

# Des fourmis réelles aux fourmis artificielles

## Deux exemples d'approches biomimétiques de la résolution de problèmes en informatique.

Nicolas Monmarché & Alain Lenoir

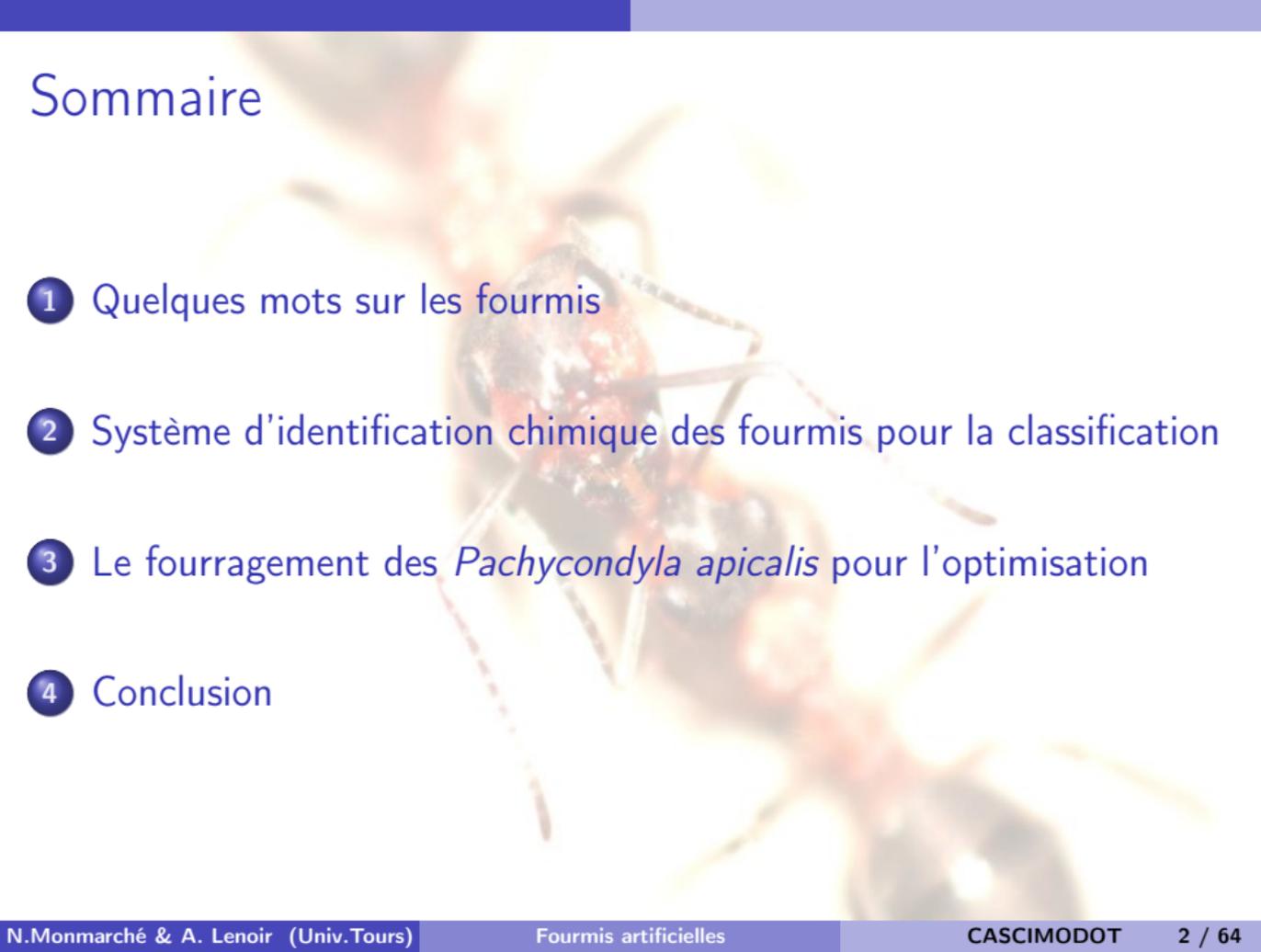
Laboratoire d'Informatique - Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte



Université François Rabelais - Tours

6ème journée CASCIMODOT : 5 juillet 2007 à Tours

# Sommaire



- 1 Quelques mots sur les fourmis
- 2 Système d'identification chimique des fourmis pour la classification
- 3 Le fourragement des *Pachycondyla apicalis* pour l'optimisation
- 4 Conclusion

## Peu d'espèces de fourmis...

Les insectes :

- 950 000 espèces décrites (probablement 8 000 000 au total) <sup>a</sup>
- les fourmis font partie de l'ordre des hyménoptères (120 000 espèces)
- 12 000 espèces de fourmis connues (estimation : 20 000) !

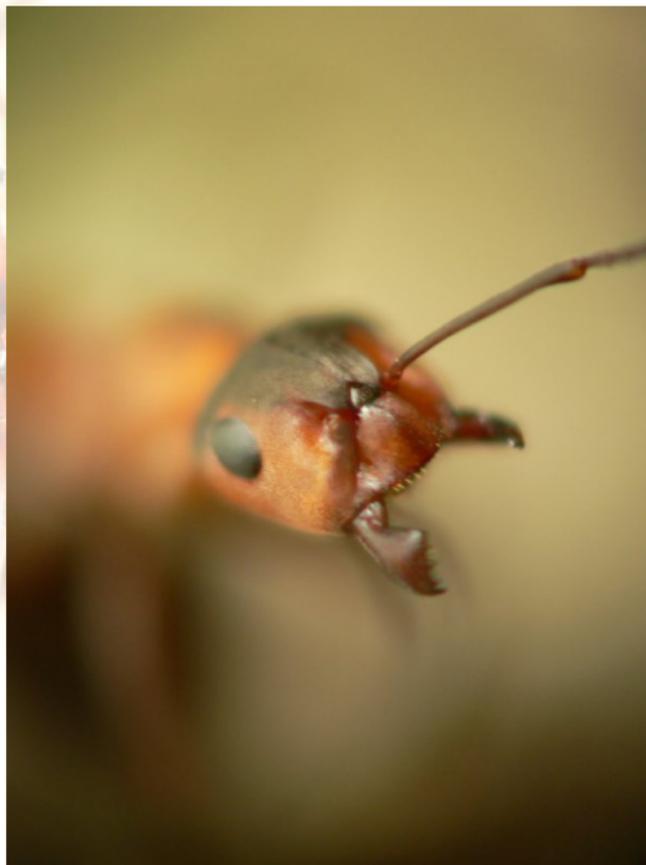
---

<sup>a</sup>source : World Conservation Monitoring Centre.



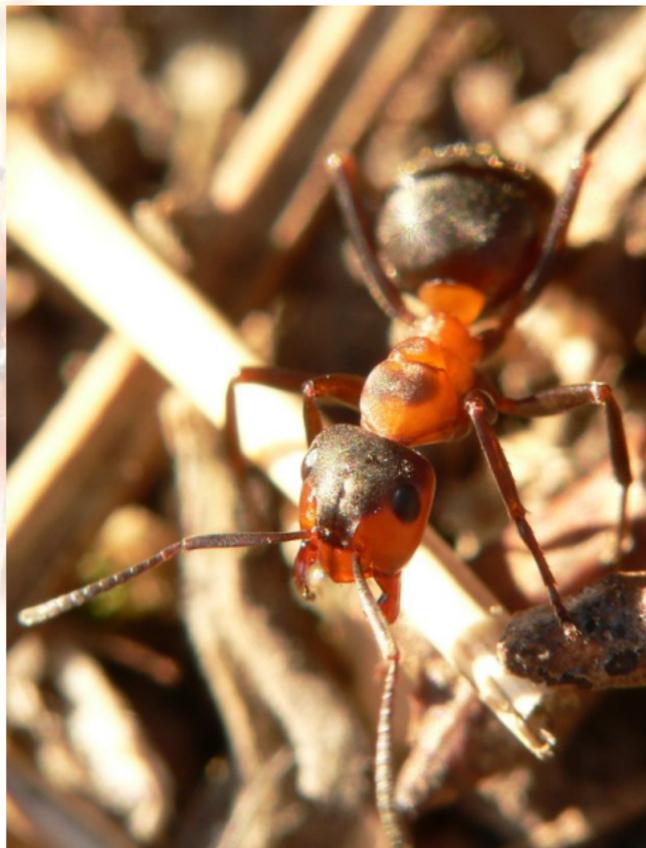
## ... mais beaucoup d'individus...

