

MORPHOGENÈSE DES RÉSEAUX DE GALERIES CHEZ LA FOURMI *MESSOR SANCTA*

Jérôme BUHL¹, Jean-Louis DENEUBOURG²,
Anne GRIMAL¹ & Guy THERAULAZ¹

¹ Laboratoire d'Ethologie et Cognition Animale, CNRS - FRE 2382, Université Paul Sabatier, 118
route de Narbonne, 31062 Toulouse Cédex, France

² CENOLI, CP 231, Université Libre de Bruxelles, Boulevard du Triomphe, 1050 Bruxelles, Belgique

Résumé: La morphogenèse des réseaux de galeries a été étudiée chez la fourmi *Messor sancta* à deux niveaux d'observation. Au niveau global nous avons caractérisé la dynamique de croissance des réseaux; au niveau individuel nous avons recherché les caractéristiques du comportement de creusement et déterminé le rôle des interactions entre fourmis. Le lien existant entre ces deux niveaux d'observation a ensuite été étudié au moyen d'un modèle incorporant tous les paramètres des comportements individuels mesurés expérimentalement. Cette étude montre que la croissance des réseaux de galeries est le résultat d'un processus auto-organisé.

Mots-clés: *Messor sancta*, réseaux de galeries, auto-organisation, modélisation

Abstract: **Morphogenesis of galleries networks in the ant *Messor sancta*.**

We studied the processes that take place during the morphogenesis of galleries networks in the ant *Messor sancta* at two levels of description : (1) At the global level, we analyzed the growth dynamics of the networks. (2) At the individual level the digging behaviour and the consequences of ants' interactions were quantified. We incorporate both the qualitative and quantitative behavioural rules that workers employ during building into a model that helped us to understand the link that exists between individual and collective behaviour. This study shows that subterranean galleries networks result from a self-organized process.

Key words: *Messor sancta*, subterranean galleries networks, self-organization, multi-agent modeling

INTRODUCTION

Toute espèce sociale crée ou utilise des structures en réseaux. Les exemples les plus spectaculaires de telles structures sont les réseaux construits chez les insectes sociaux (Bonabeau et coll., 1997 ; Camazine et coll., 2001). Le rapport d'échelle entre les individus et les structures qu'ils produisent y est tellement grand que chaque individu ne dispose que d'une perception très locale du processus qui conduit à la production de la structure. Dans le cas de la construction d'un réseau, celle-ci progresse simultanément sur plusieurs sites distincts ; au niveau de chacun de ces sites un ensemble d'individus coopère pour produire une structure qui n'est pas la simple répétition d'un même motif. Ces phénomènes soulèvent depuis longtemps de nombreuses questions : comment les insectes sont-ils capables de coordonner leur activité ? Quel lien existe-t-il entre les comportements et les interactions au niveau individuel et la forme globale produite ? Existe-t-il des principes généraux à l'œuvre dans la production des réseaux que l'on observe à différentes échelles du vivant ?

Dans cette étude, notre objectif était, d'une part, à un niveau global, de caractériser la dynamique de croissance de ces réseaux, d'autre part d'identifier les mécanismes impliqués par la quantification des comportements individuels impliqués et leur implémentation dans un modèle informatique de type multi-agents.

