

# Matis MIS7

## Chap. 5 : Algorithmes fournis d'auto-organisation

**Cyrille Bertelle**

LITIS  
Laboratoire d'Informatique,  
du Traitement de l'Information et des Systèmes  
**Université du Havre**

**Master 2 Math-Info - Matis**



# Plan

## Références bibliographiques

- E. Bonabeau et G. Theraulaz coord. *“Intelligence collective”*, Hermès, 1994.
- G. Theraulaz et F. Spitz *“auto-organisation et comportement”*, Hermès, 1997.
- E. Bonabeau, M. Dorigo et G. Theraulaz *“Swarm intelligence : from natural to artificial systems”*, Oxford University Press, 1999.

# 1 Modèles de fonctionnement des sociétés d'insectes

- Les insectes sociaux : modèles naturels des systèmes collectifs intelligents décentralisés (fourmis, abeilles, termites, ...)
- Génèse d'une intelligence collective ?
  - entités constitutives aux comportements corrélés / but commun ... superorganisme ?
  - capacités d'adaptabilités et d'apprentissage du comportement global.
- Modèle biologique : intérêt
  - fiabilité, flexibilité, robustesse ... permettant de résoudre des problèmes évoluant et dynamiques
  - Contrôle central inaccessible ... approche distribuée à base d'agents + réactifs que cognitifs.

## 2 Formalisation du fonctionnement social et de son auto-organisation

L'auto-organisation caractérise les processus d'émergence de structures à un niveau collectif, à partir de la multitude des interactions entre individus.

Exemple : mécanisme de recrutement alimentaire chez les fourmis qui consiste à rassembler des individus par dépôt et suivis de traces (phéromones) vers des sources de nourritures.

## Mécanismes de l'émergence d'une auto-organisation

- nécessité d'un nombre critique d'individus
- feed-back positif : catalyseur implémentés par des réponses à des stimulations → création de structures (morphogénèse) ;
- feed-back négatif : saturateur provoqué par la compétition entre rétroactions positive → stabilisation des structures (morphostase) ;
- amplification des fluctuations : aspect aléatoire permettant la découverte de nouvelle forme de solutions.

## Caractéristiques d'un phénomène auto-organisé établi

- création de structures d'organisations spatio-temporelles
- existence de bifurcations
- coexistence possible de plusieurs états stables

- Concept introduit par P.P. Grassé, à propos de l'activité bâtisseuse chez les termites (piliers, arches pour la construction de leur nid, par exemple).
- Successions de stimulis-réponses :
  - stimulation provoqué chez l'insecte (rencontre d'un état antérieur de la construction),
  - réponse en poursuivant l'activité bâtisseuse ...
  - ... qui peut stimuler un autre insecte
- Forme particulière de communication indirecte permettant une coordination distribuée.



## Remarque

Dans la suite la présentation de chaque paragraphe respecter la structure suivante :

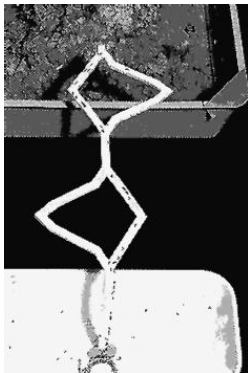
- Dans une première partie, on décrit un phénomène observé de comportement social des fourmis en suivant les traces des explications des éthologistes.
- Dans une seconde partie, on présente des applications orientées vers l'ingénierie et basées sur le comportement émergent de ces sociétés de fourmis.

## 3 Phéromones numériques et optimisation discrète

- Fourragement et recrutement alimentaire chez les fourmis
- Ant System (AS) et problème du voyageur de commerce
- Variantes et applications

## Fourrageage et recrutement alimentaire chez les fourmis

Expérimentation : On construit un pont à 2 branches de longueurs différentes entre un nid et une source de nourriture.



- Les fourmis déposent des phéromones lors de leur trajet de recherche de nourriture.
- Elles reviennent plus vite vers le nid si leur chemin est plus court.
- Au bout d'un certain temps, presque toutes les fourmis choisiront le plus court chemin en suivant les traces déposées.
- Les fourmis peuvent déposer + ou - de phéromones en fonction de la qualité de la nourriture trouvée.

