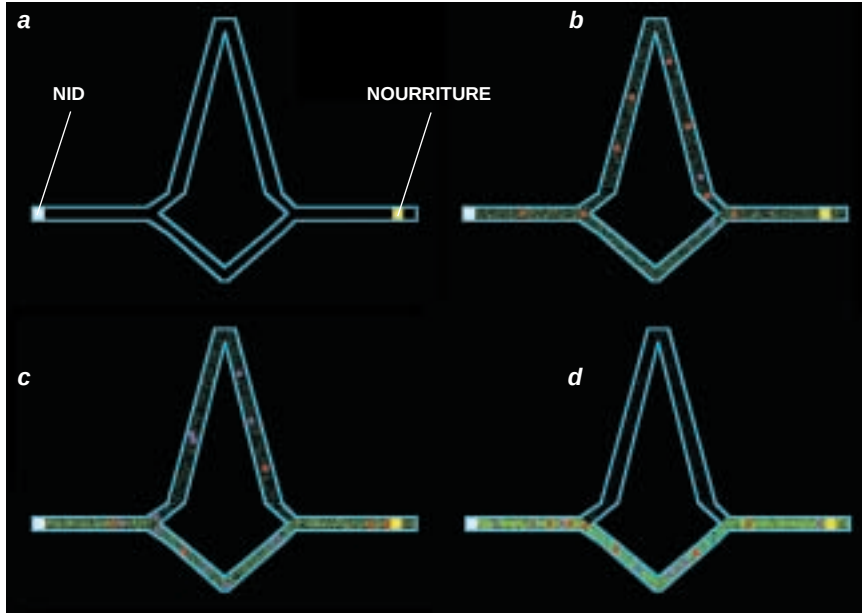


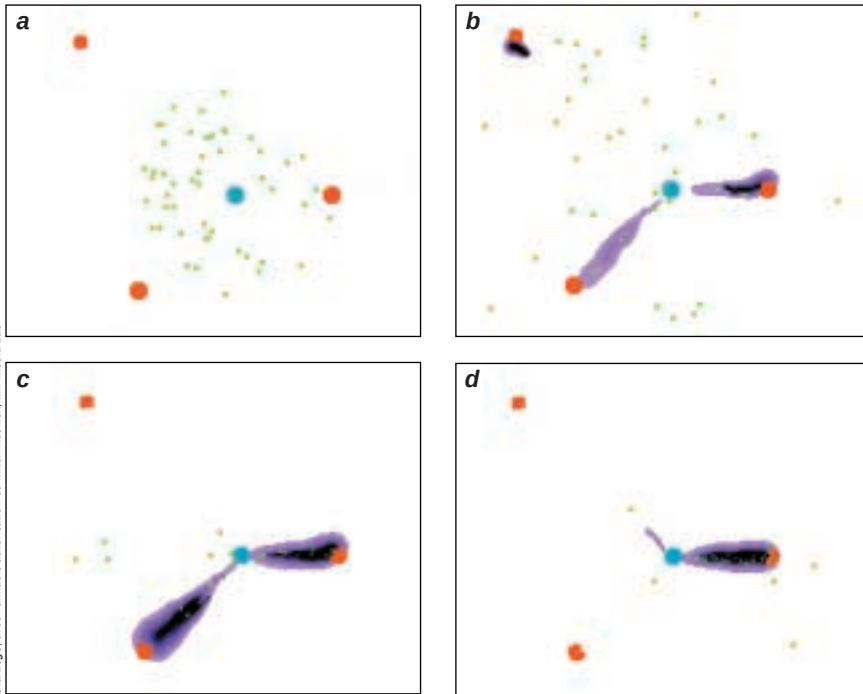
Des fourmis virtuelles

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

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.

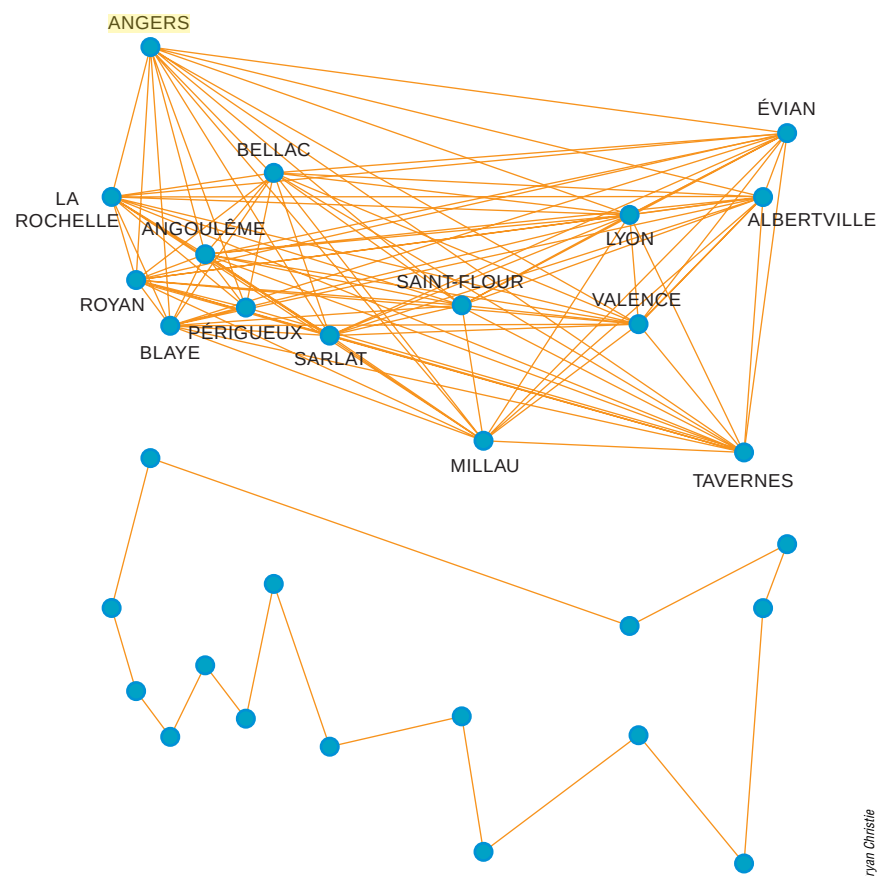
À l'inverse, une liaison longue est parfois indispensable à un trajet court. Cette liaison est initialement moins empruntée, mais, comme dans le cas précédent, elle sera rapidement renforcée après qu'elle aura été choisie.

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. PARMI 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.

Bryan Christie