- une société de fourmis nomades d'Afrique (*dorylus*) peut comporter plus de 20 millions d'ouvrières
- il existe des super-colonies : plus de 300 millions d'ouvrières, 1 million de reines et 45 000 nids sur 2.7 km<sup>2</sup> (*Formica yessensis*, Japon)
- la fourmi d'Argentine (*Linepithema humile*) : 200 millions d'ouvrières et 130 000 reines à l'hectare...sur 6 000 km de côtes méditerranéennes.



## ... grandes prédatrices

- les fourmis rouges des Alpes italiennes ramassent en 200 jours 24 000 tonnes de nourriture dont 14 500 d'insectes
- une colonie de *Formica polyctena* capture 8 millions d'insectes annuellement (Allemagne)
- Pour les fourmis *Ectatomma tuberculatum* et *Ectatomma ruidum*, 260 millions de proies sont capturées annuellement par hectare (Mexique)



## ... et face à nous ?

- le poids sec des fourmis de la forêt amazonienne est environ 4 fois celui de vertébrés terrestres réunis
- La masse de fourmis sur Terre est équivalente à la masse de l'Humanité... (une fourmi pèse entre 1 et 10 mg)
- très bonne radiorésistance



# Les problèmes quotidiens des fourmis

- rechercher de la nourriture
- ⇒ navigation, repérage
- exploiter une source de nourriture
- ⇒ communication, recrutement, transport coopératif
- se reproduire et élever les jeunes
- ⇒ répartition des tâches, division du travail, tri, nursing
- défendre la colonie
- ⇒ communication, identification
- construire le nid
- ⇒ répartition des tâches, communication

Les fourmis abordent ces problématiques de façon collective :

→ Intelligence collective (Intelligence en essaim), auto-organisation

# L'intelligence en essaim

- Du point de vue de l'intelligence artificielle, c'est l'**intelligence collective** des fourmis qui nous intéresse principalement.
- on parle aussi d'**Intelligence en essaim** (*swarm intelligence*).
- le terme « Intelligence en essaim » a d'abord été utilisé dans le contexte des systèmes robotiques cellulaires (fin des années 80), mais s'applique parfaitement à une gamme plus large de systèmes artificiels.

## L'intelligence collective

La manifestation d'une intelligence collective s'observe par l'émergence ou l'apparition de structures temporelles et/ou spatiales issues d'interactions multiples et répétées, directes ou indirectes, entre des individus appartenant à une même colonie ou un même groupe.

# L'auto-organisation

- L'intelligence collective prend dans de nombreux cas la forme d'une auto-organisation (pas de contrôle centralisé).
- l'**auto-organisation** est une théorie initialement développée dans le cadre de la physique/chimie et qui tente de décrire l'émergence de phénomènes macroscopiques à partir d'interactions ou de processus observés à un niveau microscopique
- l'hypothèse de travail est que si les comportements microscopiques des entités peuvent expliquer l'apparition d'un comportement macroscopique complexe tout en restant eux même relativement simples, on gardera cette simplicité le plus longtemps possible.

# L'auto-organisation

En appliquant cela aux fourmis :

Les fourmis simples résolvent des problèmes complexes

Bien qu'une fourmi puisse être d'un fonctionnement complexe (miniaturisation, capteurs, apprentissage...), on choisira de préférence d'expliquer un comportement collectif par un comportement individuel le plus simple possible.

Exemple : si cela suffit de considérer la fourmi comme un point dans l'espace de recherche auquel on s'intéresse, on s'abstiendra de lui donner des pattes, un thorax, un abdomen,...

# L'auto-organisation

Quatre ingrédients de base sont impliqués dans des phénomènes d'auto-organisation :

- ➊ **renforcement positif** (*positive feedback*) : c'est ce qui induit l'**amplification** d'un phénomène (plus un comportement est mis en œuvre, plus il est renforcé, et plus il est renforcé, plus il est mis en œuvre...);
- ➋ **renforcement négatif** (*negative feedback*) : c'est ce qui contre-balance l'amplification et assure donc une stabilisation du phénomène;
- ➌ **l'amplification des fluctuations** : c'est la composante aléatoire du phénomène;
- ➍ **la multitude des interactions** : plusieurs entités agissent simultanément.

# L'auto-organisation

Un phénomène auto-organisé présente souvent certaines des propriétés suivantes :

- 1 l'apparition de structures spatio-temporelles dans un milieu originellement homogène (ex. des galeries dans un nid, de la disposition du miel, du pollen et du couvain dans les rayonnages chez les abeilles)
- 2 la possible coexistence de plusieurs états stables (ex. de deux sources identiques de nourriture)
- 3 la possible bifurcation du comportement lorsqu'un paramètre est modifié (ex. de l'évaporation des phéromones)

# L'auto-organisation

Un des points clé de l'auto-organisation concerne les interactions entre les constituants du système. Ces interactions peuvent être :

- 1 directes : par contact physique (antennes, sons, échange de nourriture...)
- 2 indirectes : par la modification d'une caractéristique de l'environnement (chimique, déplacement de substances...). On parle dans ce cas de **stigmergie** (terme inventé par Grassé en 1959 [Gra59])

# La diversité des comportements

- l'habitat (dans la terre, dans les arbres (feuilles, branches, ...))
- la nourriture (trophalaxies, champignonistes, granivores, insectivores,...)
- la communication (visuelle, sonore, chimique : phéromones d'alarme, ...)

## Exemples :

- fourmis tisserandes
- fourmis nomades (ou légionnaires, army ants)
- fourmis champignonistes
- fourmis parasites
- fourmis esclavagistes

# Fourmis réelles/artificielles

Tableau comparatif :

	<b>Fourmis réelles</b>	<b>Fourmis artificielles</b>
depuis quand ?	$100 \times 10^6$ années	15/20 ans
où ?	tout écosystème terrestre	ordinateurs, réseaux, robots
combien ?	$10^{18}$	↗
qui ?	entomologistes myrmécologues	informaticiens, ...
pourquoi ?	équilibres, régulations, évolution	optimisation, ...

# Modélisation biomimétique

Deux objectifs à la modélisation du comportement des fourmis :

- permettre aux biologistes de mieux comprendre et observer les mécanismes qui régissent ces sociétés (vérification de la capacité de prédiction du modèle)
- imaginer des nouvelles méthode de résolution de problèmes complexes (robotique, optimisation, ...)  $\Rightarrow$  Méta-heuristiques

# Modélisation biomimétique

Modélisations pour la résolution de problèmes complexes :

- recherche de nourriture
- ⇒ optimisation combinatoire, routage dans les réseaux
- division du travail
- ⇒ allocation de tâches (robotique)
- rangement des larves (tri du couvain) et des cadavres (organisation des cimetières)
- ⇒ Partitionnement de graphes, classification, tri collectif
- transport coopératif
- ⇒ robotique distribuée

