

Collège du Sud, Marcel Délèze

Intelligence collective

L'entomologie nous montre que les sociétés de termites ou de fourmis ont un comportement collectif complexe. Une société peut-elle être plus intelligente que les individus qui la composent ?

Fourmis à la recherche de nourriture

Les 200 000 fourmis d'un nid rapportent quotidiennement 30 000 proies qu'elles vont chercher à une distance moyenne de 45 m. Or, les fourmis sont pratiquement aveugles, ce qui représente une véritable performance.

Elles sélectionnent les sources de nourriture les plus proches et les plus abondantes. Entre le nid et les sources, elles choisissent le chemin le plus court. L'accomplissement de ces tâches est donc optimisé.

Les fourmis ne sont pas organisées hiérarchiquement et ne disposent d'aucun moyen de communication globale. Elles manifestent néanmoins un comportement collectif cohérent qui semble relever d'une intelligence collective.

Modélisation: description du comportement individuel local

Comment expliquer ce comportement collectif par un comportement individuel local ?

La zone de travail des fourmi est découpée en cases dénommées noeuds.

A l'aller

En avançant, la fourmi dépose 1 unité de phéromone par noeud visité;
il s'agit d'un marquage chimique qui consiste en une substance odorante volatile qu'une fourmi perçoit lorsqu'elle se trouve à proximité immédiate;
sur chaque noeud et pour chaque unité de temps, $\frac{1}{30}$ de phéromone s'évapore;
la fourmi avance vers un des noeuds les plus marqués.

Lors d'un retour avec proie

La fourmi dépose 10 unités de phéromone par noeud visité;
la fourmi recule vers un des noeuds les plus marqués.
(En s'approchant du nid, le balisage de la piste s'améliore.)

Lors d'un retour sans proie

En reculant, la fourmi dépose 1 unité de phéromone par noeud visité (comme à l'aller);
la fourmi recule vers un des noeuds les plus marqués.

Les hypothèses précédentes sur le comportement individuel sont-elles suffisantes pour expliquer le comportement collectif de la colonie ? Une simulation informatique permet de le prouver.

Source

«L'Intelligence collective: Comment les fourmis recherchent leur nourriture et organisent leur nid» de Guy Théraulaz, Eric Bonabeau, Simon Goss et Jean-Louis Deneubourg [Pour la Science, N° 198 avril 1994].

Modélisation du tri du couvain

Dans le nid cohabitent divers éléments: des oeufs, des cocons ou nymphes et des larves à divers stades de développement soit 4 à 6 catégories. Or les fourmis trient ces éléments par sortes. Il s'agit là d'une tâche complexe qui semble relever d'une intelligence collective. Comment expliquer ce comportement collectif par un comportement individuel local ?

Le comportement d' unefourmi

Le nid est un ensemble de cases où sont disposés des objets de deux sortes (bleus/rouges). Une case ne peut pas contenir plus d' unobjet déposé sur le sol, ni plus d' unefourmi. Par contre, elle peut contenir un objet et une fourmi; dans ce dernier cas aussi, la fourmi peut être chargée ou non. Sans pouvoir quitter le nid, la fourmi se promène aléatoirement, en se déplaçant d' unecase par unité de temps. Plus précisément, elle détermine, parmi les cases adjacentes, celles qui existent et ne sont pas déjà occupées par une autre fourmi;

il y a au plus 8 destinations possibles parmi lesquelles elle en choisit une au hasard.

Si elle rencontre un objet localement rare, elle s'en saisit.

Si elle transporte un objet qui est fréquent dans son voisinage, elle le dépose; plus précisément:

probabilité qu' unefourmi non chargée se saisisse d' unobjet rencontré

- si la sorte d' objetrencontré est localement rare ($f = 0$), la fourmi s' ensaisit avec une grande probabilité

$$p = \left(\frac{0.1}{0.1+f} \right)^2 = \left(\frac{0.1}{0.1+0} \right)^2 = 100 \% ;$$