# Ant System (AS) et problème du voyageur de commerce

1. Problème : trouver le cycle le + court reliant  $n$  villes totalement inter-connectées en passant 1 et 1 seule fois par chaque ville (cycle hamiltonien minimal dans un graphe complet pondéré).

## 2. Un modèle général à base d'agents réactifs

Un système dynamique à base d'agents, composé de 3 entités :

- un environnement invariant  $E_I$ , complexe par nature, non homogène et constitué d'un nombre fini de composantes  $E_I = \{E_1, E_2, \dots, E_p\}$ .
- un environnement modifiable  $E_M$ , ensemble de fonctions définies sur des composantes de  $E_I$  dont les valeurs sont modifiables par des agents.

- un ensemble  $X$  d'agents dont les caractéristiques correspondent au schéma “stimulus-réponse”
  - fonctions de perception : renseignements pris dans un voisinage de l'agent ( $V$  partie de  $E_I$  et restrictions de  $E_M$  à  $V$ ), sur l'environnement et la société d'agents, ce qui inclus l'état propre de l'agent.
  - fonctions d'action : permet à l'agent de modifier l'environnement qui inclut ses propres caractéristiques et celles d'autres agents.

Espace temps  $T$  discret :  $\forall t \in T$ , il existe 1 état de  $E_M$  et de  $X$  déterminé pour des valeurs en  $t$  de leurs fonctions.

### 3. Modélisation du problème

Dans AS, des agents (fourmis virtuelles) construisent les solutions en parallèle, en visitant les villes du graphe.

- Environnement invariant
  - $G = (V, E)$  graphe complet
  - $V$  ensemble des sommets = villes
  - $E$  ensemble des arcs valués = distance entre 2 villes
  - $c_i, c_j \in V$  et  $d_{ij} = d(c_i, c_j) \in E$



- Environnement modifiable
  - nombre d'agents sur chaque sommet
  - $\tau_{ij}(t)$  : quantité de phéromones artificielles déposées par les agents fourmis sur chaque arête  $(i, j)$ .
- Perceptions d'un agent
  - mémorisation par l'agent  $k$  des sommets-villes déjà visités dans un tableau  $tabu_k(\cdot)$ ,
  - voisinage du sommet  $i$  dans le graphe, ainsi que les valeurs de  $\tau_{ij}(t)$  correspondantes.

## ● Actions d'un agent

- avancer du sommet  $i$  vers le sommet  $j$ . On utilise des lois de transition aléatoires :
  - $p_{ij}^k(t)$  : proba que l'agent-fourmi  $k$ , situé à la ville  $i$ , à l'instant  $t$ , se déplace vers la ville  $j$ .
  - $J_k(i)$  : ensemble des villes qu'il reste à visiter par l'agent-fourmi  $k$ , situé à la ville  $i$ .
  - $\eta_{ij}$  : souhait d'ajouter l'arc  $(i, j)$  à la solution trouvée. Pour le problème du voyageur de commerce, on peut prendre

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}.$$

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{l \in J_k(i)} (\tau_{il}(t))^\alpha (\eta_{il})^\beta} & \text{si } j \in J_k(i) \\ 0 & \text{si } j \notin J_k(i) \end{cases} \quad (1)$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont 2 paramètres à ajuster qui contrôlent l'importance relative donnée aux traces de phéromones  $(\tau_{ij}(t))$  par rapport à l'heuristique  $(\eta_{ij})$ .

- Actions d'un agent (suite) :
  - déposer des phéromones en fin de parcours d'un cycle :  
Lorsque l'agent-fourmi  $k$  a fini un parcours  $T_k(t)$  de longueur  $L_k$ , il met à jour les valeurs de  $\tau_{ij}(t)$  en ajoutant une quantité de phéromone proportionnelle à la valeur du parcours :  $\Delta\tau_{ij}^k(t)$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{si } (i,j) \in T_k(t) \\ 0 & \text{si } (i,j) \notin T_k(t) \end{cases} \quad (2)$$

où  $Q$  est un paramètre à ajuster.

Il est alors nécessaire de mettre en place un système d'évaporation des phéromones afin d'éliminer les solutions non satisfaisantes provenant de la partie aléatoire de l'exploration - notamment au démarrage.