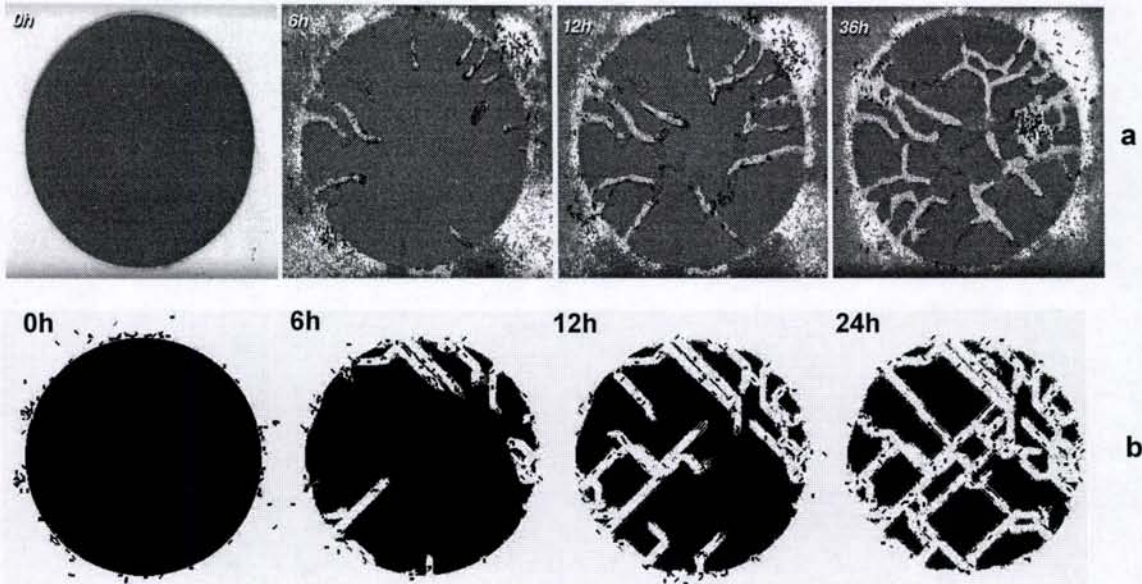


Figure 1. Exemple de séquence de creusement expérimentale (a) et simulée (b) avec 200 fourmis.

Example of tunneling pattern in an experiment (a) and in a simulation (b) with 200 ants.

MATERIEL ET METHODES

Le dispositif expérimental se compose d'un disque de sable humidifié (diamètre : 20 cm, épaisseur : 5mm) recouvert d'une vitre. L'espace est clos par une arène circulaire. Les fourmis sont dispersées aléatoirement autour du disque. On utilise des effectifs de 50, 100 et 200 fourmis. Cinq expériences d'une durée de 3 jours sont réalisées par classe d'effectif. Le dispositif est filmé (Fig.1) à intervalles réguliers (2 s toutes les 20 minutes) avec une caméra numérique permettant, après analyse des images, l'estimation du volume excavé, de la proportion de fourmis actives et inactives et de la longueur totale du réseau de galerie sur chaque image. Des expériences utilisant le même dispositif et d'une durée de 3 heures ont été réalisées dans le but de quantifier le comportement individuel de creusement des fourmis

RESULTATS

Dynamique de croissance des réseaux

La dynamique de creusement (Fig.2) est de type logistique (modèle de Hill : $r^2 > 0,9$). Elle comporte une phase de croissance exponentielle suivie d'une phase de saturation conduisant à l'arrêt de l'activité. Le volume final excavé obtenu est proportionnel au nombre de fourmis (Tableau 1).

Effectif	Volume total Excavé (cm ³)	Poids excavé (mg/fourmi /h)	Longueur du réseau (cm)	Nombre de galeries
50	25,25	10,4	79,8	23,6
100	37,49	7,7	115,6	40,2
200	60,9	6,4	199,3	85,4

Tableau 1. Quelques caractéristiques des réseaux de galeries obtenus.
Some characteristics of the galleries networks.