- si la sorte d' objetrencontré est localement fréquente ($f = 1$), la fourmi ne s' ensaisit qu' avecune faible probabilité

$$p = \left(\frac{0.1}{0.1+f} \right)^2 = \left(\frac{0.1}{0.1+1} \right)^2 = 0.8 \% ;$$

il se produit une sorte d'évaporation lente des tas constitués; c'est ainsi que les petits tas se défont lentement au profit des grands tas;

probabilité qu' unefourmi chargée dépose sa charge

- si la sorte d' objettransporté est localement fréquente ($f = 1$), la fourmi la dépose avec une grande probabilité

$$p = \left(\frac{f}{0.1+f} \right)^2 = \left(\frac{1}{0.1+1} \right)^2 = 82.6 \% ;$$

- si la sorte d' objettransporté est localement rare ($f = 0$), la fourmi ne la dépose qu' avecune faible probabilité

$$p = \left(\frac{f}{0.1+f} \right)^2 = \left(\frac{0}{0.1+0} \right)^2 = 0 \% .$$

Simulation du tri du couvain

Le but de la simulation est de prouver que les hypothèses concernant le « comportement individuel local » sont suffisantes pour expliquer le « comportement collectif »

Voir le programme

■ Mode d' emploi

1. Choisissez les paramètres de la simulation, c' est-à-diremodifiez, si vous le souhaitez, les valeurs des données qui sont regroupées au début du listing.

2. Exécutez le programme: menu Noyau / Evaluation / Evaluer le cahier
3. Examinez la liste des graphiques.

Travaux pratiques

■ Exercice 1

Questions sur la procédure « pasFourmi » du programme.

- a) Décrivez comment la représentation interne de la fourmi numéro i se modifie durant la phase d' « exploration du voisinage ». Pour ce faire, choisissez d'abord une situation de départ.
- b) Décrivez comment la représentation internes de la fourmi numéro i et la représentation interne des cases du nid se modifient durant la phase de « déplacement ».
- c) Même question pour les phases de « prise en charge d' un objet rencontré » et de « déchargement d' un objet transporté ».

■ Exercice 2

- a) Vaut-il mieux faire travailler peu de fourmis pendant longtemps ou beaucoup de fourmis pendant peu de temps ?
Indication : faites des simulations en faisant varier nF et $T1$ tout en conservant le produit $nF * T1$ constant.
- b) Faites quelques simulations en faisant varier $nCol$, nLn , nB et nR afin de déterminer la quantité de couvain que le programme peut trier efficacement en moins d' une minute.
- c) Faites quelques simulations pour rechercher des valeurs de $nMem$, kP et kM qui produisent un bon effet, si possible meilleur que dans l' exemple donné.

■ Exercice 3-3

Remplissage de la mémoire

Dans le programme ci-joint, on met en mémoire l' état de toutes les cases voisines que la fourmi explore avant de faire mouvement.

Dans l' article « L' intelligence collective », les auteurs préconisent de ne mémoriser que les états des cases effectivement occupées par la fourmi.

Modifiez le programme pour gérer la mémoire selon la procédure décrite dans la figure de la page 93 de l' article « L' intelligence collective ».

■ Exercice 3

Vérifiez, par simulation, que le comportement collectif des fourmis n' est pas altéré par des perturbations telles que la mort de quelques fourmis ou des obstacles qui surgissent dans le milieu.

Indications :

1. Introduisez un quatrième état dénommé « exclu ». Pour l' état d' une fourmi, exclu signifie mort. Pour une case, "exclu" signifie qu' il y a un obstacle dont l' occupation est interdite.

2. Au temps tMorts, on tire au sort nMorts fourmis qu' on sacrifie.
3. Au temps tObst, on tire au sort nObst cases non occupées qu' on déclare interdites.

■ Exercice 4

Ecrivez une version du programme pour des fourmis dépourvues de mémoire.

On compte d' abord le nombre d' objets v de la sorte considérée qui se trouvent dans les 8 cases voisines de la fourmi:

- X

(près des bords du nid, il y aura moins de cases à considérer).

La densité locale f est donnée par $f = \frac{v}{nA}$ où nA désigne le nombre de cases adjacentes.

■ Exercice 5

Comment comparer deux couvains triés ? Ecrivez un sous-programme qui mesure la qualité du tri effectué par un nombre réel de l' intervalle [0; 1].

