

L'intelligence collective

■ GUY THERAULAZ ■ ÉRIC BONABEAU ■ SIMON GOSS
■ JEAN-LOUIS DENEUBOURG

Comment les fourmis recherchent leur nourriture et organisent leur nid.

Les performances collectives des insectes sociaux (fourmis, abeilles, guêpes ou termites) intriguent entomologistes et philosophes : comment ces animaux réussissent-ils à bâtir leurs nids, aux structures complexes ? Quels mécanismes permettent-ils aux individus d'une colonie de régler leurs activités, favorisant ainsi la survie de l'espèce ?

Tout se passe comme si un agent invisible, au centre de la colonie, coordonnait les activités de tous les individus : au début de ce siècle, l'écrivain M. Maeterlinck postula de manière romantique l'existence d'une « âme de la ruche » pour expliquer ses observations. En 1911, l'entomologiste américain W. Wheeler

utilisa la métaphore de l'organisme social et proposa le concept de superorganisme : les sociétés d'insectes semblaient analogues à des micro-organismes unicellulaires, où la reine jouerait le rôle du noyau cellulaire, et la masse des ouvrières celui du reste de la cellule ; les pistes, chimiquement marquées, suivies par les individus pour la recherche de nourriture, seraient l'équivalent des pseudopodes que les cellules émettent pour s'alimenter.

Dans les années 1950, de façon beaucoup plus concrète, les travaux de l'école d'entomologie française sur les constructions collectives des termites (Pierre-Paul Grassé), des fourmis (Rémi Chauvin) et des abeilles (Roger Darchen) précisèrent

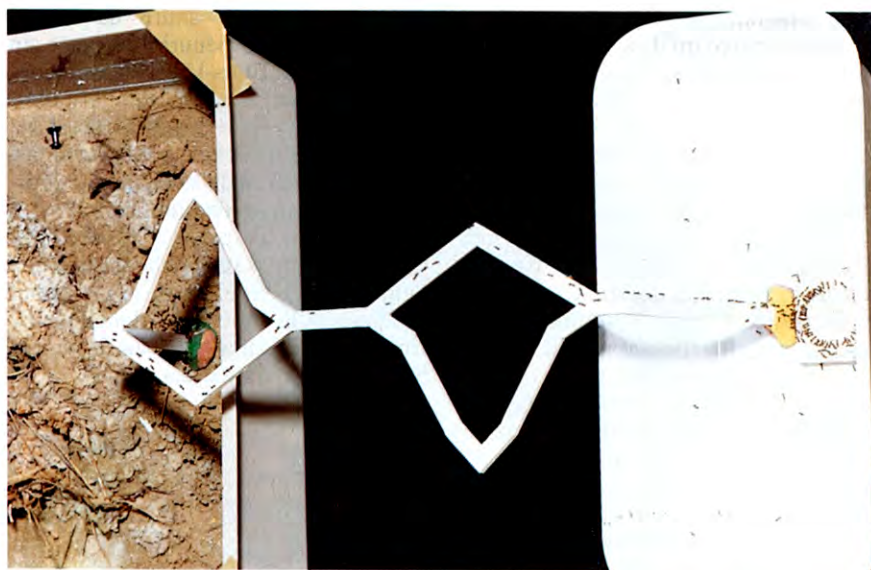
cette idée d'un comportement global résultant d'une multitude d'interactions locales.

Grassé forgea notamment la théorie de la « stigmergie » pour expliquer la coordination des tâches individuelles ; il mit en évidence, dans l'activité bâtisseuse des termites, que la régulation des constructions ne dépend pas directement des ouvriers, mais des constructions elles-mêmes. L'ouvrier ne dirige pas son travail ; il est guidé par lui. Ainsi tout insecte, en construisant, modifie la forme de la stimulation qui déclenche son comportement et provoque l'apparition d'une nouvelle stimulation, qui déclenchera d'autres réactions, chez lui-même ou chez un de ses congénères. Le plan de construction du nid n'est que la conséquence de la succession des stimuli, lesquels changent au fur et à mesure que la forme se modifie.

La nature de ces interactions, les mécanismes de traitement de l'information par les individus et la différence entre le comportement solitaire et le comportement social restaient mystérieux. En 1977, à l'Université libre de Bruxelles, l'un d'entre nous (J.-L. Deneubourg) observa que ces phénomènes de coopération entre insectes ressemblaient à des phénomènes d'auto-organisation et de structures dissipatives détectés dans divers systèmes physiques ou chimiques : dans les sociétés d'insectes, des configurations globales cohérentes, caractéristiques de l'espèce (construction d'un nid, établissement d'un réseau de pistes autour du nid chez les fourmis, différenciation et assignation des tâches...) résultent des communications entre les individus, d'une part, des interactions des insectes et de leur environnement, d'autre part.

