

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.

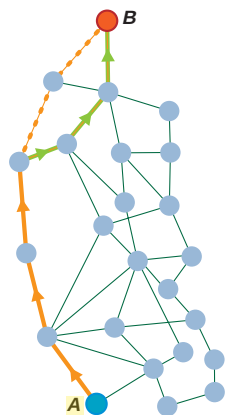


Paul A. Souders, L'Oréal



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.

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

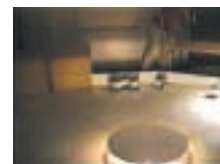
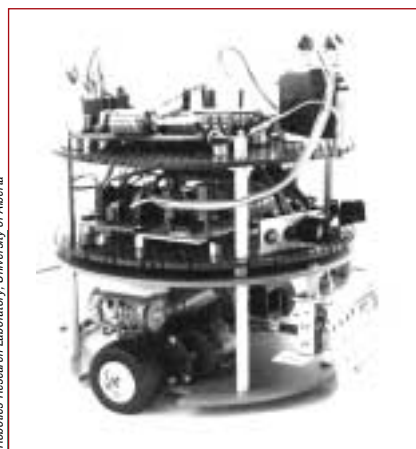
ils se bloquent mutuellement ou lorsque la boîte tourne. Enfin, malgré leurs capacités limitées, les robots amènent la boîte au but (voir la figure 6).

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 pré-pupes (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.



Robotics Research Laboratory, University of Alberta

Guy Théroux, CNRS Toulouse

Robotics 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).