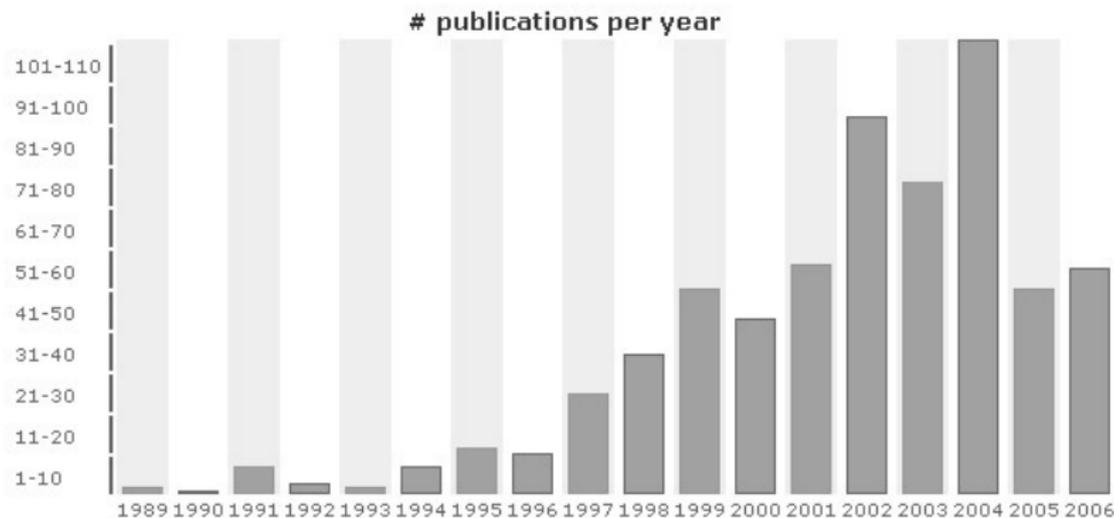
# Domaines d'origines des fourmis artificielles

- biologie théorique et comportementale
- Modélisation de systèmes complexes
- Intelligence Artificielle Distribuée (IAD)
- Systèmes Multi-Agents (SMA)
- Robotique autonome
- Optimisation stochastique par population de solutions

## Remarque

Contrairement à ce que l'on peut trop rapidement penser, une fourmi artificielle ne fait pas que de l'optimisation...

# Évolution des publications sur les fourmis artificielles



[<http://www.hant.li.univ-tours.fr/artantbib/artantbib.php>]

# Modélisation du système d'identification chimique des fourmis

(thèse N. Labroche)

**objectif** : détection des intrus

**moyen** : utilisation d'une odeur coloniale de référence

Chaque fourmi :

- ▶ émet une odeur (Label = génétique + échanges sociaux + environnement + ...)
- ▶ possède un modèle (neuronal) de l'odeur coloniale (Template)

# Modélisation du système d'identification chimique des fourmis

Composition du label chimique des fourmis :

- principalement des hydrocarbures
- rôle avéré pour certaines espèces lors des rencontres interindividuelles
- il existe des différences quantitatives et qualitatives d'une espèce à l'autre :

Exemple : 7 espèces de *Cataglyphis* : 242 hydrocarbures au total, chaque espèce n'en possède que 30 à 60 dans des proportions différentes

# Schéma de circulation des hydrocarbures dans une fourmi

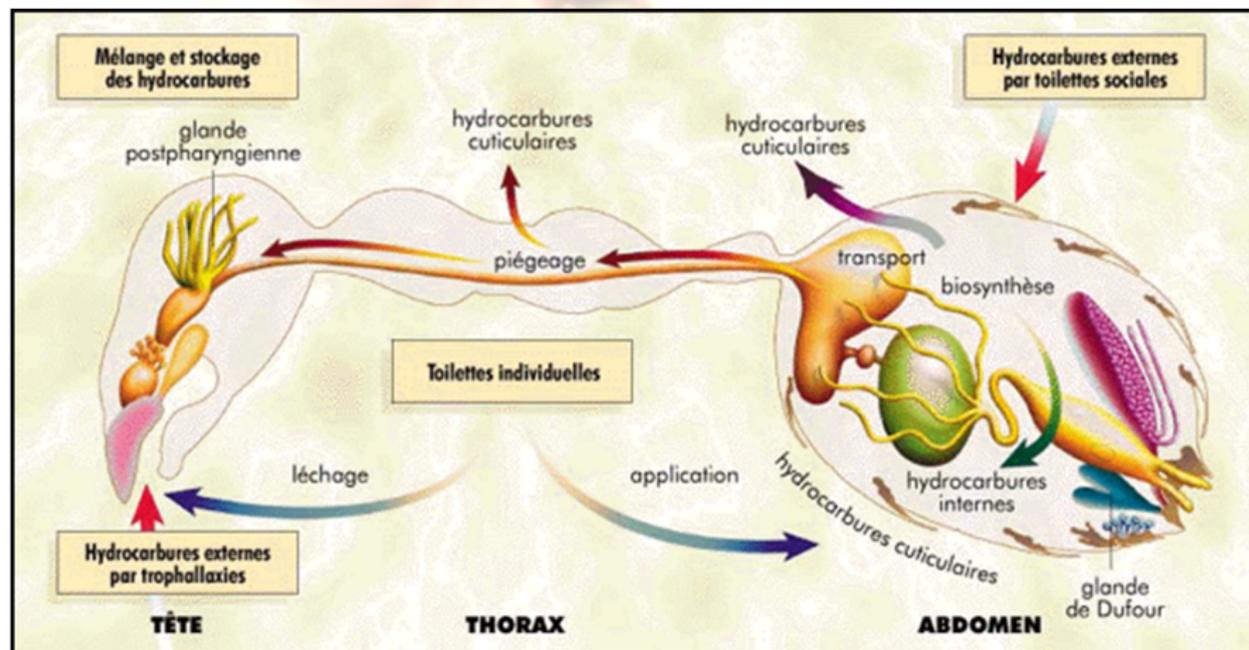
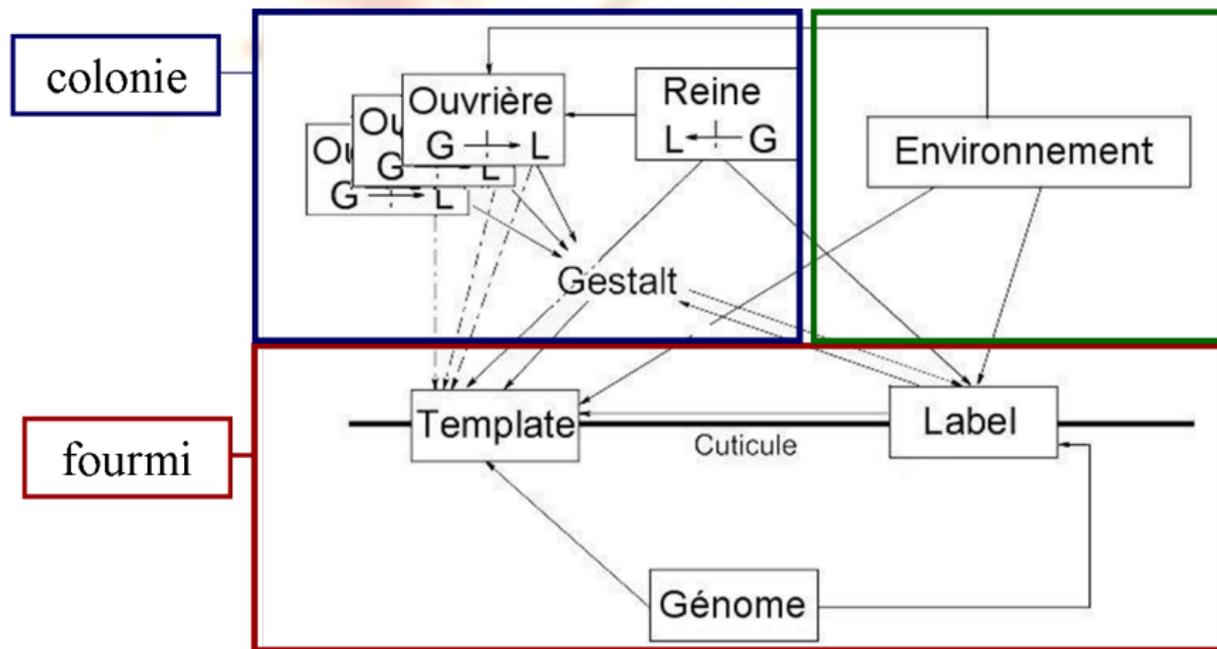


Schéma d'après A. Dahbi et al. (La Recherche)

# Facteurs influents la circulation des odeurs dans la colonie

- structure coloniale (polydomique, polygynique, ...)
- présence de la reine (diffusion de l'odeur coloniale plus large ou introduction d'une marque distinctive selon les espèces)
- l'environnement (alimentation, matériaux du nid...)