On observe un même type d'auto-organisation dans les systèmes physiques (cellules de convection dans les liquides, par exemple), chimiques (réactions oscillantes) ou biologiques (spirales formées par les amibes qui s'agrègent). Dans ces systèmes, initialement homogènes ou stationnaires, des structures organisées apparaissent si les composants interagissent de façon non linéaire (si les réactions ne sont pas proportionnelles aux stimulations). De fait, dans les sociétés d'insectes, les interactions des individus, ou des individus avec les tâches qu'ils accomplissent, sont fortement non linéaires.

Nous examinerons ici deux modèles théoriques, fondés sur de tels processus, qui décrivent l'apparition de diverses structures coloniales ; pour chacun, nous donnons un algorithme simple afin de simuler ces modèles sur un ordinateur de bureau.



1. Comme le Petit Poucet, les fourmis marquent le chemin qu'elles empruntent entre leur nid et une source de nourriture qu'elles ont détectée. Ce marquage par dépôt de phéromone a été confirmé dans cette expérience où un nid est relié à une source de nourriture par un pont à deux branches de longueurs différentes. Quand une fourmi passe par une piste préalablement empruntée par une de ses congénères, elle renforce le marquage. Comme les molécules de phéromone s'évaporent, le marquage ne subsiste que sur les pistes les plus souvent empruntées, qui sont aussi les plus courtes. Ainsi les colonies de fourmis optimisent leur recherche de nourriture.

Les fourmis de Panurge

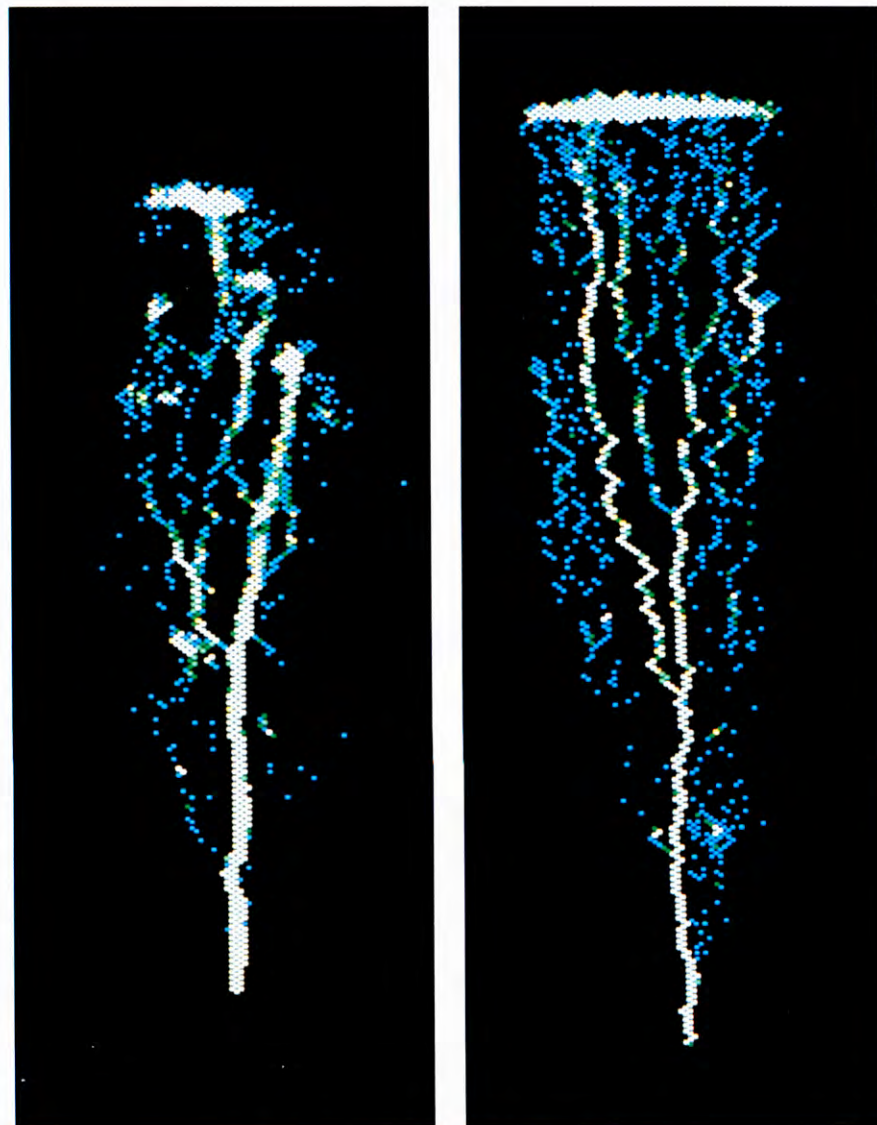
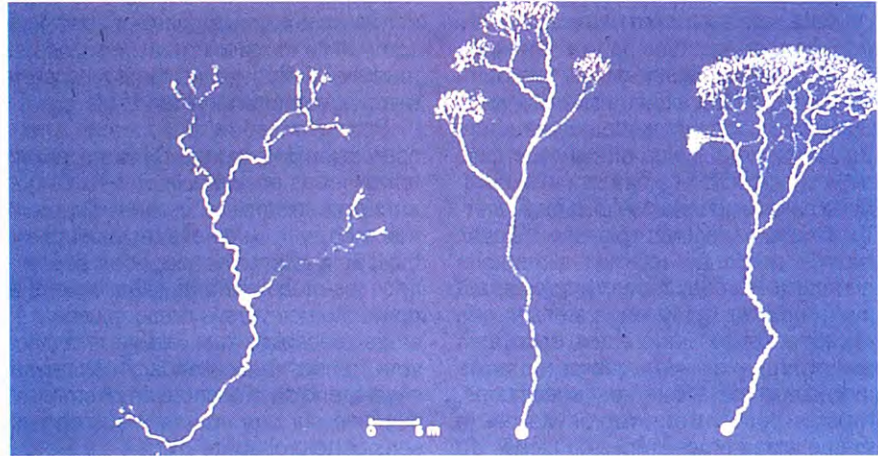
Pour comprendre l'apparition de structures collectives dans une société d'insectes, il est nécessaire de savoir comment interagissent les individus d'une colonie, ce qui impose soit une étude éthologique fine, soit des simulations : à partir d'hypothèses portant à la fois sur le comportement et sur les interactions individuelles, on simule des comportements que l'on compare ensuite aux observations.

