

# Auto-organisation chez les insectes sociaux

Printemps des Sciences 2003

Pierre de Buyl, Nassiba Tabti et Antoine Wagner

L'auto-organisation est la capacité d'un système à s'organiser à partir d'une multitude d'interactions entre ses individus. Ceux-ci vont coopérer sur base de leur comportement individuel, sans qu'aucun n'ait une connaissance globale du système. Les systèmes auto-organisés se caractérisent par quatre aspects principaux :

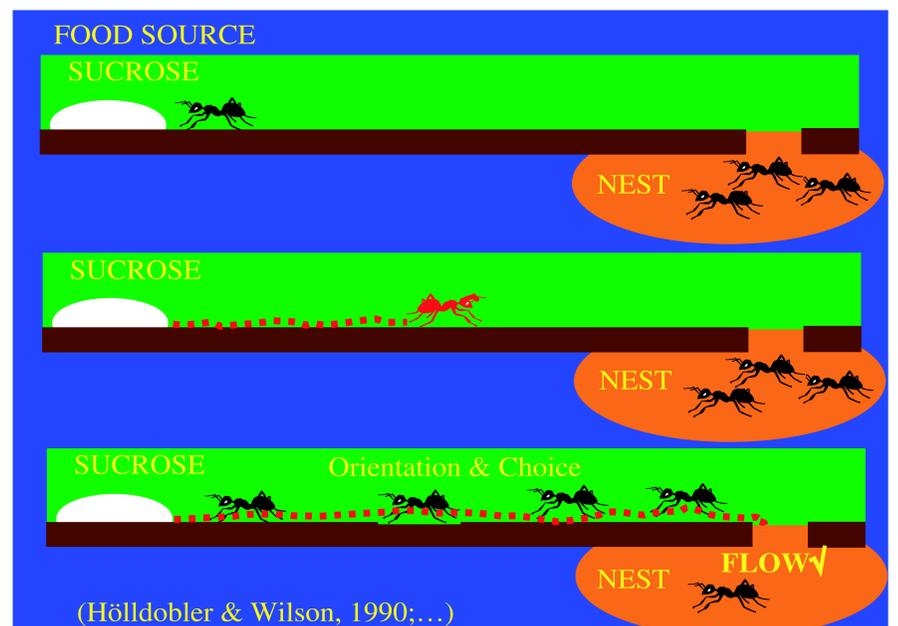
- les flux de matières et/ou d'énergie dans le système,
- la présence de rétroactions positive et négative,
- les interactions non-linéaires entre les unités,
- l'apparition de structures ordonnées.

## Les fourmis



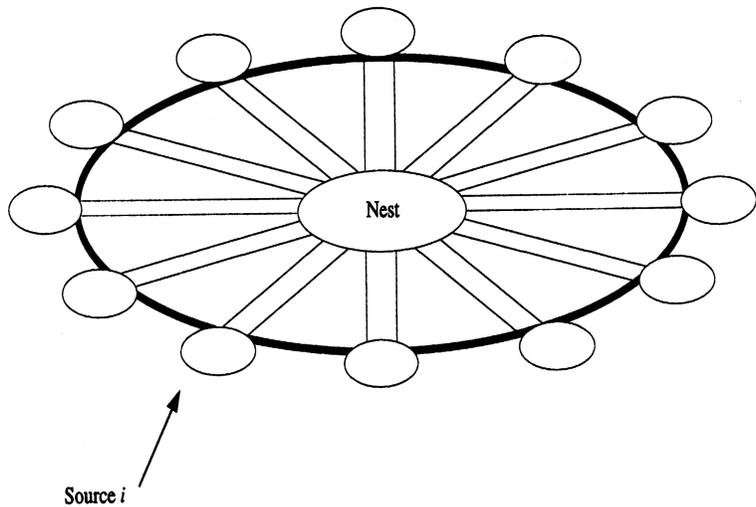
### Recrutement

Lorsqu'elle trouve une source de nourriture, la fourmi dépose de la phéromone en revenant au nid afin de créer une piste qui mènera ses congénères à la source nouvellement découverte.



