestionnées afin de minimiser les délais, et il doit trouver des voies de secours lorsque les conditions se détériorent. Le mauvais temps ou une saturation locale pendant un jeu télévisé obligent à rediriger les appels vers des parties moins encombrées (voir la figure 5).

Des fourmis au téléphone

Ruud Schoonderwoerd et Janet Bruuten, des Laboratoires de recherche Hewlett-Packard, et Owen Holland, de l'Université de Bristol, ont mis au point un système où des agents de type fourmi déposent des bits d'information, une «phéromone virtuelle», à l'endroit des nœuds du réseau pour renforcer les passages à travers des zones non congestionnées, tandis qu'un

mécanisme d'évaporation ajuste l'information donnée par les nœuds pour défavoriser les zones encombrées.

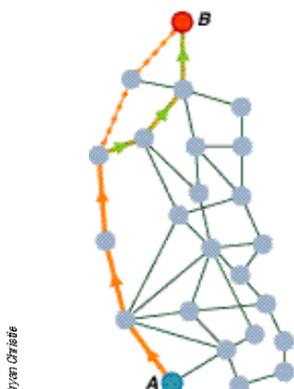
Chaque nœud dispose d'une «table de trafic», qui indique aux appels téléphoniques le chemin à suivre selon leur destination. Des agents de type fourmi ajustent en permanence les valeurs des tables qui reflètent alors les conditions de circulation sur le réseau. Un agent qui subit un retard important dans une partie de réseau congestionnée ajoute une petite quantité de phéromone virtuelle aux valeurs des tables susceptibles d'envoyer les appels vers cette zone surchargée. En termes mathématiques, les valeurs des nœuds correspondants sont légèrement augmentées.

En revanche, un agent qui passe rapidement d'un nœud à un autre renforce l'utilisation de cette voie en déposant une grande quantité de phéromone, c'est-à-dire que les valeurs des tables augmentent notablement. Les calculs empêchent qu'un chemin encombré, donc suivi par de nombreux agents, ait une quantité de phéromones supérieure à celle déposée sur une voie non congestionnée fréquentée par moins d'agents.

Le système supprime les solutions obsolètes grâce à une «évaporation mathématique»: toutes les valeurs des tables sont régulièrement diminuées. Cette évaporation et l'augmentation des valeurs par les agents de type fourmi fonctionnent de pair: ainsi, sur les voies encombrées, l'évaporation est supérieure au renforcement; en revanche, les chemins dégagés se renforcent.

L'équilibre entre évaporation et renforcement est fragile. Lorsqu'un chemin qui était satisfaisant se congestionne, les agents qui l'empruntent sont retardés, et l'évaporation devient supérieure au renforcement. Le chemin est alors rapidement abandonné, et les agents découvrent (ou redécouvrent) d'autres solutions qu'ils exploitent. Les avantages sont doubles: lorsque des appels téléphoniques sont redirigés vers des zones du réseau moins surchargées, d'une part celles-ci se décongestionnent, et, d'autre part, les appels sont rapides.

Les Sociétés France Télécom et British Telecommunications ont été les premières à étudier ces méthodes. Aux États-Unis, la Société MCI Worldcom utilise également ces méthodes pour d'autres tâches, telle la facturation des clients. Le réseau Internet, où le trafic est particulièrement imprévisible, est celui qui profitera le plus des programmes d'intelligence en essaim.



5. LE TRAFIC D'UN RÉSEAU peut être modifié rapidement à l'aide d'agents logiciels qui se comportent comme des fourmis. Un appel de A à B transite à travers des nœuds intermédiaires. Quand une partie de la voie la plus courte (en orange) est congestionnée, le système redirige la transmission vers une autre voie (en vert). Des agents logiciels effectuent ce changement automatiquement, de la même manière que les fourmis visitent différentes sources de nourriture: une voie congestionnée équivaut à une source de nourriture épuisée.



pli

impair

Des fourmis sur la toile

Pour gérer les conditions astreignantes du réseau *Internet*, M. Dorigo et son collègue Gianni Di Caro ont perfectionné les agents de type fourmi afin qu'ils tiennent compte de facteurs supplémentaires, tel le temps total de transit d'une information entre son départ et son arrivée (pour les réseaux téléphoniques, seul le temps d'un nœud à un autre est pris en compte, et le trafic est supposé égal quel que soit le sens). Aussi bien pour la maximisation des débits que pour la minimisation des délais, les premiers résultats des simulations indiquent que ce système de gestion du trafic est plus efficace que ceux qui sont utilisés, tel le protocole aujourd'hui en vigueur sur le réseau *Internet*, où les nœuds s'informent en permanence de l'état des liaisons auxquelles ils sont connectés.