Soit  $\rho$  : le coefficient d'évaporation  $\in [0; 1]$  alors

$$\tau_{ij}(t + 1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (3)$$

$m$  correspondant au nombre d'agents-fourmis.

## 4. Algorithmes

- 1 Initialisation :
  - placer les  $m$  agents sur les  $n$  villes
  - initialiser  $\tau_{ij}(t) = Cste$  et  $\Delta\tau_{ij} = 0$
- 2 (Début d'itération) Initialiser  $tabu_k$  la liste des villes déjà visitées par chaque agent  $k$ .
- 3 Répéter jusqu'à ce que toutes les listes  $tabu_k$  soient pleines (i.e.  $n - 1$  répétitions)
  - pour chaque agent  $k$ , déplacement probabiliste de  $i$  vers  $j$ , respectant le calcul de proba  $p_{ij}^k(t)$ , d'après (1), puis ajout de  $j$  à  $tabu_k$ .
- 4 Pour chaque agent, calculer la longueur du cycle réalisé  $L_k$  et calculer, pour chaque arête,  $\Delta\tau_{ij}^k$  d'après l'équation (2).
- 5 pour chaque arête, calculer  $\tau_{ij}(t + 1)$  d'après l'équation (3).
- 6 Si (Nb itérations < Nb max ) et (comportement non stable : i.e. tous les agents n'ont pas refait le même cycle) alors aller en 2 sinon la solution (le + court cycle) a été trouvée : c'est celui qui réalise  $\min_k L_k$ .

## 5. Ajustement des paramètres

- Il faut un nombre suffisant d'agents-fourmis mais s'il y en a trop l'algorithme est peu efficace.
- M. Dorigo suggère les valeurs de paramètres suivants :
  - $m = n$  (nb agents = nb villes)
  - $\alpha = 1$  et  $\beta = 5$
  - $\rho = 0.5$  et  $Q = 100$

- On trouvera des essais comparatifs avec d'autres méthodes et des tests d'ajustement des coefficients dans l'article  
M. Dorigo, V. Maniezzo et A. Colorni "*The Ant System*",  
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part B, Vol. 26, n. 1, 1996, p 1-13  
téléchargeable depuis le site de Dorigo  
(<http://iridia.ulb.ac.be/dorigo/dorigo.html>).

- Mises à jour locales des phéromones à chaque déplacement, sans attendre la fin d'un cycle ;
- Mises à jour centralisée des phéromones : on ne marque que le plus petit cycle trouvé par une colonie (ACS - Ant Colony System - ACO -Ant Colony Optimisation) ;
- AntNet : application au routage dynamique dans les réseaux.



## 4 Allocation de tâches

- Constitution de castes d'insectes spécialisés pour des tâches spécifiques, basées sur les tranches d'âges, les similarités morphologiques ou encore simplement des castes comportementales.
- caractère adaptatif de la répartition du travail permettant le "reclassement" de certains individus et ceci de manière non centralisée.

## Modèles des seuils de réponses

### description

- Une tâche est associée à un stimulus (phéromone) incitant les individus à la réaliser ;
- Un individu possède un seuil de réponse vis à vis d'une tâche, et ceci en fonction de sa classe d'appartenance ;
- Si il y a disparition d'individus spécialisés dans une tâche, alors les stimuli associés à cette tâche doivent augmenter de façon à ce qu'elle puisse être prise en compte par d'autres individus

## Modèles des seuils de réponses formulation

$s$  : quantité de stimuli rattachée à une tâche donnée

$\Theta$  : seuil de réponse à une tâche pour un individu donné

- si  $s \ll \Theta$  alors la proba de réponse est faible
- si  $s \gg \Theta$  alors la proba de réponse est élevée

La proba de réalisation de la tâche correspond à

$$T_{\Theta}(s) = \frac{s^n}{s^n + \Theta^n}$$

où  $n > 1$  est le degré de seuil ( $n = 2$ , dans la suite)

## Modèles des seuils de réponses

### modèle à 1 tâche

- On suppose que l'on a 1 tâche à réaliser. Un stimulus d'intensité  $s$  est associé à cette tâche et augmente si elle n'est pas réalisée.
- $X_i$  l'état d'activité d'un individu  $i$  (il vaut 1 s'il réalise la tâche et 0 sinon).
- $\Theta_i$  correspond au seuil de réponse à la tâche, de l'individu  $i$ .