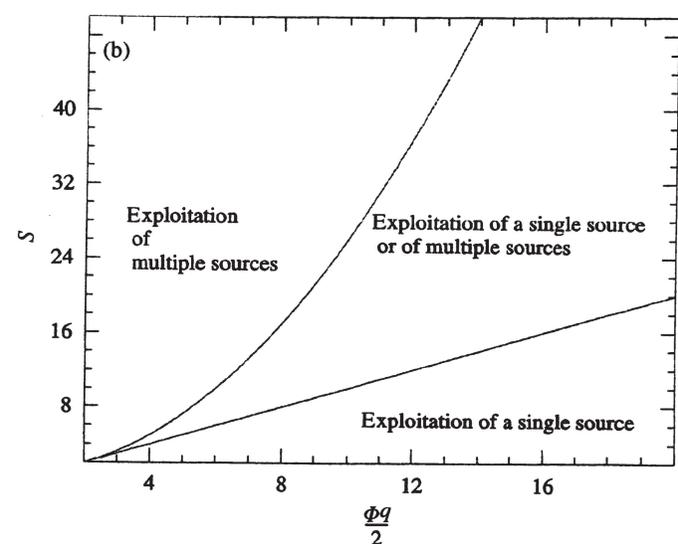
Il est possible d'établir un modèle mathématique exprimant la concentration de phéromone sur la piste  $i$  menant à la source  $S_i$  au cours du temps :

$$\frac{dC_i}{dt} = \Phi q_i \frac{(1 + C_i)^\ell}{\sum_{j=1}^s (1 + C_j)^\ell} - C_i \quad i = 1, \dots, s \quad \ell = 2 \text{ (pour } Lasius niger \text{)}$$



Dans le cas où les sources et les pistes sont identiques ( $q_i = q_j \forall i, j$ ), plusieurs situations sont possibles : l'exploitation ne sera pas forcément toujours homogène même nombre de fourmis sur toutes les sources.) La répartition dépend entre autres du flux d'individus  $\Phi$  qui varie avec la taille de la colonie.

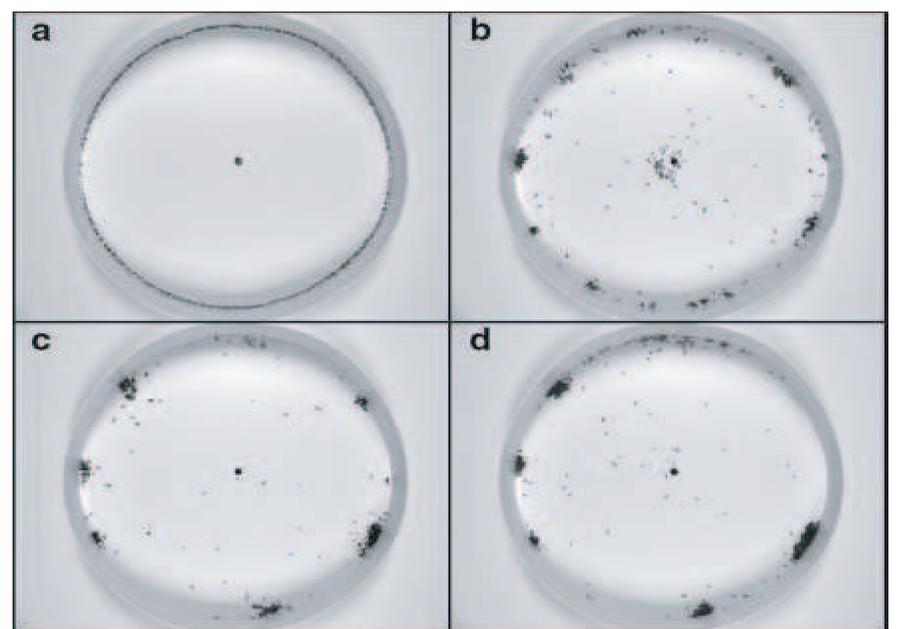
Les choix des modes d'exploitation peuvent être interprétés comme des adaptations de la colonie aux risques de prédateurs, de pertes d'individus sur des pistes trop diffuses, de protection des ouvrières contre d'autres colonies exploitant la même source,...