Outre l'orientation et le déplacement, d'autres comportements d'insectes sociaux sont copiés par les roboticiens. Par exemple, ils étudient le transport coopératif chez les fourmis pour concevoir des techniques de commande d'un groupe de robots.

Chez certaines espèces, une fourmi qui ne peut récupérer seule une proie recrute parfois des congénères pour l'aider : pendant quelques minutes, les fourmis changent de positions et d'alignements autour de l'objet, jusqu'à ce qu'elles soient capables de transporter la proie vers le nid.

Ronald Kube et Hong Zhang, de l'Université d'Alberta, ont reproduit ce comportement avec des robots mécaniques. Ces derniers devaient pousser une boîte vers un emplacement donné. La boîte ne pouvait être poussée par un seul robot et, de surcroît, ceux-ci étaient dotés d'instructions simples telles que : trouver la boîte, établir un contact avec elle, se positionner de manière à ce que la boîte se trouve entre le robot et le but, puis pousser la boîte en direction du but.

Malgré la simplicité des programmes, la similitude entre le comportement des robots et celui d'une colonie de fourmis est frappant : les robots se déplacent d'abord au hasard, à la recherche de la boîte. Puis, quand ils l'ont localisée, s'ils sont en nombre suffisant, ils la poussent. Lorsque la boîte reste immobile, les robots changent leurs positions et leurs alignements. Ils se repositionnent en permanence lorsqu'ils perdent le contact avec la boîte, quand

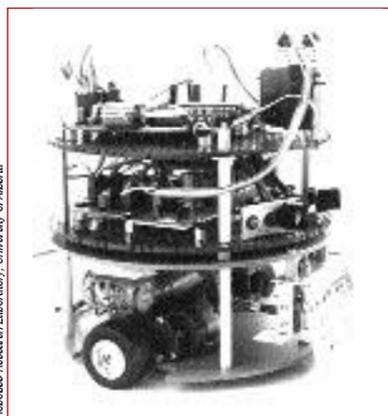
ils se bloquent mutuellement ou lorsque la boîte tourne. Enfin, malgré leurs capacités limitées, les robots amènent la boîte au but (voir la figure 6).

Confrontés au même problème, des êtres humains imaginent des collaborations plus efficaces. Toutefois, l'approche de l'intelligence en essaim est propice à la miniaturisation et à la réduction des coûts. Les ingénieurs concevraient ainsi des robots simples et peu onéreux qui coopéreraient pour des tâches de plus en plus complexes.

Dans un autre projet, des méthodes d'analyse de données financières reproduisent les stratégies de regroupement des cadavres et de tri des larves mis en œuvre par les fourmis. Chez les fourmis *Messor sancta*, les ouvrières nettoient les nids en entassant à l'extérieur

les cadavres. Dans des nids artificiels reproduits en laboratoire, elles regroupent en quelques heures des corps dispersés de façon aléatoire (voir la figure 7). De la même manière, les ouvrières de l'espèce *Leptothorax unifasciatus* trient systématiquement les larves et les œufs. Les petites larves sont regroupées avec les œufs, les pupes et prépupes (des stades intermédiaires dans le développement des insectes) sont autour, elles-mêmes entourées par les larves les plus grandes.

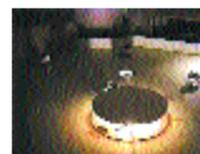
Selon J.-L. Deneubourg, de petits amas de cadavres s'agrandissent, car ils attirent les ouvrières qui y déposent plus d'éléments : cette rétroaction positive entraîne la formation de tas de plus en plus grands. Pour les couvées, les fourmis ramassent et déposent les éléments en fonction du nombre d'objets similaires environnants. Par exemple, quand une fourmi trouve une grande larve entourée d'œufs, elle prend de préférence la larve qui constitue «l'intrus» et la dépose dans une zone qui contient déjà d'autres grandes larves.