## Modèles des seuils de réponses modèle à 1 tâche (2)

- Proba de passage de l'état inactif vers l'état de réalisation de la tâche :

$$P(X_i = 0 \rightarrow X_i = 1) = T_{\Theta_i}(s) = \frac{s^2}{s^2 + \Theta_i^2}$$

avec un degré de seuil = 2.

- On pose que la proba de passage de l'état actif à l'état inactif  $P(X_i = 1 \rightarrow X_i = 0)$  vaut  $p$ , constant et identique pour chaque individu.  $1/p$  est alors le temps moyen de la réalisation d'une tâche.

## Modèles des seuils de réponses modèle à 1 tâche (3)

- On fait varier l'intensité du stimulus en fonction de l'importance de l'ensemble des réalisations de tâches :

$$s(t + 1) = s(t) + \delta - \alpha \eta_{act}$$

- $\delta$  est une constante d'augmentation de l'intensité par unité de temps ;
- $\alpha$  est une constante de diminution de l'intensité due à l'activité d'un individu ;
- $\eta_{act}$  est le nombre d'individus actifs réalisant la tâche.

Si on a 2 populations : l'une avec un seuil de réponse bas et l'autre avec un seuil de réponse élevé et que la première population disparaît alors la deuxième va finir par prendre en charge la tâche dont elle n'avait pas à l'origine la spécialité. On peut étendre le modèle pour gérer l'exécution concurrente de tâches multiples.

## Modèles des seuils de réponses limitation et extension

Les seuils de réponse constants et fixés initialement ne permettent pas la prise en compte de tâches nouvelles. On étend alors le modèle pour autoriser une variation du seuil :

- il augmente lorsque la tâche est réalisée ;
- il diminue sinon.



## Modèles des seuils de réponses un exemple

Pb : récupération adaptative de courriers par une compagnie de postiers, les courriers devant attendre le moins longtemps possible.

- Proba qu'un postier  $i$ , situé en  $z_i$ , réponde à une demande d'intensité  $s_j$  dans la zone  $j$  :

$$p_{ij} = \frac{s_j^2}{s_j^2 + \alpha \Theta_{ij}^2 + \beta d_{jz_i}^2}$$

- $\Theta_{ij}$  : seuil de réponse du postier  $i$  à une demande de la zone  $j$  ;
- $d_{jz_i}$  : distance entre  $j$  et  $z_i$  ;
- $\alpha$  et  $\beta$  sont 2 paramètres d'influence relative des 2 quantités précédentes.

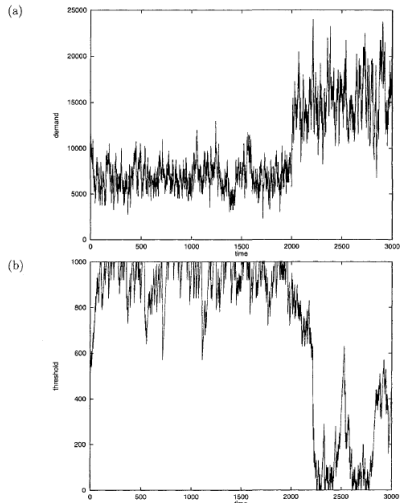
- Chaque fois qu'un postier se déplace vers la zone  $j$  pour retirer du courrier, ses seuils de réponse sont mis à jour :
  - $\Theta_{ij} \leftarrow \Theta_{ij} - \xi_0$  ;
  - $\Theta_{il} \leftarrow \Theta_{il} - \xi_1, \forall l \in \eta_j$  (voisinage de la zone  $j$ ) ;
  - $\Theta_{ik} \leftarrow \Theta_{ik} + \phi$ , pour les autres valeurs de  $k$ .

$\xi_0$  et  $\xi_1$  sont des coefficients d'apprentissage.  $\phi$  est un coefficient compensatoire.

## Modèles des seuils de réponses un exemple - expérimentation

- On applique l'exemple sur une grille cyclique découpée en 5x5 zones et avec 5 postiers ;
- A chaque itération, 5 zones voient leur intensité augmentée d'une valeur 50 ;
- $\alpha = 0,5$ ,  $\beta = 500$ ,  $\Theta_{ij} \in [0; 1]$ ,  $\xi_0 = 150$ ,  $\xi_1 = 70$ ,  $\phi = 10$
- Lorsque un postier répond, il est inopérant pendant une période de temps correspondant à la distance qu'il doit parcourir ; l'intensité de la demande à laquelle il satisfait vaut alors 0 pendant cette période.