## Les cimetières

La formation d'agrégats peut être observée chez plusieurs espèces d'insectes sociaux. Les termites, par exemple, sont capables grâce aux phéromones de bâtir des structures complexes (arches, dômes,...) à des intervalles réguliers, sans la moindre régulation centrale.

En ce qui concerne les fourmis, on constate un rassemblement des cadavres qui peut être mis en évidence par une expérience simple : des corps répartis de façon aléatoire autour d'un cercle seront peu à peu réunis pour former plusieurs tas.



On peut approximer la densité de corps  $c(x, t)$  et la densité d'ouvrières portant des corps  $a(x, t)$  par les expressions suivantes :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \Omega(c, a) \quad \frac{\partial a}{\partial t} = -\Omega(c, a) + D \frac{\partial^2 a}{\partial x^2}$$

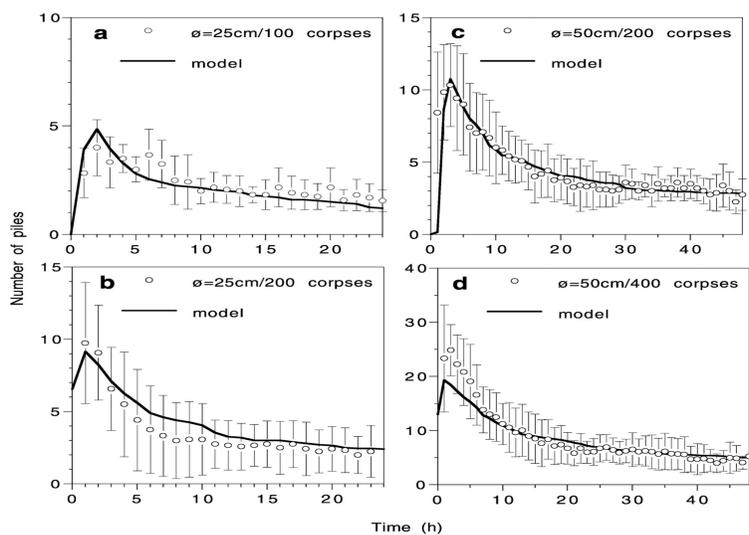
où  $\Omega(c, a)$  est la somme des trois termes suivants :

$$\Omega(c, a) = v \left[ k_d a + \frac{\alpha_1 a \phi_c}{\alpha_2 + \phi_c} - \frac{\alpha_3 \rho c}{\alpha_4 + \phi_c} \right]$$

Le terme  $\phi_c$  introduit une interaction entre corps et ouvrières :

$$\phi_c = \frac{1}{2\Delta} \int_{x-\Delta}^{x+\Delta} c(z) dz$$

L'influence des 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> termes de l'expression de  $\Omega(c, a)$  est la formation d'un petit nombre de piles de grandes tailles.



Les courbes obtenues à partir du modèle correspondent bien aux résultats expérimentaux. Sur ce graphique on a représenté l'évolution du nombre de tas au cours du temps pour différentes conditions initiales.

Ce phénomène de formation d'agrégats est un mécanisme "LALI" (local activation – long-range inhibition) : puisqu'une ouvrière a tendance à ajouter des corps aux grandes piles (terme  $\phi_c$ ), l'augmentation de taille sera localement amplifiée ; mais elle sera freinée par le manque de corps dans les environs de la pile.