L'une des interactions sociales la plus communément observées dans la nature est l'allélomimétisme, c'est-à-dire l'imitation du comportement des congénères voisins : un oiseau s'envole quand il voit d'autres oiseaux s'envoler ; le bâillement se propage dans une assemblée. L'imitation peut être directe (cas des oiseaux) ou indirecte, comme chez les fourmis : celles-ci déposent sur le sol une substance chimique nommée phéromone et laissent ainsi un message aux autres fourmis de la colonie.

L'une des techniques fréquemment utilisées par les fourmis est le recrutement de masse : un individu qui découvre par hasard une source de nourriture informe ses congénères de sa découverte en déposant sur le sol une marque chimique transitoire, lors de son retour vers la colonie. Cette piste guide les autres individus : en allant chercher la nourriture découverte, ceux-ci déposent à leur tour la même phéromone, renforçant le marquage de la piste qui mène du nid à la source de nourriture. Ce type de communication, permettant l'amplification d'une découverte, est analogue à l'autocatalyse en chimie où le produit d'une réaction chimique favorise sa propre synthèse.

Le renforcement du marquage par les phéromones de la piste la plus fréquentée optimise la collecte de nourriture. Les fourmis de la colonie n'exploitent que la source la plus proche, la trace conduisant aux sources éloignées s'évaporant et devenant indécélable (voir la figure 1).

Les fourmis légionnaires vivent quasi aveugles, dans les forêts tropicales humides, en colonies de plusieurs millions d'individus ; leur comportement de groupe est essentiellement fondé sur l'utilisation des pistes chimiques. Chaque jour, un grand nombre d'individus partent chasser, en raids comptant jusqu'à 200 000 individus, qui rapportent au nid quelque 30 000 proies. Ces raids de chasse collective sont structurés spatialement de façon particulière à chaque espèce, indépendamment de toute organisation centralisée : les structures collectives de chasse résultent de la répartition des proies préférentiellement



2. Les chemins empruntés par les diverses espèces de fourmis forment des motifs caractéristiques nommés structures de fourragement. La figure supérieure représente les structures de fourragement de trois espèces de fourmis : *Eciton hamatum* (à gauche), *Eciton rapax* (au centre) et *Eciton burchelli* (à droite). Le cercle blanc indique la position de la colonie. En bas, deux structures de fourragement des fourmis ont été obtenues à l'aide de l'algorithme explicité dans l'article.

chassées et des comportements de suivi de piste. La figure 2 (en haut) représente trois de ces structures de fourragement. L'espèce *Eciton burchelli*, qui se nourrit de petits arthropodes dispersés dans l'environnement, possède une structure de fourragement plus diffuse que celle de l'espèce *Eciton hamatum*, qui se nourrit de colonies d'insectes plus localisées. La structure de fourragement d'*Eciton rapax*, dont le régime alimentaire comporte les deux types de proies, est intermédiaire. On pourrait penser que chacune de ces différentes structures est produite par des comportements individuels différents et spécifiques, mais ils peuvent être reproduits par le même algorithme simple de dépôt de phéromone et de suivi de piste.

