

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.

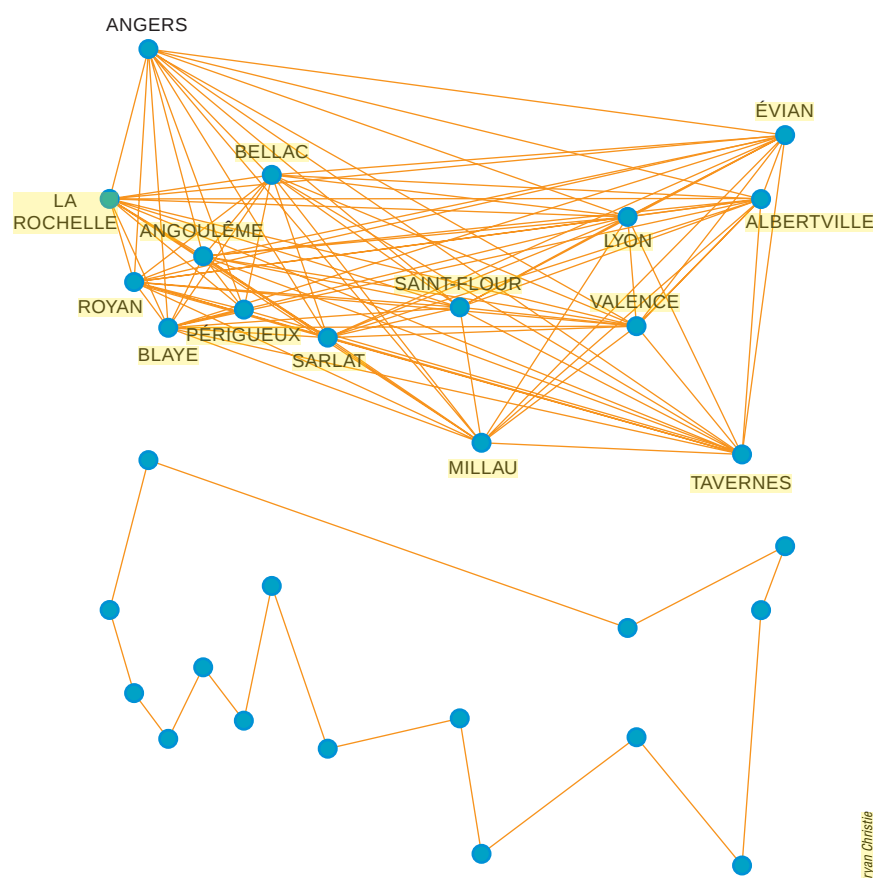
À l'inverse, une liaison longue est parfois indispensable à un trajet court. Cette liaison est initialement moins empruntée, mais, comme dans le cas précédent, elle sera rapidement renforcée après qu'elle aura été choisie.

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

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.

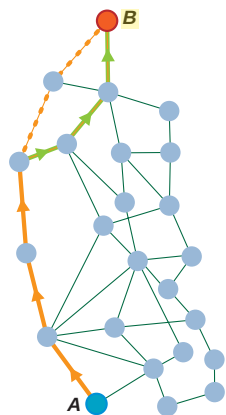


PAUL A. SOUTHERS, CORBIS



Sigma - F. Pichal

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.



Boyan Christie

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.

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 Bruten, 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 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.