Robotic Research Laboratory, University of Alberta



Guy Théron, CNRS Toulouse



Robotic Research Laboratory, University of Alberta

6. LA COOPÉRATION DES FOURMIS, ici pour porter une grosse proie (à gauche), a inspiré aux informaticiens des programmes simplifiés de robots. Dans une expérience réalisée à l'Université d'Alberta, les robots doivent pousser une boîte circulaire illuminée vers une source de lumière. Bien que chaque robot (en haut, à gauche) ne communique pas avec les autres et agisse indépendamment, en suivant un petit ensemble d'instructions simples, l'action collective du groupe permet d'atteindre l'objectif fixé (à droite).



paire

pli

Des cimetières de données

En se fondant sur ce tri du couvain, nos collègues britanniques Erik Lumer et Baldo Faieta ont mis au point une méthode d'exploration d'une grande banque de données. Supposons, par exemple, qu'une banque veuille identifier ses clients les plus susceptibles de rembourser un prêt. La banque dispose de nombreux renseignements sur ses clients, tels l'âge, le sexe, la situation familiale, le type de logement, les services bancaires favoris... En étudiant des groupes de personnes aux caractéristiques similaires, les responsables des prêts détermineraient la fiabilité des divers clients et ils pourraient exiger des garanties solides des demandeurs de prêt appartenant aux groupes dominés par des débiteurs défaillants.

Les spécialistes d'analyse des données aiment visualiser les groupes sur un plan (au-delà, l'interprétation des données est difficile), où chaque client est représenté par un point. Ces clients sont donc dans la situation des œufs et des larves que des fourmis logicielles peuvent déplacer, ramasser et déposer selon les éléments environnants. La distance entre deux clients indique leur degré de similitude. Les fourmis arti-

ficielles prennent leur décision de tri en fonction de toutes les caractéristiques des clients et, selon les objectifs de la banque, le logiciel peut avantager mathématiquement certains attributs.

Grâce à ce type d'analyses, une banque identifie facilement les personnes âgées d'environ 20 ans, célibataires, vivant pour la plupart chez leurs parents et dont le service bancaire préféré est le suivi des placements, ou celles qui sont âgées d'environ 57 ans, de sexe féminin, mariées ou veuves et propriétaires de leur logement sans hypothèque.