Fourmis sur réseau

Pour simuler le comportement de chasse des fourmis, nous considérons que les individus se déplacent d'un nœud à l'autre, sur un réseau à deux dimensions, en déposant de la phéromone sur tout leur chemin. Pour tenir compte des observations éthologiques, nous supposons que le déplacement n'a lieu que dans un sens : à partir du nid tant qu'une source de nourriture n'a pas été trouvée, et de la source vers le nid ensuite. Au début de chaque intervalle de temps, une fourmi peut se déplacer vers le nœud le plus proche, à gauche ou à droite, ou

rester sur place (voir la figure 3). Cette dernière possibilité permet de tenir compte du comportement hésitant des fourmis du front, dans les zones où le marquage phéromonal est faible.

Pour simuler le phénomène, nous opérons en deux temps. Dans un premier temps, nous évaluons la probabilité que la fourmi se déplace vers un des deux nœuds en aval, ou qu'elle reste sur place. Puis, si la fourmi avance, nous déterminons les probabilités qu'elle aille vers le nœud droit ou vers le nœud gauche.

La probabilité que la fourmi avance vers l'un des deux nœuds situés devant elle dépend de la quantité de phéromone déposée sur ces nœuds. Nous choisissons cette probabilité p égale à $0,5 + 0,5 \tanh [((G + D)/100) - 1]$, où \tanh est la fonction tangente hyperbolique (souvent donnée par les langages de programmation et par les calculettes), et D et G les quantités de phéromone présentes sur les nœuds droit et gauche. Nous avons choisi la fonction \tanh afin que, lorsque la concentration totale en phéromone sur les nœuds qui font face à la fourmi est nulle, la probabilité p soit égale à 0,5, et que cette même probabilité soit proche de 1 quand la concentration totale en phéromone est grande.

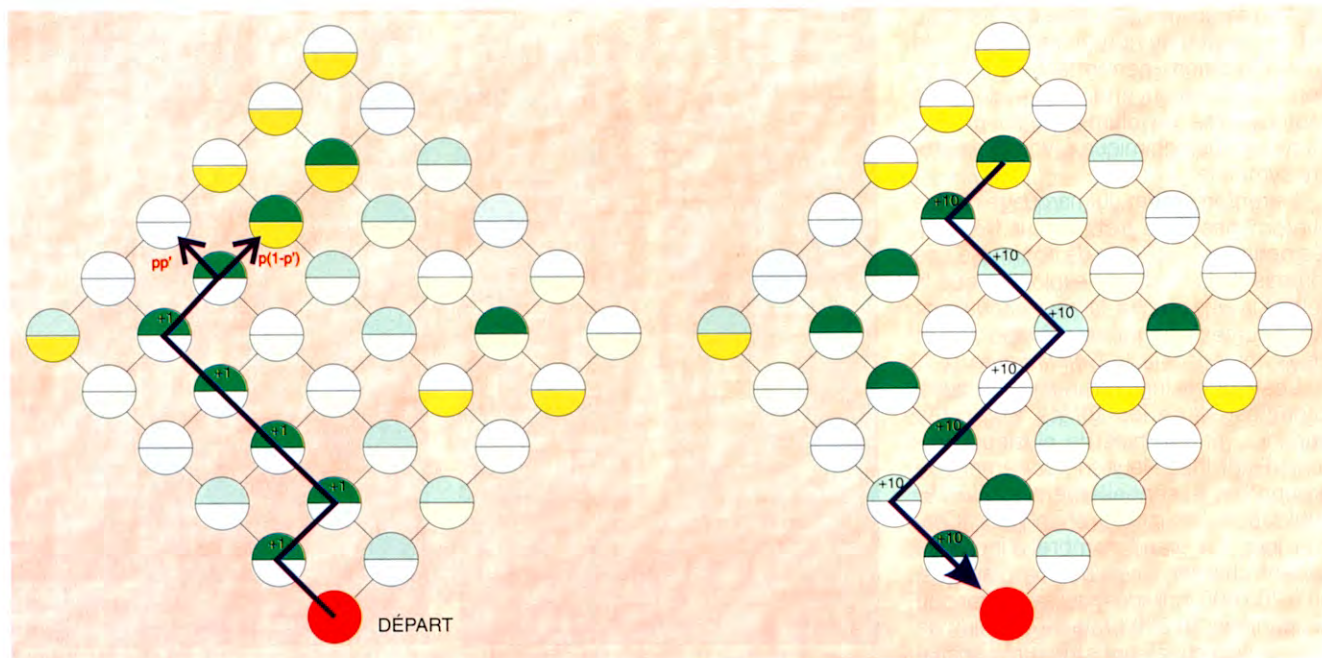
Face à deux nœuds, marqués ou non, comment savoir si la fourmi se déplace? À chaque étape de la simulation, on tire au hasard un nombre compris entre 0 et 1, et on le compare à la probabilité p

précédemment calculée : si le nombre choisi est dans l'intervalle $[0, p]$, la fourmi se déplace ; sinon, elle reste sur place.