Indications

1. Pour chaque case, comptez le nombre de voisins v qui sont dans le même état que la case; on obtient un entier v entre 0 et 8.
2. Calculez la somme S de tous les nombres ainsi obtenus.
3. Montrez que, lorsque toutes les cases sont dans le même état, la somme maximale que l' on obtient est $M = ((4 * nCol - 3) * (4 * nLn - 3) - 1) \div 2$.
4. On définit la qualité du tri par $Q = \frac{S}{M}$.

Commentaires

Dans les deux exemples cités dans l' article, les fourmis sont capables

1. de percevoir certains éléments de leur environnement immédiat (sentir une odeur, percevoir la présence d' un congénère, d' un proies ou d' un obstacle, ...);
2. de modifier certains éléments de leur environnement immédiat (déposer une odeur, prendre ou déposer un objet, ...);

la colonie de fourmis est capable

3. de se comporter comme une société cohérente qui effectue collectivement une tâche complexe;
4. de se comporter comme une société stable qui résiste aux perturbations : si l' environnement change ou si des fourmis meurent, le travail continue;
5. de se comporter comme une société capable de s' adapter à certaines modifications du milieu (découvrir sans cesse de nouvelles sources de nourriture, ...).

Par contre, il est important de remarquer que de tels systèmes sont à l' opposé d' une vision anthropomorphique des activités sociales telle que « fixer des objectifs », « décider des moyens », « planifier les actions », « surveiller les travaux », etc.

Ainsi, dans les simulations, les fourmis

1. ne communiquent pas directement entre elles; elles s' influencent de manière indirecte, en modifiant leur milieu; en tous cas, la communication demeure locale;
2. n' ont aucune vision globale de la tâche à accomplir;
3. ne reçoivent aucun ordre d' une autorité coordinatrice;

4. ont un comportement individuel très simple et aléatoire; leur comportement est entièrement régi par le hasard et par leur environnement immédiat.

Défis et perspectives

Ces modèles de simulation d'une société intéressent une large gamme de domaines dans lesquels la recherche est actuellement très active :

1. L'objectif entomologiste
Il s'agit de construire un modèle de société qui rende compte du comportement des insectes sociaux. La simulation permet de prouver que des hypothèses concernant le comportement des individus sont suffisantes pour expliquer le comportement collectif de la colonie.
2. La construction d'ordinateurs massivement parallèles
Comment faire coopérer une quantité de processeurs à une tâche collective complexe ?
3. La construction de robots
Ne peut-on pas remplacer des machines très complexes par une société de robots simples qui coopèrent à une tâche commune ?
4. La compréhension du cerveau
Le cerveau peut-il être considéré comme une société de neurones qui, par leurs interactions, acquiert un comportement collectif cohérent ?
5. La question philosophique de la source de l'intelligence
L'intelligence peut-elle s'expliquer par des processus naturels ou bien doit-on nécessairement faire appel à un principe spirituel (âme, divinité, ...) ?
D'un part, si un chercheur s'attaque au problème de l'émergence de l'intelligence, il doit conjecturer qu'il s'agit d'un phénomène naturel susceptible d'explications scientifiques. Ce postulat a l'avantage de constituer un terrain fertile pour le développement des connaissances.
D'autre part, un argument en faveur du spiritualisme consiste à dire que les corps physiques sont incapables d'auto-organisation. « Mettez une montre en pièces détachées dans une boîte et secouez. Après un certain temps, verrez-vous apparaître une montre qui fonctionne ? ». Il s'ensuit que l'existence de structures complexes nécessite l'existence d'une intelligence organisatrice.

Il n'est évidemment pas possible de donner une réponse définitive aux monumentales interrogations précédentes. Malgré le caractère encore rudimentaire des simulations effectuées, un des objectifs est de prouver que des systèmes ne possédant que des composants simples sont capables de s'auto-organiser et de produire des comportements complexes. Un tel sujet de réflexion est un puissant ferment qui anime la recherche contemporaine.

■ Liens hypertextes

Programme Mathematica auquel se réfère ce document:

<http://www.deleze.name/marcel/mathematica/index.html>

Version pour Windows:

<http://www.deleze.name/marcel/logiciels/index.php>