- On observe la mise en place d'une auto-organisation qui consiste à spécialiser des postiers sur certaines zones et ceci de manière adaptative.
- Figure ci-après où un postier a été retiré à un instant donné. Sur la figure 1, on visualise la demande de la zone qui y est rattachée. Sur la figure 2, on visualise le seuil d'un postier affecté sur une autre zone et pour cette zone qu'il désaffecte pour rejoindre la zone critique.

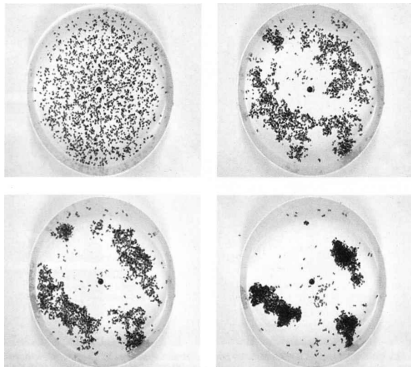


## 5 Classification

# Tris décentralisés chez les insectes sociaux

Les insectes sociaux (fourmis p.e.) mettent en place des méthodes décentralisées pour la gestion de cimetières ou le tri de leur couvain.

- Aggrégation et formation de “clusters” souvent à proximité des bords ou des hétérogénéités ;
- Constitution de petits clusters qui augmentent progressivement et jouent le rôle de “feed-back” (stigmergie).



Hypothèse : un seul type d'objet à trier.

- Probabilité qu'une fourmi se déplaçant "à vide" prenne un objet est :

$$p_p = \left( \frac{k_1}{k_1 + f} \right)^2$$

- $f$  : valeur de la perception d'objets dans le voisinage de la fourmi ;
- $k_1$  : seuil
  - si  $f \ll k_1$  alors  $p_p \sim 1$ ,
  - si  $f \gg k_1$  alors  $p_p \sim 0$ .



- probabilité qu'une fourmi chargée d'un objet le dépose est

$$p_d = \left( \frac{f}{k_2 + f} \right)^2$$

- $k_2$  : 2<sup>eme</sup> seuil
  - si  $f \ll k_2$  alors  $p_d \sim 0$ ,
  - si  $f \gg k_2$  alors  $p_d \sim 1$ .

- $f$  : mémoire à court terme propre à chaque fourmi. On mémorise les  $T$  derniers pas de temps et alors  $f = N/T$  : rapport du nombre d'objets rencontrés pendant la période sur le nombre d'objets maxi pouvant être rencontré (si on ne peut rencontrer que 0 ou 1 objet à chaque pas de temps).

On peut étendre la méthode à plusieurs objets de nature différente.

## Application/extension à l'analyse de données

- Soient  $O_1$  et  $O_2$  deux données de natures différentes ;
- On note  $d(O_1, O_2)$  la distance mesurant la différence de nature des 2 objets, comme par exemple :
  - une métrique binaire :  $d(O_1, O_2)$  vaut 0 si  $O_1$  et  $O_2$  sont du même type sinon elle vaut 1 ;
  - une métrique + complexe basée sur des objets possédant plusieurs attributs. On peut, dans ce cas, faire des projections des vecteurs d'attributs dans un sous-espace pour favoriser la classification sur certains critères.

## Algorithme LF(Lumer et Faieta, 1994)

- Soit le nombre d'attributs d'un objet :  $m = 2$  (p.e. coord. planaires)
- On considère une grille planaire et on note  $V_r$  la région voisine d'un site  $r$ , de surface  $s^2 - 1$  ( $s$  : largeur en nb de cases du voisinage).

Soit une fourmi située au site  $r$  à l'instant  $t$  et trouvant l'objet  $o_i$ . La densité locale d'objets de même type que  $o_i$  sur le site  $r$  vaut

$$f(o_i) = \max \left( 0, \frac{1}{s^2} \sum_{o_j \in V_r} \left[ 1 - \frac{d(o_i, o_j)}{\alpha} \right] \right)$$

c'est une mesure de similarité par rapport à l'objet  $o_i$  du voisinage de  $o_i$ , qui remplace  $f$  dans le modèle de base.  $\alpha$  correspond au facteur d'échelle de dissimilarité. S'il est trop grand, on réunit des données hétérogènes, s'il est trop petit, on dissocie toutes les données.