Dans le premier cas, vers quel nœud se dirige-t-elle? Naturellement les fourmis se déplacent plutôt vers le nœud le plus marqué. Nous conviendrons que, si les fourmis se déplacent, elles vont vers le nœud gauche avec la probabilité p' égale à $(5 + G)/[(5 + G)^2 + (5 + D)^2]$; la probabilité d'aller vers le nœud droit est alors égale à $1 - p'$.

On n'autorise que 20 fourmis par nœud au maximum, et l'on convient que les fourmis qui avancent vers un nœud en s'éloignant du nid déposent une unité de phéromone sur chaque nœud visité, tant que la quantité d'unités de phéromone y est inférieure à 300. Lorsqu'une fourmi trouve de la nourriture à un nœud, elle revient au nid, en diminuant la quantité de nourriture d'une unité sur ce nœud. Elle se dirige alors en suivant les mêmes règles qu'à l'aller, mais dépose dix unités de phéromone sur chacun des nœuds qu'elle parcourt, tant que la quantité de phéromone déposée y est inférieure à 1 000 unités. Enfin, à chaque intervalle de temps, on admet qu'un trentième de la quantité de phéromone présente s'évapore (on retire cette quantité de chaque nœud).

Les résultats obtenus par cet algorithme sont représentés sur la figure 2 en bas. Chacun des deux cas correspond à une répartition initiale différente de la



3. On simule le comportement de fourragement des fourmis en utilisant un réseau dont les nœuds contiennent des unités de phéromone (en vert) et de nourriture (en jaune) : l'intensité de la couleur est proportionnelle à la quantité de nourriture ou de phéromone présente. Quand elles recherchent la nourriture (à gauche), les four-

mis se déplacent au hasard, avec des probabilités particulières d'avancer dans les deux directions possibles, ou de rester sur place ; elles marquent un peu les pistes qu'elles empruntent (en ajoutant une unité de phéromone). Au retour (à droite), les fourmis déposent sur chaque nœud traversé dix unités de phéromone.

nourriture. Si chaque nœud du réseau a une probabilité 1/2 de contenir une unité de nourriture (voir la figure 2 en bas à droite), la piste centrale bifurque plusieurs fois et forme une structure en delta très semblable à celle d'*Eciton burchelli*. Lorsque les stocks de nourriture sur les nœuds sont plus importants, mais plus rares, on suppose que chaque nœud a une probabilité 1/100 de contenir 400 unités de nourriture : la structure obtenue présente plusieurs sous-deltas, qui matérialisent les zones d'exploration denses. Cette dernière structure ressemble à celle de l'espèce *Eciton rapax*. Avec une probabilité de 1/10 de contenir une unité de la nourriture, la simulation ferait apparaître un front d'exploration auquel conduirait une piste centrale. Cette structure serait analogue à celle que l'on observe pour les fourmis d'Argentine *Iridomyrmex humilis*, lorsqu'elles explorent un territoire inconnu. La simulation du comportement d'*Eciton hamatum* n'a pas été représentée ici, car elle semble nécessiter de très grands réseaux.

Dans chacune des simulations, les fourmis possèdent exactement le même comportement, et les différentes structures collectives obtenues sont dues à l'interaction du flux d'individus qui reviennent d'une source de nourriture avec le flux des individus qui avancent.

Le tri du couvain

Dans l'exemple précédent, la répartition des individus sous la forme d'une structure collective caractéristique de l'espèce répond au besoin de rechercher efficacement la nourriture. Examinons maintenant comment les fourmis organisent l'espace intérieur de leur nid pour optimiser l'efficacité de leur travail. L'observation éthologique montre que les divers éléments du couvain (les œufs, les larves et les cocons ou nymphes) sont triés et regroupés en agrégats par les ouvrières. Ce tri peut être encore plus précis et comporter une ségrégation des larves en plusieurs catégories, selon le stade de développement.

Ce phénomène s'observe expérimentalement lorsque le contenu du nid est versé sur une surface : très vite, les ouvrières regroupent à nouveau le couvain et le trient. Ce tri s'opère sans communication directe entre les ouvrières. Le modèle que nous proposons pour décrire ce processus s'inspire de la réalité biologique et, à lui seul, pourrait expliquer le tri ; cependant il n'est pas exclu que d'autres mécanismes interviennent simultanément.