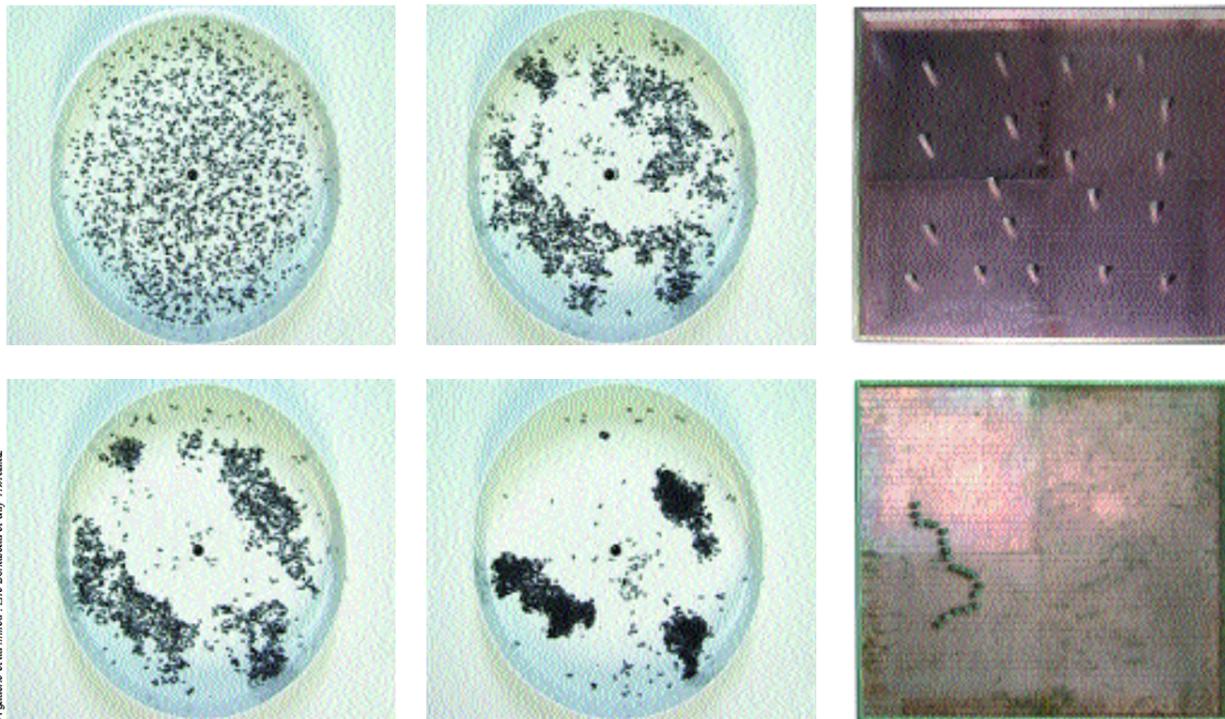
Les banques et les compagnies d'assurances utilisent déjà ce type d'analyse de profils. Cependant, grâce au modèle des fourmis, la visualisation des données est facile et, surtout, le nombre de groupes ressort automatiquement des données, alors que les méthodes classiques requièrent un nombre prédéfini de groupes où les données sont réparties. Ainsi, le tri des fourmis artificielles met au jour des communautés qui autrement restent cachées.

Par ailleurs, l'agrégation des cadavres a inspiré Alcherio Martinoli et ses collègues de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, qui ont transposé les comportements des four-

mis à des robots nommés Khepera. Chaque robot est équipé d'une pince avec laquelle il saisit et transporte des objets d'un diamètre inférieur à cinq centimètres. Grâce à des récepteurs infrarouges, les robots évitent les obstacles ou les autres robots. Quand l'obstacle est petit, le robot y voit un objet à prendre : lorsque le robot ne transporte rien, il saisit l'objet ; sinon, il dépose l'objet qu'il tient à côté du nouvel objet. Les expériences ont été effectuées dans une arène carrée de 80 centimètres de côté, où cinq robots et 20 objets ont été répartis au départ. En quelques heures, les robots ont rassemblé tous les objets et construit des agrégats en forme de serpentins (voir la figure 7).

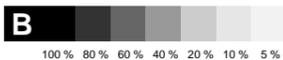
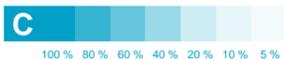
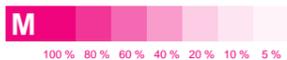
L'agrégation d'objets n'est qu'une première étape vers la compréhension du lien existant entre le processus de construction d'une structure spatiale et des algorithmes de résolution distribués. Quel doit être le comportement des robots? Quelles règles de dépôt et de prise d'objets doivent-ils suivre afin que leurs interactions produisent la forme recherchée?

Les insectes sociaux ont déjà répondu à ces questions. Ainsi, chez les guêpes sociales, qui construisent des nids, en carton ou en boue, d'architecture



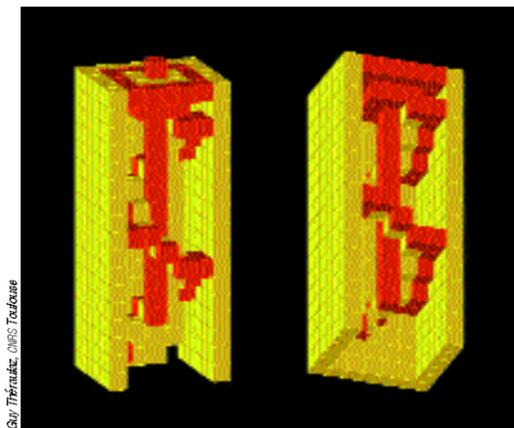
7. LES FOURMIS OUVRIÈRES regroupent les cadavres pour nettoyer leur nid. Dans une expérience, 1 500 cadavres sont éparpillés au hasard (en haut, à gauche) : après 26 heures, les ouvrières ont formé trois amas (en bas, au centre). Ce comportement et la

manière dont les fourmis trient également leurs larves ont inspirés des algorithmes de robots, qui déplacent des objets placés initialement au hasard dans une arène (en haut, à droite), et les rassemblent en un serpent (en bas, à droite).