# Modèle de Carlin & Hölldobler



Décrit les discriminateurs intrinsèques et extrinsèques  
(pbm : formalisation des relations décrites?)

# Première expérience

- Un label  $L = \text{un vecteur } (x, y)$  (représentation des odeurs dans un plan)
- Trois fourmis (rouge, verte, bleue) représentées par leurs labels  $L_R, L_V$  et  $L_B$
- renforcement des odeurs :

$$L_i^{(t+1)} \leftarrow (1 - \alpha)L_i^{(t)} + \alpha L_j^{(t)} \text{ avec } i, j \in \{R, V, B\}$$

- Deux odeurs externes : alimentaire  $L_A$  et environnementale  $L_E$  :

$$L_R^{(t+1)} \leftarrow (1 - \alpha - \beta - \delta - \gamma)L_R^{(t)} + \frac{\alpha}{2}L_V^{(t)} + \frac{\alpha}{2}L_B^{(t)} + \beta L_A^{(t)} + \delta L_E^{(t)} + \gamma L_R^0$$

## Outil de test

Labels des 3 fourmis

Odeurs des aliments et de l'environnement

Paramètres de la simulation

**Testeur de divergence**

Paramètres de départ :

Label 1	x: 0,4	y: 0,54	■
Label 2	x: 0,56	y: 0,61	■
Label 3	x: 0,79	y: 0,2	■

Alim. x: 0,27 y: 0,59 ■

Env. x: 0,72 y: 0,02 ■

Poids du modèle :

AutresLabels : 1,329922974

Généétique : 0,001

Aliments : 0,001

Environnement : 0,001

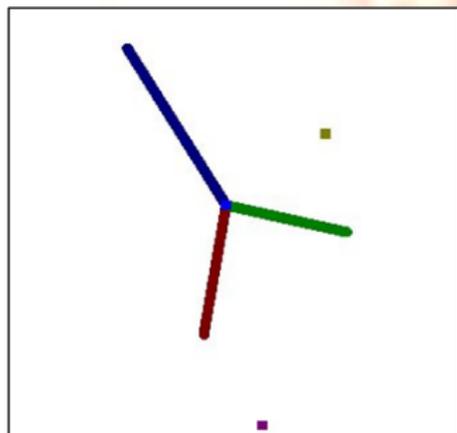
Trajectoires     Génétique

Aliments     Environnement

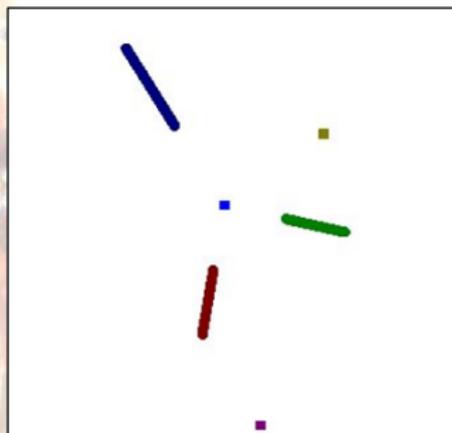
Random    Go!    Stop ...    X: 105, Y: 3345

visualisation graphique de la divergence/convergence des odeurs des 3 fourmis

# Résultats

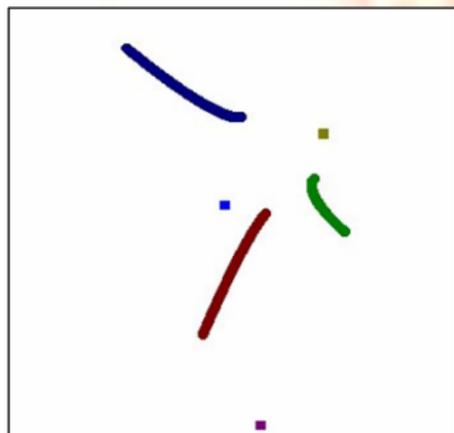


pas d'influence extérieure

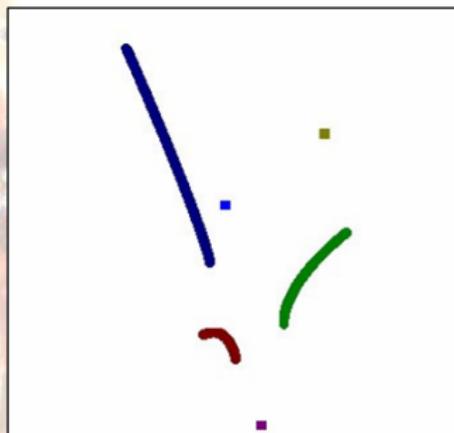


influence génétique

# Résultats

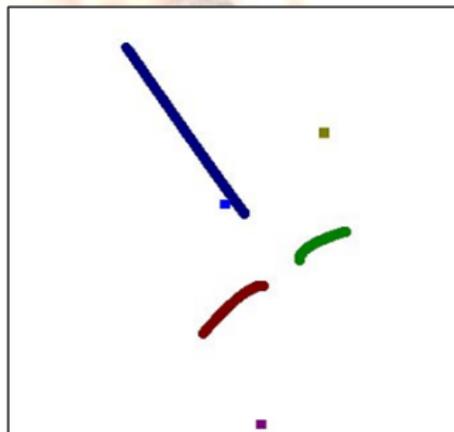


influence de l'environnement



influence de l'alimentation

# Résultats



toutes les influences

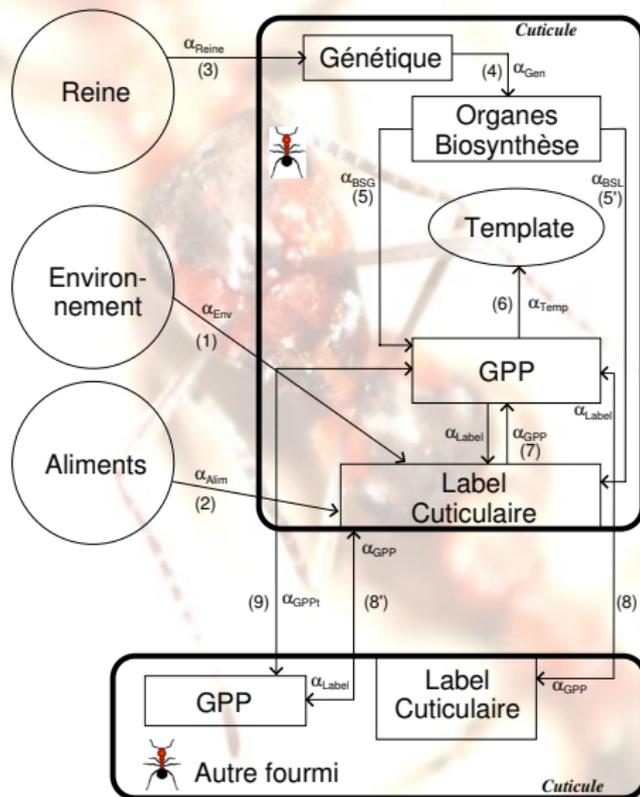
## Deuxième expérience

[LabRicMonLenVen02a.iwsoesb]