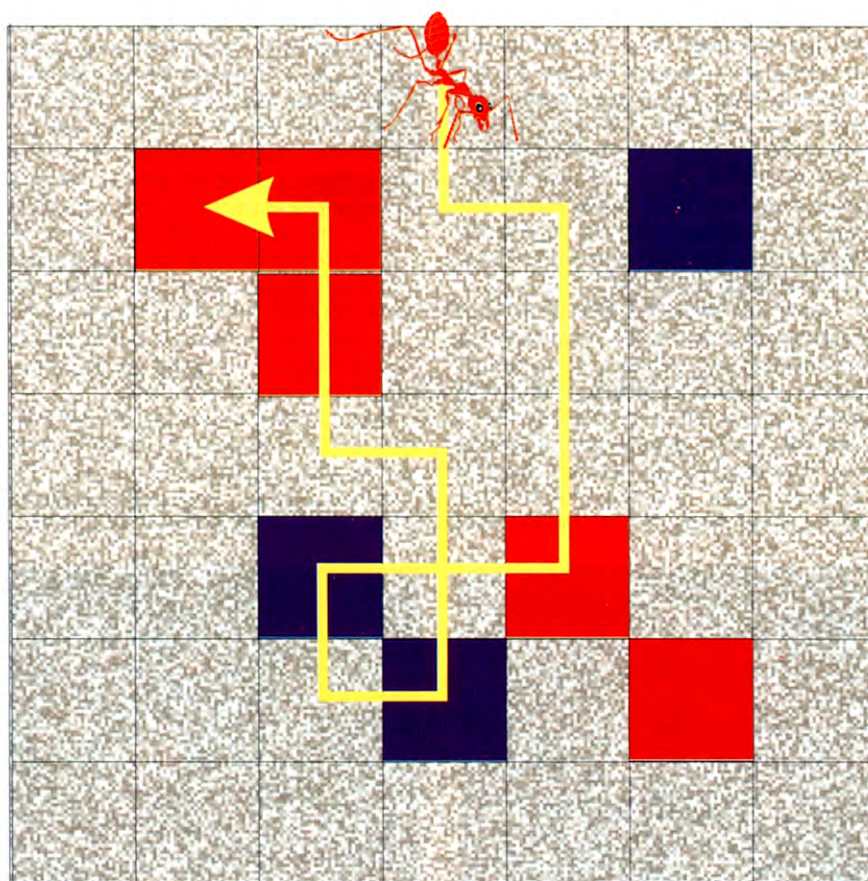
Pour cette seconde simulation, nous supposons encore que les fourmis se déplacent dans un espace à deux dimen-

sions et que deux types d'objets sont mélangés : des briques bleues et des briques rouges (voir la figure 4). Les fourmis se déplacent au hasard sur le réseau. Quand une fourmi rencontre un objet, elle s'en empare avec une probabilité d'autant plus grande que l'objet est isolé : tous les objets isolés sont ainsi rapidement recueillis. D'autre part, lorsqu'une fourmi transporte un objet d'un type donné, elle le dépose avec une probabilité d'autant plus grande qu'il y a plus d'objets de ce type dans le voisinage immédiat : quand, au hasard des dépôts, un petit agrégat d'objets se forme, il grossit à mesure que des fourmis qui transportent le même type d'objets le côtoient.

Initialement les fourmis et les briques

sont dispersées de façon aléatoire sur le réseau. Chaque case du réseau contient au plus une brique ; une seule fourmi à la fois peut s'y trouver. À chaque unité de temps, les fourmis se déplacent aléatoirement d'une case vers le Nord, vers le Sud, vers l'Est ou vers l'Ouest, à condition que la case choisie ne contienne pas déjà une autre fourmi ou une paroi du nid, qui délimite ainsi l'univers du déplacement. L'ordre dans lequel les diverses fourmis interviennent est aléatoire et différent à chaque unité de temps.

Quand une fourmi se déplace sur une case qui contient une brique et qu'elle n'est pas chargée, elle s'empare de la brique avec une probabilité p égale à $(K^+ / (K^+ + f))^2$, où f est la proportion de sites voisins occupés par un objet de



4. Simulation d'un tri par des fourmis. Au départ, les briques bleues et rouges sont dispersées au hasard. Chaque case contient une brique au plus et une seule fourmi peut venir l'occuper. Les fourmis ne peuvent occuper une case que si celle-ci ne contient pas déjà une autre fourmi ou un mur. Quand une fourmi arrive dans une case qui contient une brique, elle décide de la prendre selon la proportion de sites voisins occupés par des briques du même type. Dans le cas représenté ici, la mémoire de la fourmi, qui enregistre les briques précédemment rencontrées, est représentée sous forme d'une barrette, au-dessous du réseau. La probabilité de prendre la brique rouge qui se trouve dans la case juste atteinte est égale (d'après la formule donnée ci-dessus) à $[0,1 / (0,1 + 4/15)]^2$ ou 0,075, si l'on choisit des constantes K^+ et K^- égales toutes deux à 0,1.

même type, et K^+ une constante. Une fourmi peut probablement estimer la valeur de f par la concentration locale en odeur associée à chacun des éléments du couvain, ou bien encore au moyen d'une exploration tactile.