pli

impaire



8. CETTE STRUCTURE (vue sous deux angles) a été obtenue par auto-assemblage de 500 briques grâce à un processus « stigmergique » : selon le voisinage perçu, c'est-à-dire l'état des 26 briques qui l'entourent, l'agent virtuel bâtisseur dépose ou non une brique dans la cellule qu'il occupe. On a ôté la couche de briques superficielle pour montrer la structure interne de l'ensemble.

complexe, la forme du nid détermine indirectement la construction par un processus nommé stigmergie : certaines microstructures rencontrées sur le nid influencent l'activité bâtisseuse. Par exemple, certaines configurations de cellules, identifiées par la guêpe grâce à ses antennes, entraînent la construction d'une nouvelle cellule, alors que d'autres sont sans effet. La dynamique de construction s'apparente à un processus d'auto-assemblage. Nous avons montré que les structures produites par cet auto-assemblage et des algorithmes stigmergiques pouvaient être très élaborées (voir la figure 8). De plus, d'autres problèmes peuvent être convertis sous la forme d'une représentation spatiale, afin d'être résolus par des robots manipulateurs d'objets. Les divers systèmes que nous avons détaillés illustrent l'abondance d'applications fondées sur le comportement des insectes sociaux. Nous pouvons encore citer d'autres exemples : la planification du travail dans une usine peut être améliorée par l'étude de la flexibilité de la répartition des tâches chez les abeilles (voir l'encadré de la page 70) ; inspiré par la manière dont les guêpes construisent leurs nids, Dan Petrovich, de l'Institut de technologie de l'armée de l'air américaine, a mis au point un essaim de petits satellites mobiles qui s'assembleraient en une structure donnée plus grande ; grâce à des agents logiciels de type insecte, Van Dyke Parunak, de l'Institut de recherches environnementales du Michigan, résout des problèmes de fabrication, telle la gestion d'un

réseau de fournisseurs d'une usine...

Paul Kantor, de l'Université Rutgers, utilise l'intelligence en essaim pour rechercher des informations sur le réseau *Internet*, ainsi que dans d'autres grands réseaux : dans une colonie d'utilisateurs, les internautes à la recherche de sites intéressants accèdent aux informations sous forme de phéromones numériques laissées par d'autres membres de la même colonie lors de recherches précédentes.

L'intelligence en essaim offre un moyen de concevoir des systèmes capables de s'adapter rapidement à des conditions changeantes. Elle s'est développée grâce à

notre compréhension du fonctionnement des sociétés d'insectes, même si parfois les détails précis sur les mécanismes impliqués sont encore inconnus.

Toutefois, bien qu'efficaces dans de nombreuses tâches d'optimisation et de contrôle, les systèmes d'intelligence en essaim sont par principe réactifs et manquent d'une vue d'ensemble indispensable à la résolution de problèmes qui requièrent des techniques de raisonnement approfondi.

Les informaticiens craignaient que les agents autonomes de type insecte ne deviennent incontrôlables dans les ordinateurs qu'ils habitent. Les nombreuses applications leur ont démontré que cette caractéristique est un avantage lorsqu'elle permet à de tels systèmes de s'adapter à des problèmes imprévus : cette flexibilité fait défaut aux logiciels classiques.

Ainsi, les insectes sociaux nous enseignent que des éléments réactifs et simples, correctement connectés dans un groupe, sont capables de produire des résultats intelligents : l'astuce réside dans la pertinence des connexions.

Éric BONABEAU est directeur scientifique à la Société *Euro-Bios*, à Paris. Guy THÉRAULAZ est éthologiste au CNRS, à l'Université Paul Sabatier, à Toulouse.

Éric BONABEAU, Marco DORIGO et Guy THÉRAULAZ, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, 1999.