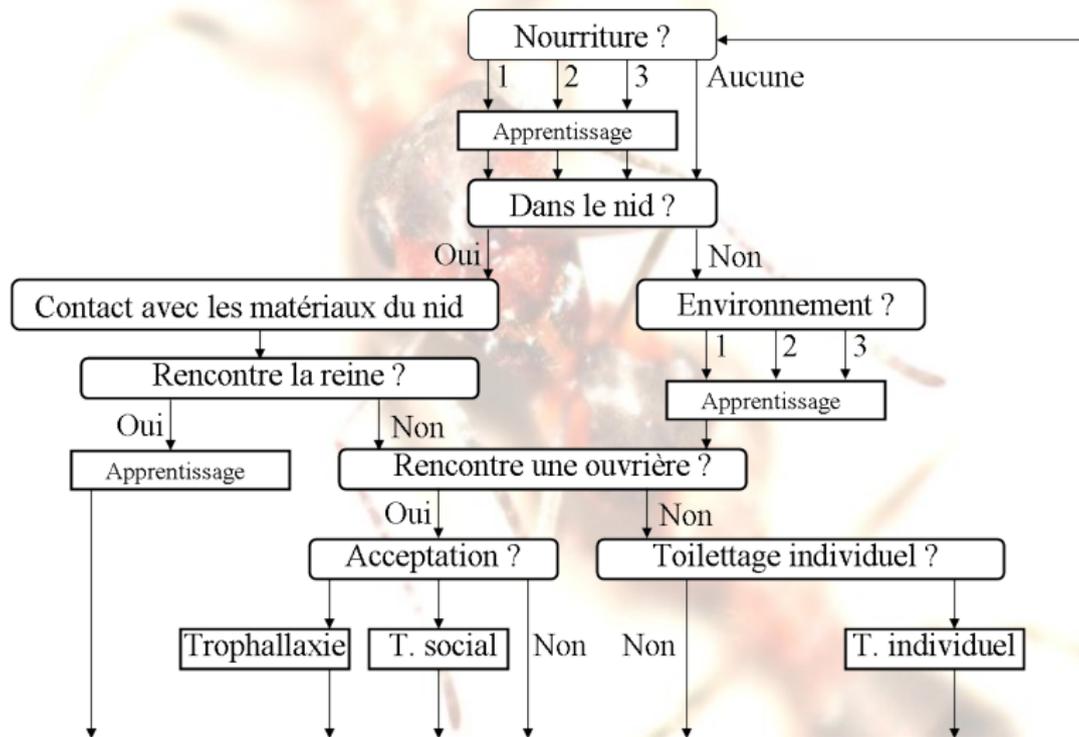
- modélisation beaucoup plus précise : l'objectif est de reproduire des expériences réelles
- Un label  $L =$  un vecteur  $(LG, LE, LA)$  (Génétique, Environnement et Alimentation)
- Les fourmis sont capables d'évaluer une similarité entre une odeur et leur modèle de référence (template  $T = (TG, TE, TA)$ ) :

$$d(L, T) = \omega_G d(LG, TG) + \omega_E d(LE, TE) + \omega_A d(LA, TA)$$

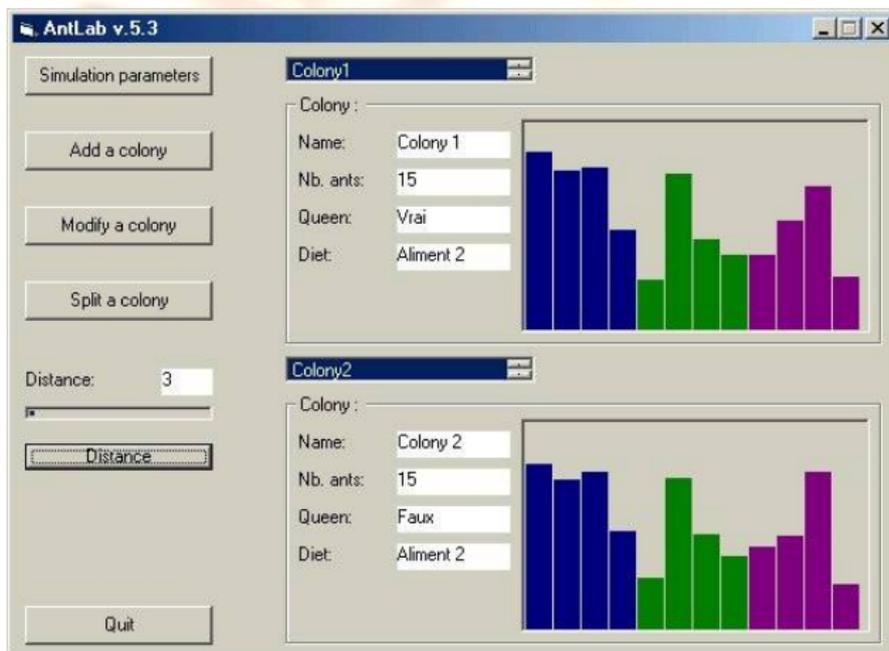
## Schéma général des entités du modèle



# Comportement général d'une fourmi



# AntLab



Interface générale

## AntLab

**New Colony setup**

Number of ants :

Is there a queen in the colony ?  
 Yes  No

Bounds for concentration in the chemical profile of the queen :

Lower : Min = 0

Upper : Max = 1

During labels comparisons, use the following weights :

"genetic" :

"environment" :

"food" :

Probabilities to ...

meet the queen :

meet a nestmate :

to do individual licking :

find a source of food :  Alm n° 1

to be in the nest :

to be in the environment : 1 :  2 :  3 :

Genetic variability intra colony :

Colony File :

**Split colony**

Choose a colony :

How many ants do you wish to keep in the mother colony ?

Paramétrage d'une nouvelle colonie      Scinder la colonie

## AntLab

**Simulation**

Weight of model entities :

Queen PPG :

Food :

Environment :

Nest materials :

Genome -> Biosynthesis :

Biosynthesis -> Label :

Biosynthesis -> PPG :

PPG <-> Label :

Nest Contacts :

Social lickings :

Individual lickings :

Trophalaxies :

Values for environment and food odors :

	Values (Tab)		Dev. (Tab)	Rd?	#Eyd.
Environment 1 :	<input type="text" value="0,1"/>	<input type="text" value="0,8"/>	<input type="text" value="0,05"/>	<input type="checkbox"/>	
Environment 2 :	<input type="text" value="0,4"/>	<input type="text" value="0,3"/>	<input type="text" value="0,05"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="4"/>
Environment 3 :	<input type="text" value="0,4"/>	<input type="text" value="0,8"/>	<input type="text" value="0,05"/>	<input type="checkbox"/>	
Food 1 (Rose) :	<input type="text" value="0,1"/>	<input type="text" value="0,8"/>	<input type="text" value="0,05"/>	<input type="checkbox"/>	
Food 2 (Troene) :	<input type="text" value="0,4"/>	<input type="text" value="0,3"/>	<input type="text" value="0,05"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="4"/>
Food 3 (Ronce) :	<input type="text" value="0,4"/>	<input type="text" value="0,8"/>	<input type="text" value="0,05"/>	<input type="checkbox"/>	
Genetic :					<input type="text" value="4"/>

Thresholds for :

trophalaxies :

social lickings :

social contacts :

File :

Paramétrage de la simulation

# Expérimentation

Validation sur des données artificielles :

- Utilisation de données artificielles (odeurs fictives)
- 1 colonie mère scindée en 2 colonies filles

Observation de divergences d'odeurs coloniales :

- Évaluation de l'influence de la reine (qui reste dans une seule des deux colonies filles)
- Influence du régime alimentaire et de l'environnement sur la dérive de l'identité chimique coloniale

# Expérimentation

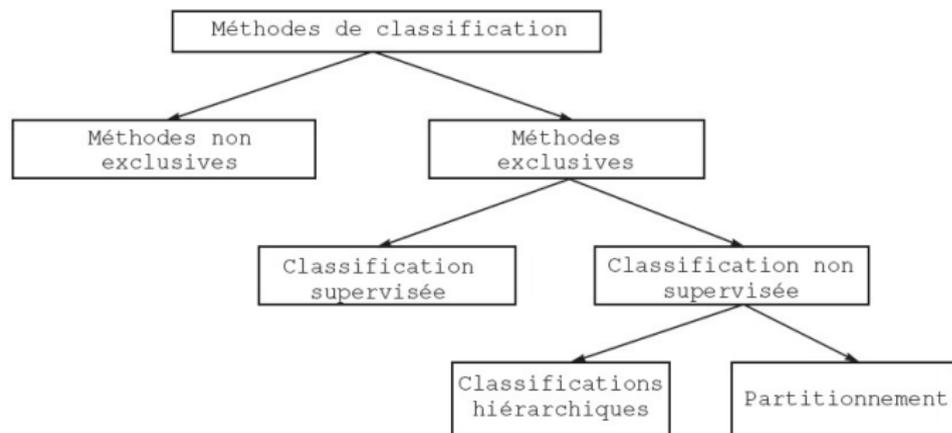
Validation avec des données biologiques :