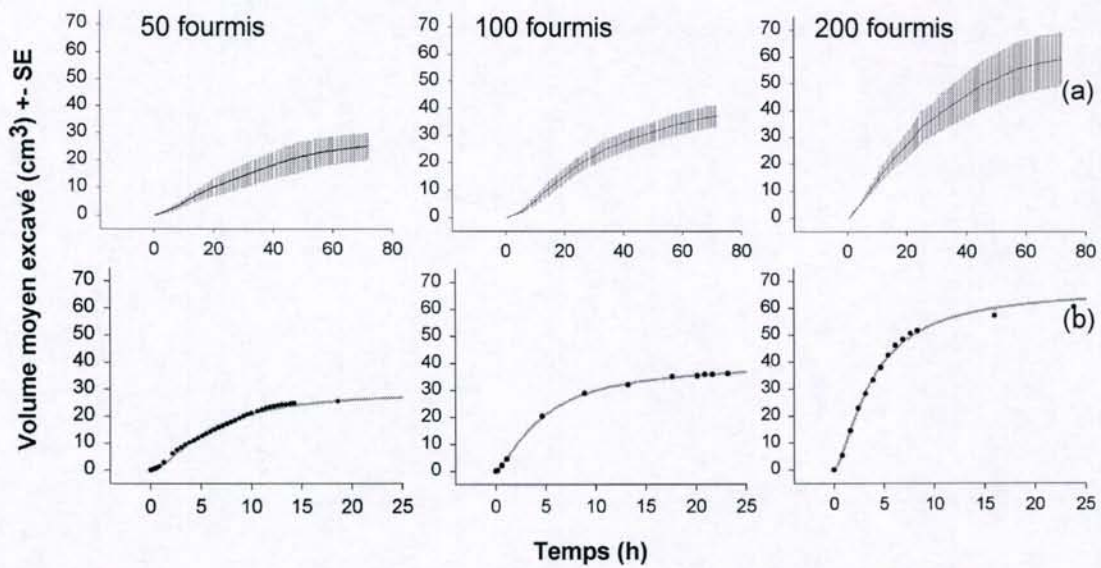


Figure 2. *Dynamiques creusement expérimentales (a) et simulées (b)*
Experimental (a) and simulated (b) tunneling dynamics

Comportement individuel

Des courbes de survie (Fig.3) ont permis de déterminer les probabilités individuelles d'exécuter 3 types d'actions : quitter le bord du disque de sable, creuser le bord du disque de sable et déposer une boulette de sable. Ces probabilités sont constantes au cours du temps. Les probabilités de creuser une anfractuosité dans le sable, de ramasser une boulette ont été calculées à partir de la proportion d'individus réalisant ces différentes actions (voir aussi Fig. 4).

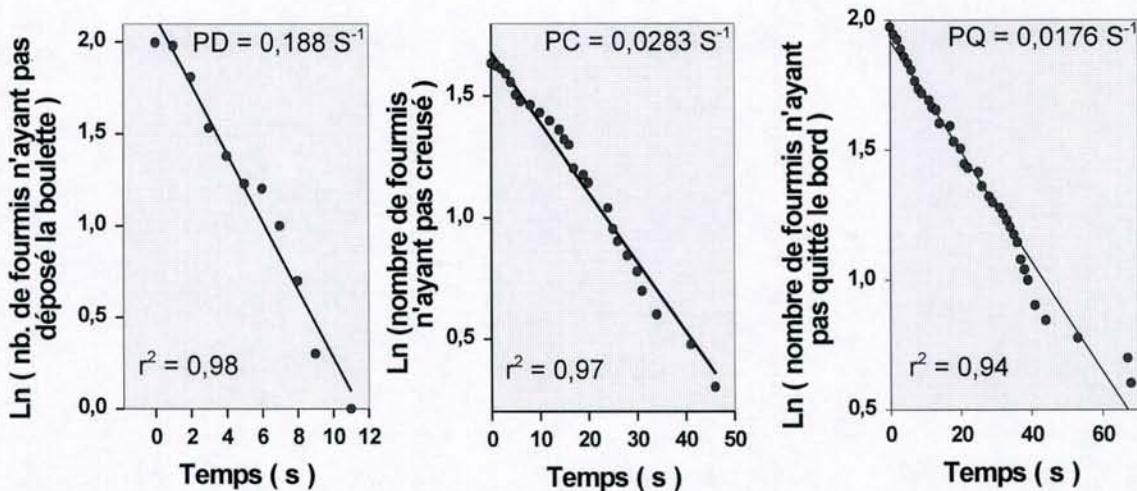


Figure 3. *Détermination de probabilités de réaliser une action.*
Leurs valeurs de probabilités indiquées correspondent à la pente de la droite de régression linéaire appliquée aux courbes de survie.

Determination of probabilities to execute an action.
Probabilities values correspond to the slope of the linear regression model applied to the survey curves

Modélisation

Le modèle a été testé sous la forme d'une simulation multi-agents en 2 dimensions dans laquelle sont implémentées les propriétés des comportements individuels mesurés expérimentalement (Fig. 4). Dans le modèle, chaque fourmi peut se trouver dans trois états différents. Elle peut passer d'un état à un autre selon les probabilités de réaliser une action mesurées expérimentalement. Lorsqu'une fourmi creuse, elle marque le site au moyen d'une phéromone, et lorsqu'elle transporte une boulette de sable, elle marque son trajet par une piste en gradient. Ces phéromones sont soumises à des phénomènes d'évaporation et de diffusion. Seule la prise en compte de ces marquages a permis de reproduire la croissance des réseaux de galeries. Ces paramètres étant difficiles à quantifier expérimentalement, ceux-ci ont été déterminés par une exploration des valeurs des paramètres du modèle.