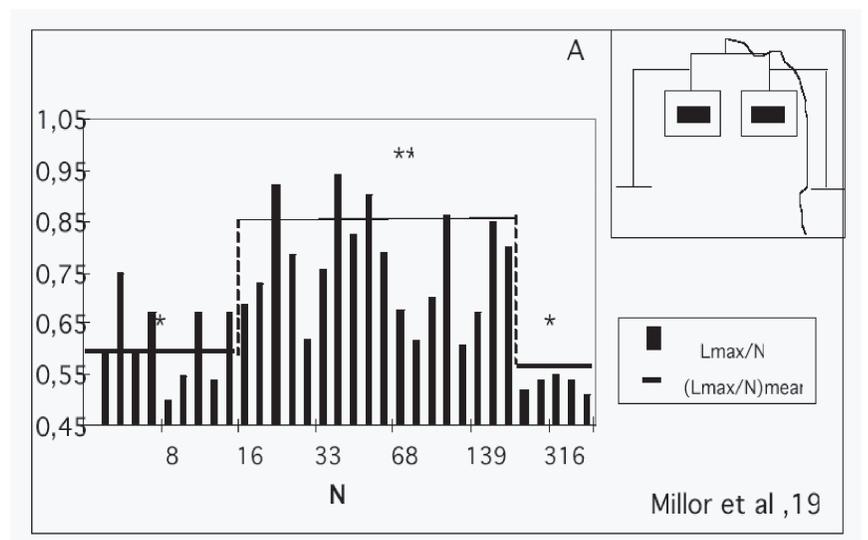
## Les abeilles



### La défense

Lors de la piqûre, l'aiguillon restant sur l'intrus émet une phéromone d'alarme qui augmente la probabilité qu'il soit piqué. Une expérience présentant deux leurres identiques à des ruches a permis d'observer la répartition des piqûres sur les cibles.

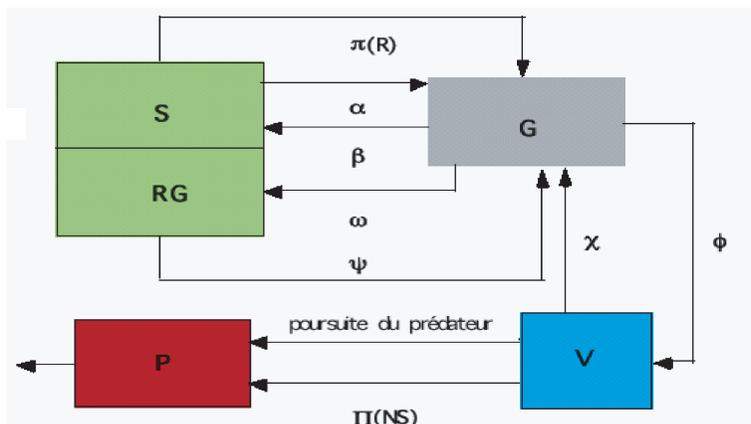
La répartition des piqûres se fait d'abord de manière aléatoire (même nombre à gauche et à droite) ; on observe ensuite un phénomène de concentration sur un des leurres, pour aboutir enfin à une situation de symétrie.



Sous certaines hypothèses, on peut exprimer la probabilité  $P_i$  pour chaque abeille de piquer l'une des deux cibles :