- Utilisation de données réelles issues de 3 profils d'odeurs de fourmis champignonnistes *Acromyrmex subterraneus subterraneus*.
- colonie divisée en 3 colonies filles :
  - ▶ colonie (a) : reine + alimentation=ronce
  - ▶ colonie (b) : alimentation=ronce
  - ▶ colonie (c) : alimentation=troène

Conclusions :

- La divergence des odeurs est observée
- le paramétrage du modèle est important

# Application à la classification



Définition du problème :

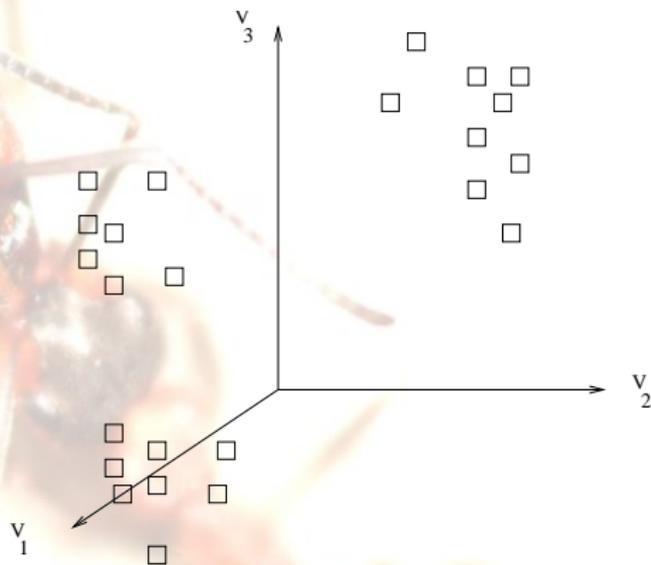
- Étant donné un ensemble d'objets, on désire y percevoir un certain nombre de groupes ayant chacun une cohérence élevée.
- Les objets sont définis par leur coordonnées dans l'espace des attributs.

# Application à la classification

**objectif** : découverte de classes dans un ensemble de données (on ne connaît pas la forme ni le nombre de classes)

**moyen** : utilisation du mécanisme de construction et de renforcement de l'odeur coloniale

⇒ apparition spontanée de groupes d'individus

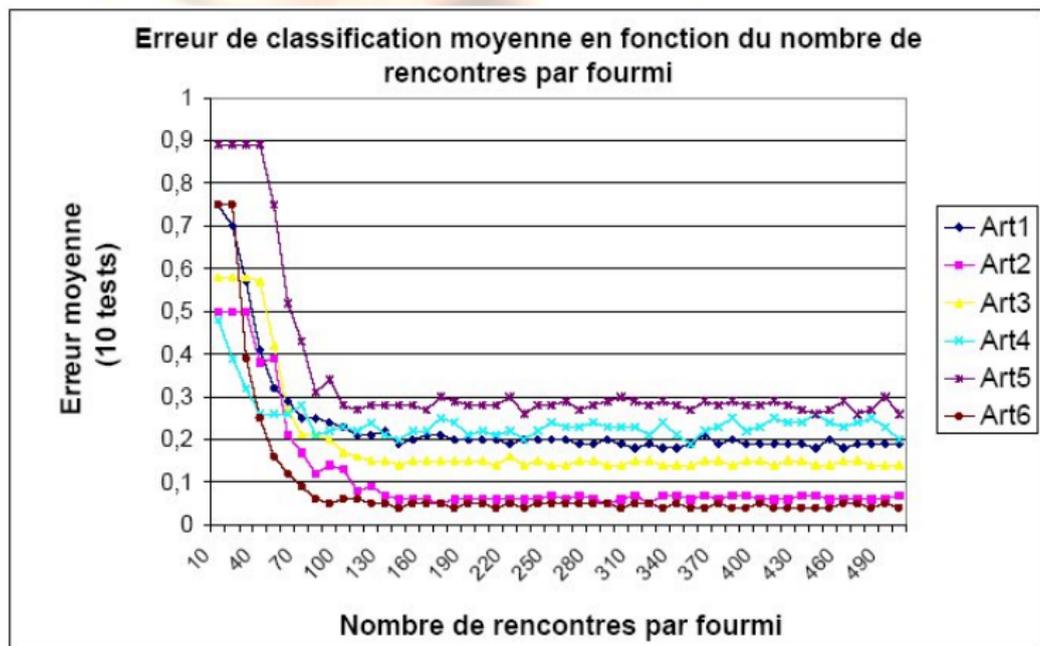


# Principe

Simplification du modèle d'identification chimique (AntClust) :

- chaque fourmi est associée à un objet à classer
- la composante génétique de l'odeur est liée aux attributs de l'objet
- des rencontres entre les fourmis sont simulées et permettent à chaque fourmi de faire évoluer son label et son template
- les fourmis se stabilisent et leurs labels nous indique un partitionnement des objets

# Résultats AntClust

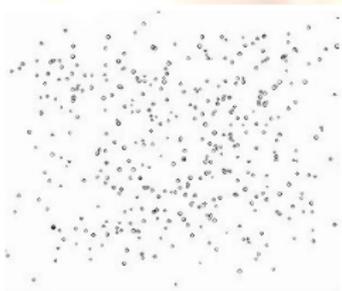


# Principe

Version visuelle (Visual AntClust) [LabMonVen03a.kes] :

- le label d'une fourmi est un point du plan qui est représenté à l'écran
- l'utilisateur peut suivre graphiquement l'évolution des labels

# Résultats visual AntClust



1. Début de l'algorithme : 0 itération



2. Convergence : environ 100 itérations



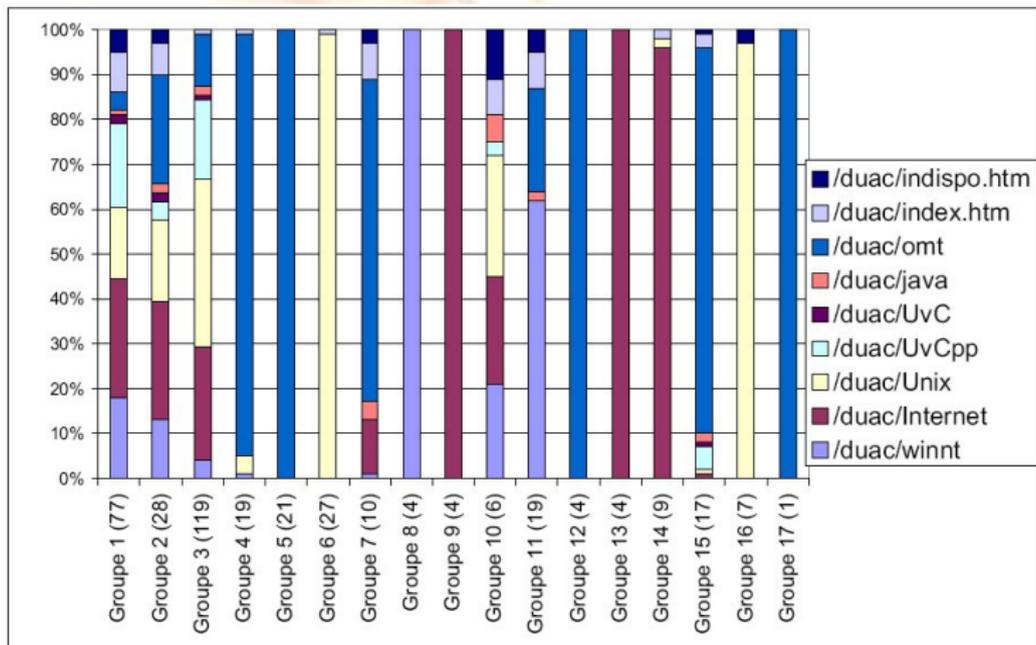
3. Apparition des groupes : environ 500 itérations



4. Définition des groupes : environ 1000 itérations

# Résultats AntClust

Classification de sessions sur un site web [LabMonVen03a.gecco]