La dynamique de croissance obtenue est de type logistique (Fig. 2) et la phase de saturation se produit à des valeurs de volumes de galeries à celles obtenues dans les expériences. Le phénomène est cependant beaucoup plus rapide, ce qui pourrait s'expliquer par l'absence d'implémentation d'agrégation des individus, alors que celle-ci atteint 85,3% (SD ± 12.6) à la fin des expériences.

Probabilités

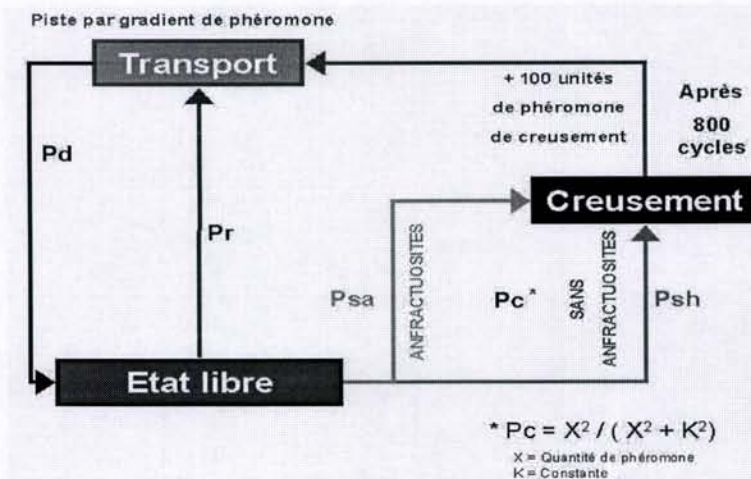
Pd: déposer une boulette	0,188 s ⁻¹
Pr: ramasser une boulette	0,102 / contact
Ps : creuser en l'absence de phéromone	
-Psa : creuser en présence d'anfractuosités	0,054 / contact
-Psh : creuser en absence d'anfractuosités	2,83.10 ⁻² s ⁻¹
Pc : creuser en présence de phéromone	
$Pc = X^2 / (X^2 + K^2)$	
-en présence d'anfractuosités	K = 200
-en absence d'anfractuosités	K = 3500



Figure 4.

Représentation schématique du modèle, paramètres du comportement individuel et exemple de réseau de creusement obtenu par simulation (100 fourmis, 3 jours).

Schematic representation of the model, individual behavior parameters and example of simulated galleries network (100 ants, 3 days).



DISCUSSION

La dynamique de creusement est de type logistique. Elle comporte une phase de croissance exponentielle reposant sur des mécanismes de type feed-back positif et résulte d'un marquage du front de creusement et de l'utilisation par les fourmis de pistes de phéromones. Elle est suivie par une phase de saturation reposant sur des mécanismes

feed-back négatif qui ont pour conséquence l'arrêt du creusement lorsque le volume du réseau atteint une valeur critique proportionnelle à la taille de la population. Cette phase a pu être reproduite dans le modèle même en l'absence d'implémentation de processus d'agrégation. Ce mécanisme de régulation de la taille du réseau pourrait impliquer à la fois la baisse de la densité des individus et un processus d'agrégation des fourmis au cours du temps.

Dans le règne animal, de nombreux types de réseaux semblent suivre les mêmes propriétés de croissance, chez les insectes, où l'on a déjà pu montrer que les réseaux de fourragement étaient le résultat de processus auto-organisés (Franks et coll., 1991), mais aussi chez le rat-taupe (Davies et Jarvis, 1986), qui construit réseaux de galeries des complexes.

RÉFÉRENCES

- Bonabeau, E., G. Theraulaz, J.L. Deneubourg, S. Aron and S. Camazine, 1997. Self-organization in social insects. *TREE 12*: 188-193.
- Camazine, S., J.L. Deneubourg, N. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz and E. Bonabeau, 2001. *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton University Press.
- Davies K.C. and J.U.M. Jarvis, 1986. The burrow systems and burrowing dynamics of the mole rats *Bathyergus suillus* and *Cryptomys hottentotus* in the fynbos of the south-western Cape, South Africa. *J. Zool., Lond.* 209: 125-147
- Franks, N.R., N. Gomez, S. Goss and J.L. Deneubourg, 1991. The blind leading the blind in army ant raid patterns: testing a model of self-organization. *J. Insect Behav.* 4: 583-607.