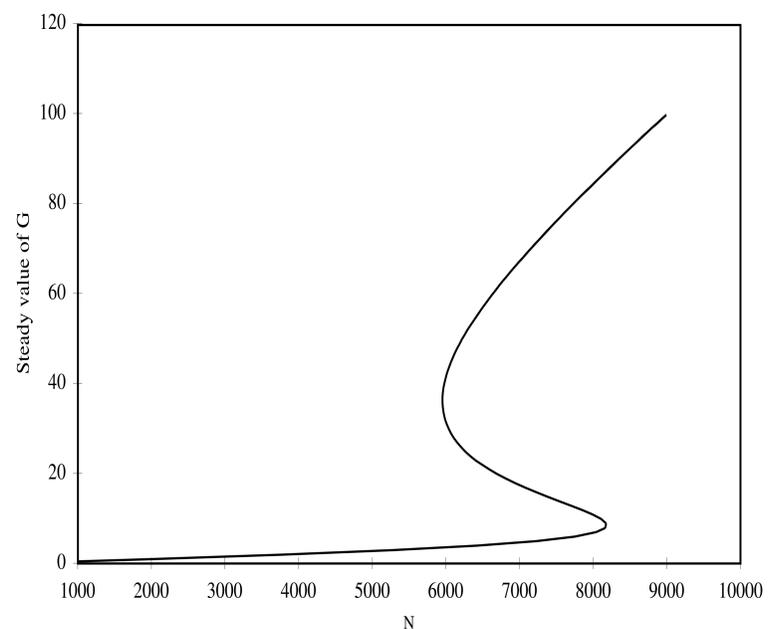
$$P_i = \frac{\gamma_i \left( a + b \left[ \frac{N_i}{1+(N_i/\delta)} \right] \right)^2}{\left( a' + \left[ \frac{N_i}{1+(N_i/\delta)} \right]^2 \right)^2} \quad N_1 + N_2 = N; \quad i = 1, 2$$

Un modèle a été conçu afin de représenter la dynamique de défense dans son ensemble, depuis le recrutement dans le nid jusqu'à l'attaque de l'intrus :

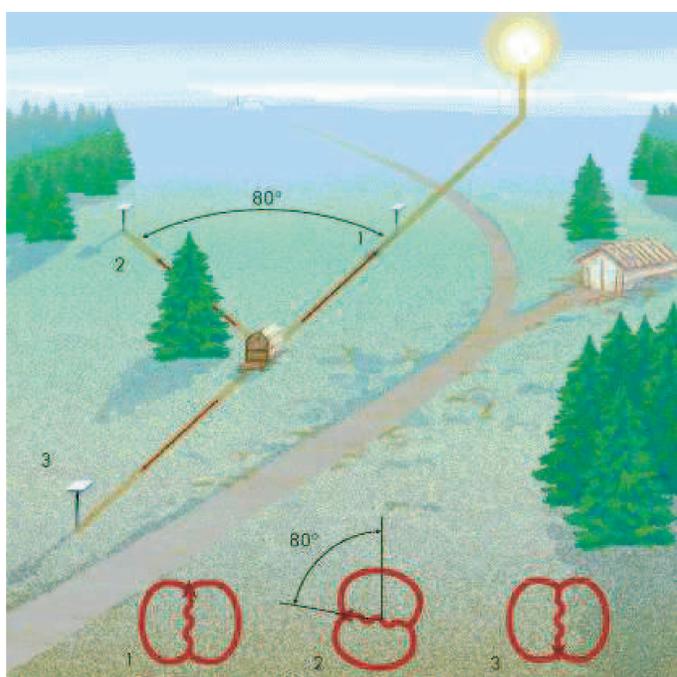


$$\begin{aligned} dG/dt &= \alpha S - \beta G - \bar{\omega} G + \psi RG + \pi S + \chi V - \phi G \\ dRG/dt &= \bar{\omega} G - \psi RG \\ dS/dt &= \beta G - \alpha S - \pi S \\ dV/dt &= \phi G - \chi V - \Pi V \\ dNS/dt &= \Pi(NS)V \\ N &= G + RG + S + V + NS \end{aligned}$$

La résolution des équations différentielles permet de représenter l'évolution des états stationnaires pour le nombre de gardes en vol ou à l'entrée de la ruche, par rapport au nombre total d'individus.



## Le recrutement alimentaire et la danse



Une abeille ayant localisé une source de nectar effectuera une danse qui permettra d'attirer ses congénères. Le type de danse dépend de la distance, de la direction, de l'abondance, et de la nature de la source.