# Les fourmis de l'espèce *Pachycondyla apicalis*



INBIOCRIO02278968. La Selva. Image by J. Longino Mar'99

D. Fresneau [Fre94]

# recherche de nourriture par les fourmis de l'espèce *Pachycondyla apicalis*



## Caractéristiques principale :

- petite population (<100)
- pas de marquage avec des phéromones
- mémorisation du site de la dernière capture
- déménagements du nid
- recrutement en tandem

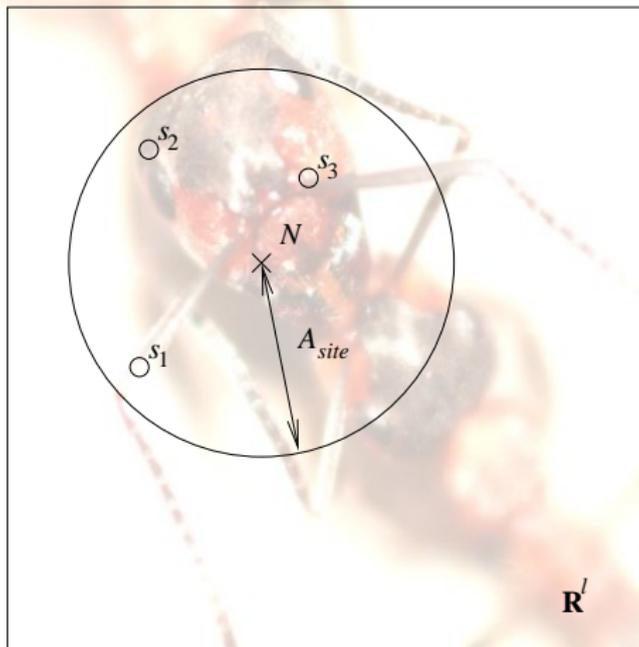
## → Algorithme API : Optimisation

### Principes

- site de chasse  $\Leftrightarrow$  point dans l'espace de recherche
- capture d'une proie  $\Leftrightarrow$  amélioration locale de la fonction objectif

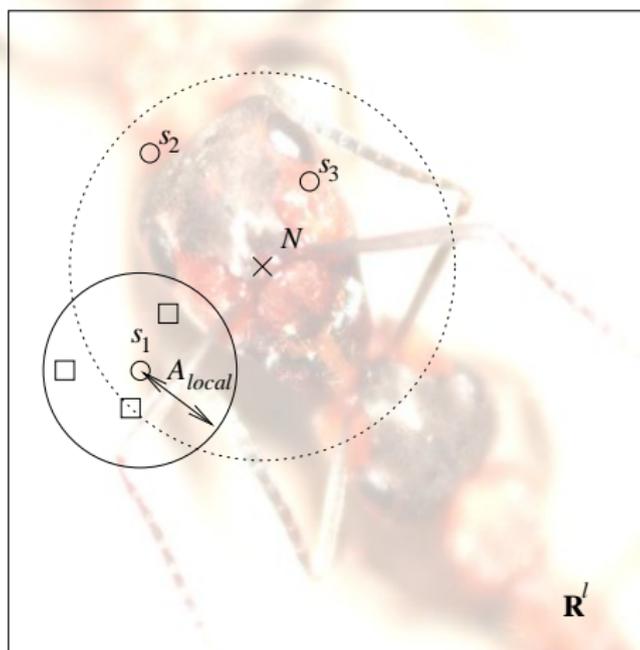
## → Algorithme API : Optimisation

## Comportement individuel :



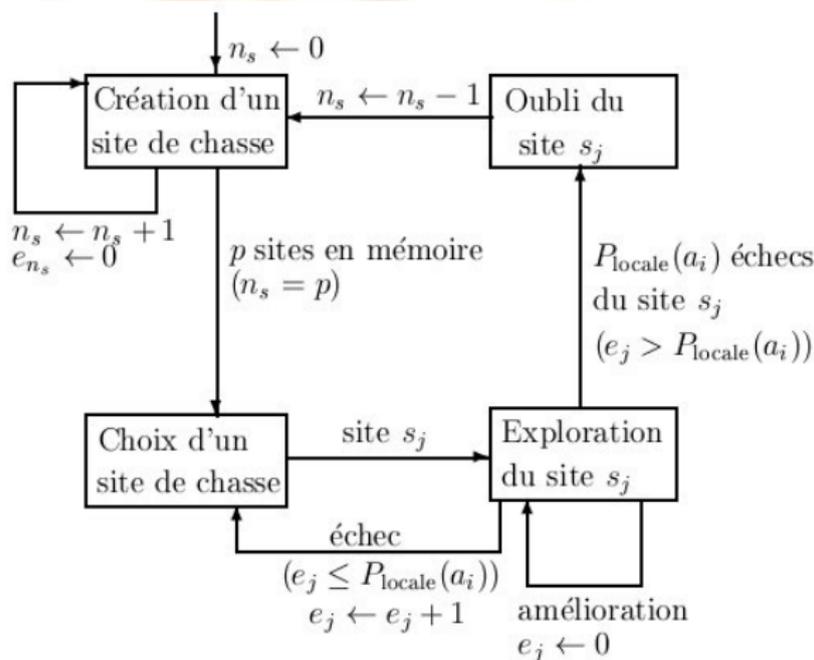
Création des sites de chasses  $s_1$ ,  $s_2$  et  $s_3$ .

## Comportement individuel :



Exploration locale autour du site  $s_1$ .

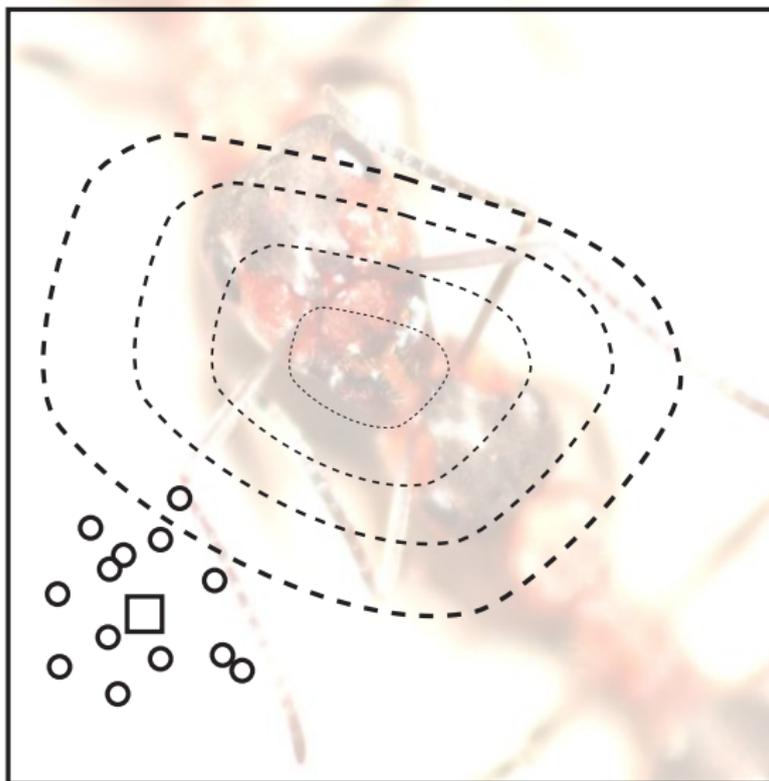
## Comportement individuel :