On pose

$$p_p(o_i) = \left( \frac{k_1}{k_1 + f(o_i)} \right)^2$$

$$p_d(o_i) = \begin{cases} 2f(o_i) & \text{si } f(o_i) < k_2 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

- Distributions de 800 points de données d'attributs  $(x, y)$  répartis dans 4 clusters à retrouver par l'algorithme, et placer initialement de manière aléatoire sur un domaine en 2-D ;
- Algorithme avec 10 fourmis : après  $10^6$  itérations, on retrouve la formation d'environ 6 clusters.

conclusion : L'algorithme a tendance à générer plus de clusters que nécessaire.

**Les fourmis ont différentes vitesses** :  $v \in [1, v_{max}]$ , nombre d'unités de grille franchies par pas de temps

$$f(o_i) = \max \left( 0, \frac{1}{s^2} \sum_{o_j \in V_r} \left[ 1 - \frac{d(o_i, o_j)}{\alpha \left( 1 + \frac{v-1}{v_{max}} \right)} \right] \right)$$

Les fourmis rapides sont moins sélectives : elles construisent des clusters + gros et - compacts.



### Mémoire à court terme

Les fourmis se rappellent des  $m$  derniers objets qu'elles ont portés. A chaque fois qu'elles prennent un objet, elles le comparent avec les objets qu'elle a mémorisé et en déduit un sens de déplacement. Cela permet de réduire la formation de clusters distincts mais contenant des éléments de même nature.

### Changement de comportement

Les fourmis peuvent commencer à détruire des clusters si elles n'ont pas pris d'objet depuis plusieurs pas de temps. Cela permet de sortir de solutions non satisfaisantes correspondants à un minimum local et non global.

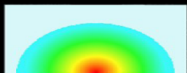
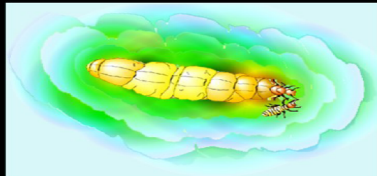
Remarque :

- Les positions relatives des clusters construits n'ont pas de signification, contrairement aux coutumes en analyse de données ;
- Application au tracé et partitionnement de graphes.

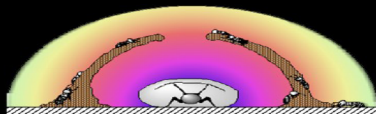
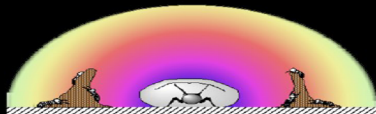
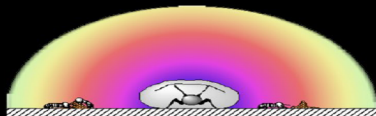
## Ant Nest Building - in Nature

### *Exemple de gabarit chez le termite *Macrotermes subhyalinus**

*La reine émet une phéromone qui crée autour d'elle un gradient décroissant dont la forme générale épouse les contours de son corps*



$C_{max}$   $C_{min}$



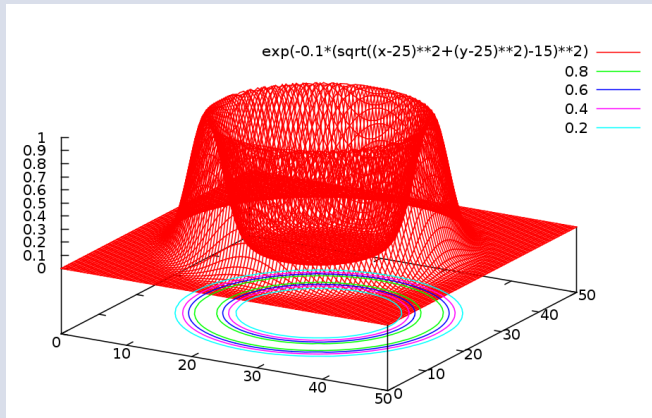
## Ant Nest Building - Principle

We mix ant clustering self-organization process in the following way:

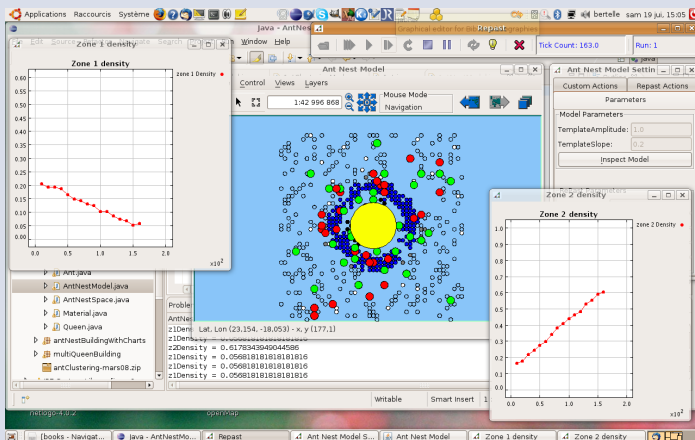
- Spatial constraint which fix the material deposit place
- “Template” function definition,  $P_t$ , representing the intensity of some pheromone that the ant queen emits
- So, the new probability to take the material is  

$$P'_p = P_p(1 - P_t),$$
- and the new probability to put the material is  $P'_d = P_d P_t$

## Ant Nest Building - "Template" function $P_t$



## Ant Nest Building - Simulation

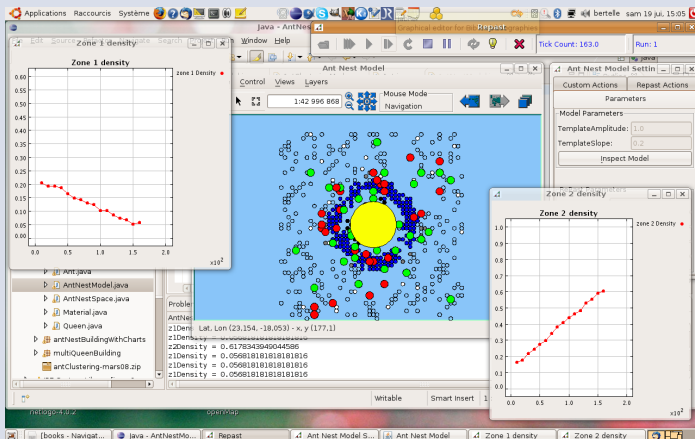


## Adaptive spatial organization: feedback implementation

How to model the feedback of the emergent organization (here managed by the ant queen) on the system itself, its constituents : materials, ants, space

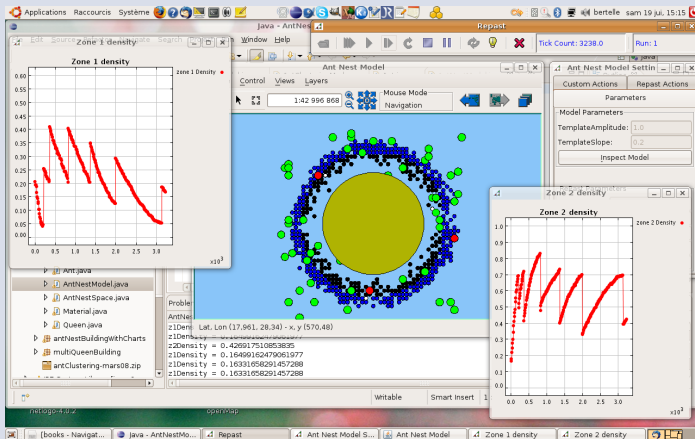
- We define 2 control zones around the queen
- Zone 1 is near the queen and the “zero” value of the template
- Zone 2 is the area where the template has his higher values
- We compute the density of this 2 zones during the simulation
- When these densities reach some treshold, the queen “grow”: the maximum template radius increase.

## Adaptive spatial organization





## Adaptive spatial organization



## 6 Le système immunitaire : intelligence collective des sociétés de lymphocytes (d'après F. Varella)

- cf. livre Bonabeau et Theraulaz “*Intelligence collective*”, chap. 4 + paragraphes 7.1.3 et 8.3.1.