Dans la simulation, nous donnons aux fourmis cette information en leur allouant chacune une mémoire à court terme. La mémorisation biologique est sans doute très différente de celle que nous utilisons, en termes de mécanismes et d'équipements physiologiques, mais elle conduit à des réactions similaires. Cette mémoire permet à la fourmi d'enregistrer les éléments rencontrés au cours de ses déplacements durant les 15 derniers pas de temps.

Par exemple, la mémoire interne d'une fourmi peut contenir la chaîne 00RBOBBRB00BOR0 : au cours des 15 derniers intervalles de temps, la fourmi a rencontré trois briques rouges et cinq briques bleues, toutes les autres cases étant vides. Dans ce cas, la valeur de f est égale à 0,2 (3/15) pour les briques rouges et à 0,333 (5/15) pour les briques bleues. Lorsque la fourmi se déplacera à nouveau, elle oubliera la nature du premier élément de cette chaîne et mémorisera le nouvel objet rencontré.

Quelle que soit sa décision de prendre ou de laisser la brique, la fourmi continue son déplacement aléatoire sur le réseau. Quand elle transporte une brique, elle décide, chaque fois qu'elle parvient à une case vide, si elle y dépose son fardeau ou non. Plus les objets du même type sont nombreux dans l'environnement immédiat, plus la probabilité p' de déposer

l'objet transporté augmente : nous utilisons une loi de probabilité p' égale à $[f/(K^- + f)]^2$, où K^- est une constante. La probabilité augmente avec f , de 0 lorsque f est nul à 1/4 quand f est égal à K^- et plus quand f tend vers 1.

La figure 5 représente trois étapes d'une simulation où des briques bleues, et rouges, dispersées aléatoirement dans l'environnement, sont rapidement regroupées en petits agrégats rouges et bleus qui fusionnent finalement en un petit nombre de tas de chaque couleur. Pour les simulations, on pourra choisir, par exemple, des valeurs de K^+ et K^- toutes deux égales à 0,1.

Fonctionnement social et résolution collective de problèmes

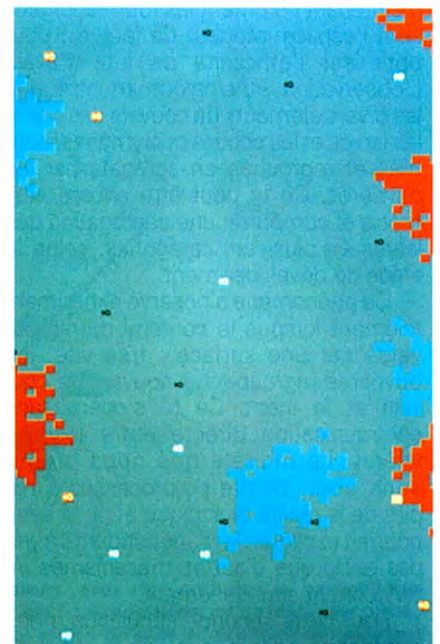
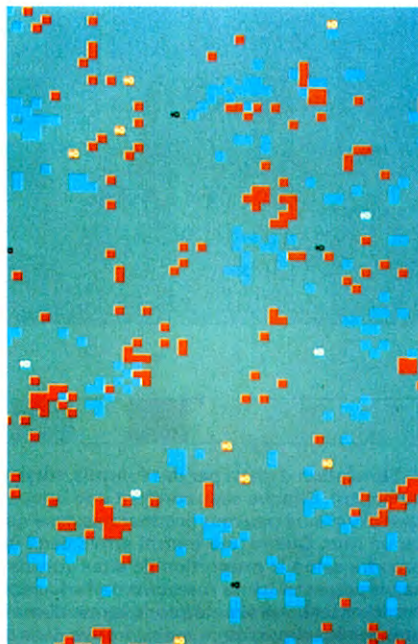
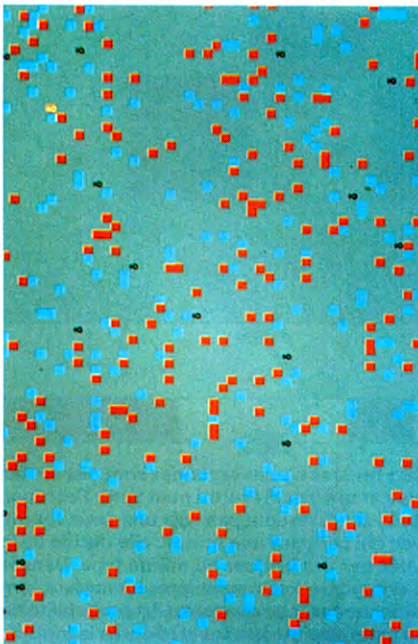
Dans les deux exemples précédemment examinés, la performance collective résulte de l'ensemble des activités individuelles, chaque insecte utilisant les informations fournies par l'activité des autres individus et informant ceux-ci en retour. Depuis quelques années, les ingénieurs s'intéressent à de tels comportements, qui constituent une forme de «résolution collective de problèmes». L'idée est de remplacer des robots très perfectionnés, mais complexes et fragiles, par des armées de petits robots, individuellement simples et collectivement robustes.

