

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 jeux 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 détaillons 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, cress Toulouse





Guy Thérault, CNRS Toulouse

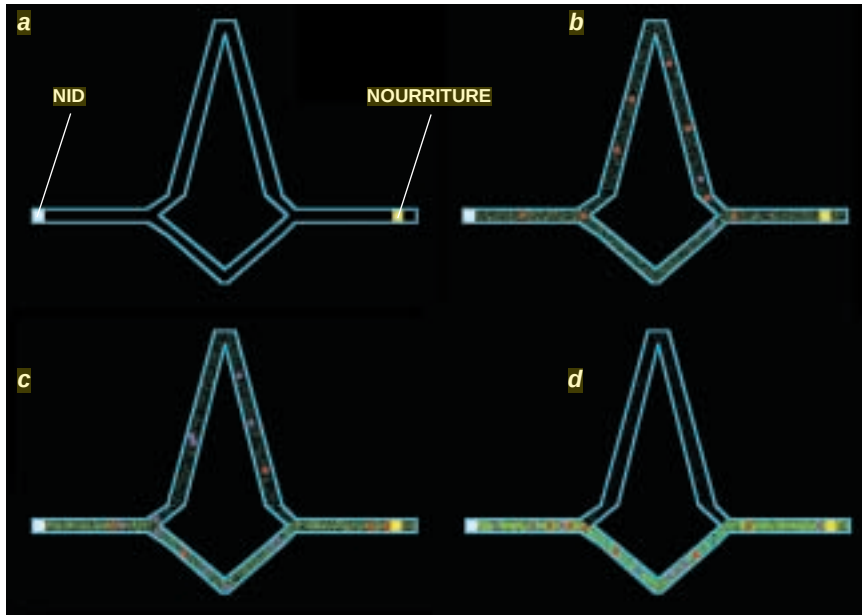
1. LES FOURMIS ŒCOPHYLLES CONSTRUISSENT UN NID grâce à une coopération de tous les individus de la colonie. Pour joindre deux feuilles, des fourmis forment des chaînes vivantes de plus en plus

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*).

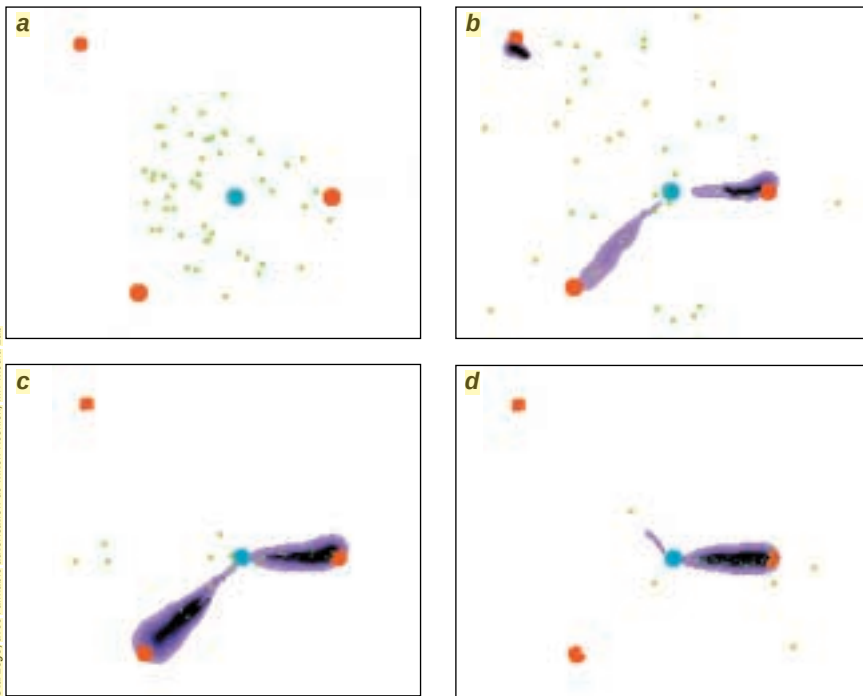
Des fourmis virtuelles

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.



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.

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'évaporaient, 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 reliaient 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