## Cerveau ?

On peut modéliser le comportement des fourmis et des abeilles assez simplement. On considère que les insectes agissent aléatoirement, mais en respectant des probabilités dépendant de leur environnement immédiat : les odeurs, le toucher, ... C'est ce qui permet de reproduire le comportement d'une colonie ou d'une ruche sur ordinateur. Cette confirmation des modèles va permettre de sortir du domaine des animaux :

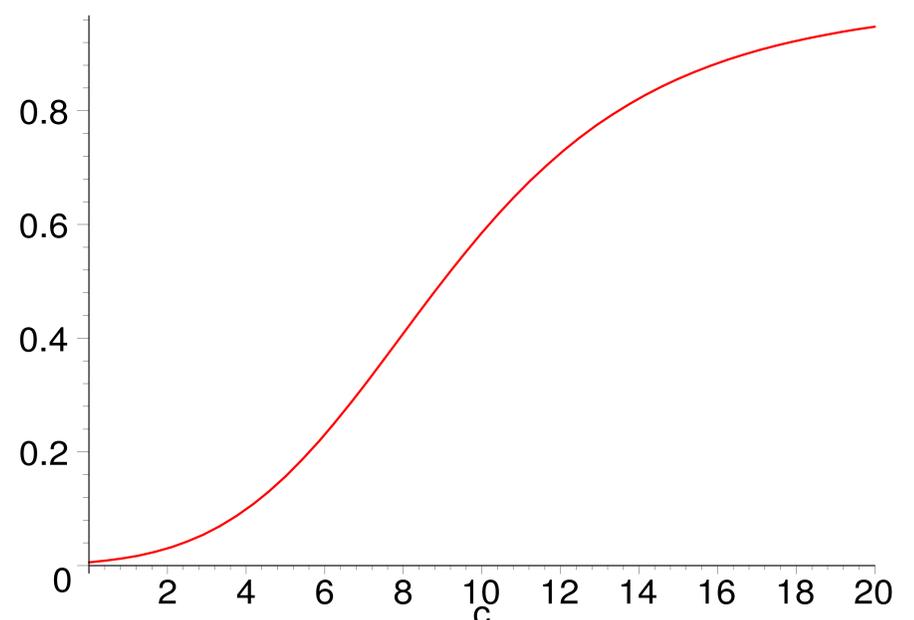
- transport : mécanismes d'amplification
- intelligence artificielle : optimisation du trajet
- robotique : tri d'objets (cf cimetièrre.)

Cette dernière application peut être illustrée par l'expérience des robots qui trient des objets. On dispose des objets dans une arène et on laisse un groupe de robots travailler. Leur comportement est simple : ils ont une probabilité de prendre un objet  $(\frac{k^+}{k^++f})^2$ , celle de le lâcher est  $(\frac{f}{k^-+f})^2$  où  $k^+$  et  $k^-$  sont des constantes et  $f$  représente le nombre d'objets dans l'entourage proche du robot. Le résultat final est que les objets sont agglomérés en un seul tas.

## Modèle à seuil

$$F_i = \frac{(c_i + k)^l}{\sum_j (c_j + k)^l}$$

Cette fonction est très importante car elle permet de représenter beaucoup de situations biologiques à effet d'amplification positive. Elle se retrouve dans tous les exemples cités ici.



Deux choses sont à noter dans cette fonction :

- elle explose au delà d'un certain seuil
- elle sature, une probabilité ne pouvant dépasser 1

## Simulation de Monte Carlo

Une simulation de Monte Carlo est une méthode de résolution numérique permettant de résoudre de nombreux problèmes par l'utilisation de variables aléatoires. On utilise ce type de simulation afin de vérifier les comportements prédits par une théorie pour les confronter aux résultats expérimentaux. Un événement avec une probabilité  $p$  se produira lorsque le nombre aléatoire généré renvoie un résultat  $r$  avec  $r \geq p$ .

C'est donc une résolution numérique du problème dans laquelle il est impossible de prédire le résultat d'une expérience, contrairement à ce qui se fait grâce aux équations différentielles. Il existe des programmes de simulation d'exploitation de sources de nourriture pour les fourmis, par exemple.