Les colonies d'insectes doivent faire face à des situations problématiques, comme le choix du chemin le plus court entre le nid et une source de nourriture ; les structures coopératives qui caractéri-

sent l'activité globale de leurs colonies sont considérées comme des solutions collectives aux problèmes posés. Nos analyses visent à déterminer quelles sont les propriétés (types d'interaction et de programmes comportementaux) qui conditionnent, pour les unités actives, l'efficacité de la résolution, et comment les facteurs d'environnement régissent la forme de la solution qui est finalement adoptée.

Nos études montrent que les colonies convergent vers une solution adaptée au problème, alors que chaque individu n'a accès qu'à une parcelle d'information strictement locale et qu'il ne sait pas résoudre seul le problème résolu par la colonie. Ce mode de résolution répartie s'effectue sans que la colonie utilise de représentation symbolique du territoire où elle opère, contrairement à l'être humain, qui se construit mentalement une carte de son environnement afin de programmer ses recherches.

Pour caractériser le mode de fonctionnement collectif propre aux colonies d'insectes, nous avons examiné ici le concept d'«intelligence en essaim» : il s'agit de la capacité d'un groupe d'agents naturels ou artificiels dont les règles de comportement sont assez simples, fondées sur des informations locales, et qui coordonnent leurs activités afin de réaliser une tâche globale complexe. Les divers types de problèmes qui peuvent être abordés ou résolus par un essaim ont en commun une forte composante spatiale, et ont trait à des situations où l'aléatoire intervient. D'autre part, le



5. Simulation du tri d'un essaim par des fourmis. Des briques bleues et rouges, initialement dispersées, finissent groupées.

caractère très décentralisé de ce type de système accroît leur fiabilité en les rendant très peu sensibles aux pannes individuelles. Ce domaine de recherche n'en est qu'à ses débuts. Il est bon de rappeler que l'étude du plus grand nombre possible de problèmes concrets permettra de faire progresser et, notamment, de répondre à la question de la valeur générique de ce mode de fonctionnement et des paramètres qui conduisent à sa sélection. Au sein du règne animal, trouvera-t-on une convergence de comportement pour des espèces phylogénétiquement très éloignées, mais confrontées à des problèmes semblables? Lorsque le problème posé est la construction de structures très grandes par rapport à la taille des individus, observe-t-on le même comportement chez des espèces différentes?

Cela nous ramène aux questions que nous avons posées en début d'article, telles que celles portant sur les différences sociales-solitaires. On les a peut-être trop opposées, par le passé, et la frontière n'est peut-être pas déterminée par le nombre d'agents, mais par la nature de la tâche et le nombre d'actions à effectuer. Les exemples traités ici nous montrent que le comportement collectif peut résulter d'instructions individuelles relativement simples.

Guy THERAULAZ est chargé de recherche au CNRS (Centre de recherche en biologie du comportement, Toulouse). Eric BONABEAU est ingénieur de recherche au Centre national d'études des télécommunications de Lannion. Simon GOSS est chercheur à l'Université libre de Bruxelles, dans l'unité d'écologie comportementale théorique, dirigée par Jean-Louis DENEUBOURG.

Intelligence collective, sous la direction de E. Bonabeau et G. Theraulaz, Éditions Hermès (à paraître).

J.-L. DENEUBOURG et S. GOSS, *Collective Patterns and Decision Making*, in *Ethology, Ecology and Evolution*, vol. 1, pp. 295-311, 1989.

J.-L. DENEUBOURG, G. THERAULAZ et R. BECKEZRIS, *Swarm Made Architectures*, in *Toward a Practice of Autonomous Systems, Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*, pp.122-133, MIT Press, 1992.

J.-L. DENEUBOURG, S. GOSS, N. FRANKS et J.-M. PASTEELS, *The Blind Leading the Blind : Modeling Chemically Mediated Army ant Raid Patterns*, in *Journal of Insect Behavior*, vol. 2, pp. 719-724, 1989.

Opto 94

14^{es} JOURNÉES EUROPÉENNES DE L'OPTOÉLECTRONIQUE

*Le rendez-vous
de quatre technologies
de pointe*



FIBRES OPTIQUES
LASERS
OPTIQUE
VISUALISATION

CONFÉRENCES EXPOSITION
PARIS - PALAIS DES CONGRÈS

du 26 au 28 avril 1994



A retourner à ESI PUBLICATIONS

Secrétariat Général

Villa Laromiguière

75005 Paris

Tél. : 40.46.62.23 - Fax : 40.46.62.21

Nom Prénom

Société

Adresse

.....

.....

Tél. Fax

désire recevoir de plus amples informations sur OPTO 94