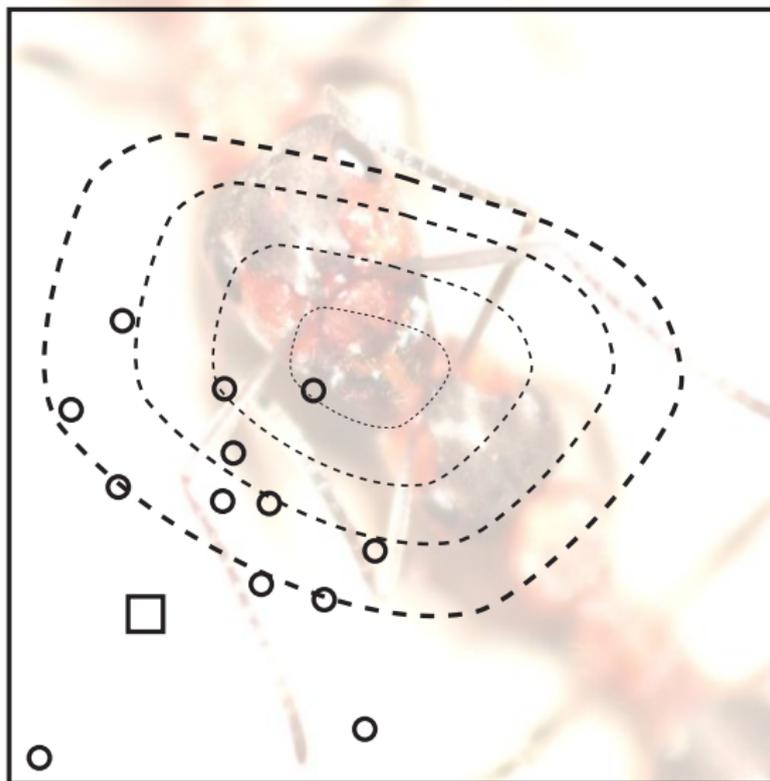
# Comportement collectif :



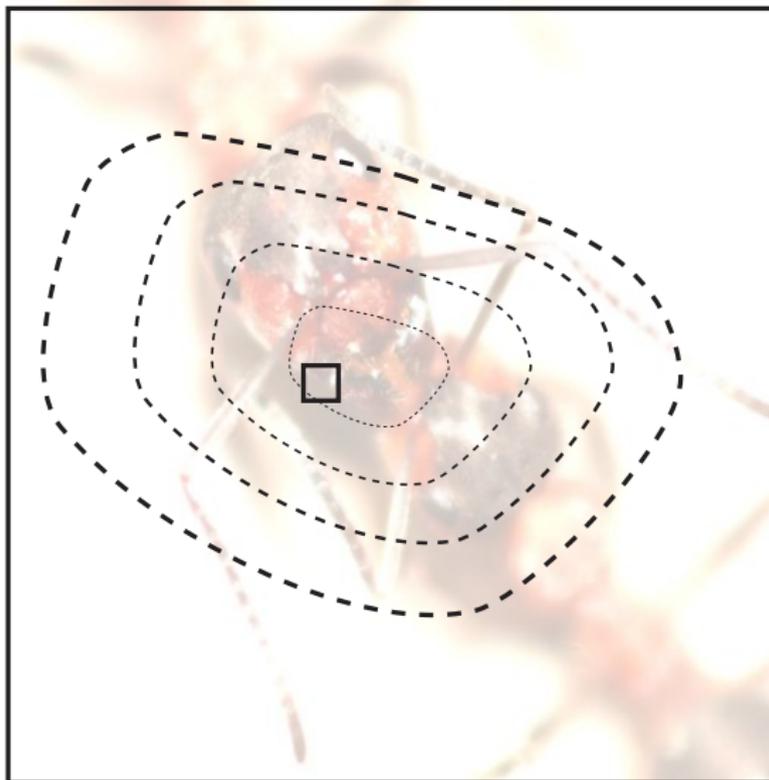
# Comportement collectif :



# Comportement collectif :



# Comportement collectif :

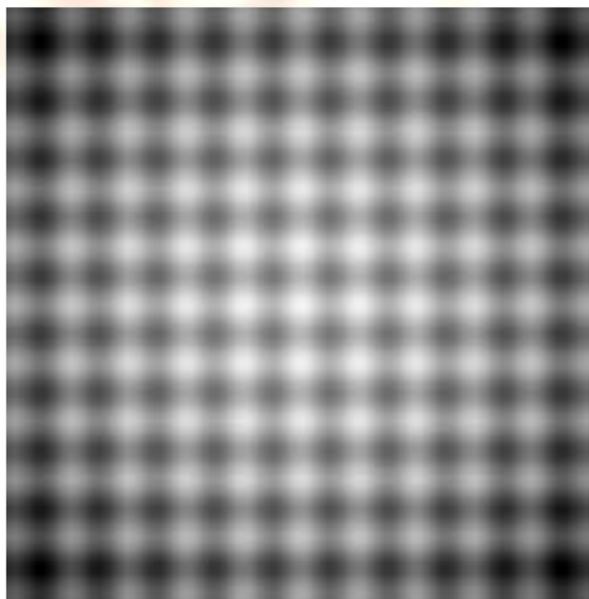


# L'algorithme API : extensions possibles

[Mon00a.phd]

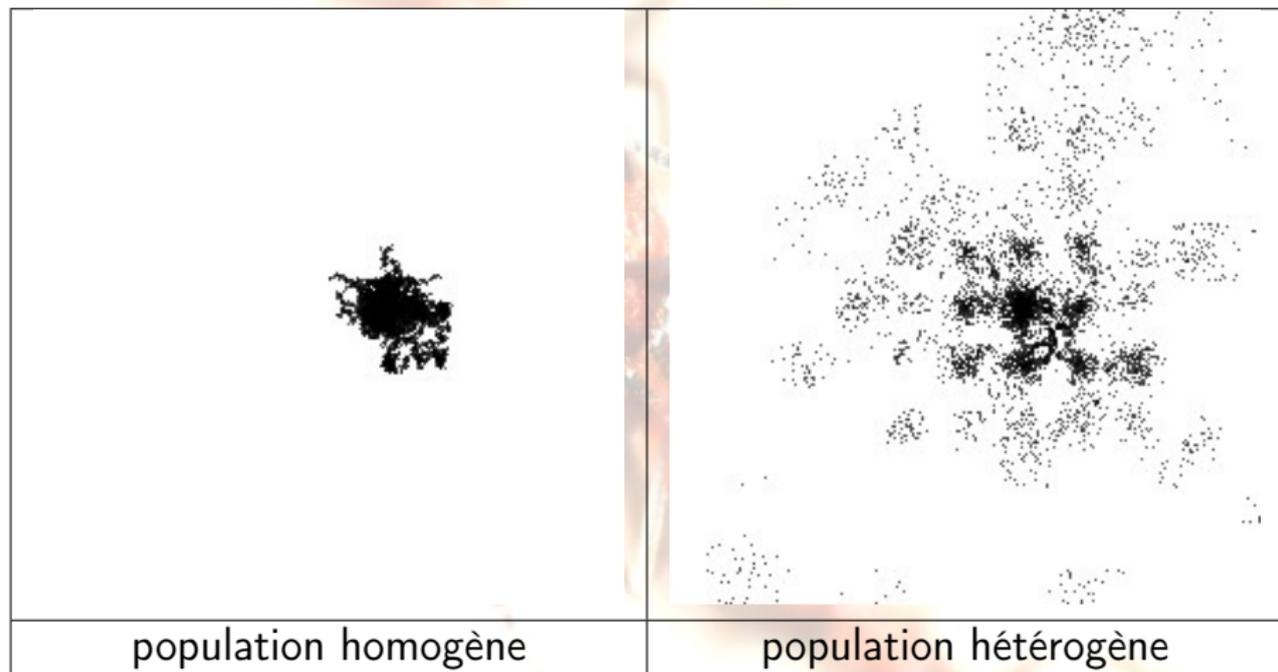
- probabilité de sortir du nid en fonction du succès
- différentes stratégies de recrutement (échange de mémoire)
- différentes stratégies de déplacement du nid
- variabilité des paramètres de chaque fourmi (amplitude, patience, ...)

# Optimisation numérique [MonVenSli00a.fgcs]



fonction de Griewank

$$\min_{x_i \in [-5.12, 5.11]} \left\{ 50 + \sum_{i=1}^5 (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)) \right\}$$



## Applications :

- apprentissage des poids d'un RNA
- optimisation combinatoire : PVC
- recherche d'information sur le web (Thèse F. Picarougne)
- apprentissage de chaînes de Markov cachées pour la reconnaissance d'images (Thèse S. Aupetit) [AupMonSli07a.ic2] :
  - ▶ hybridation avec l'algorithme de Baum-Welch
  - ▶ comparaison avec les AG et une PSO

## API pour l'apprentissage des Modèles de Markov Cachés (MMC)

- Apprentissage des MMC :

$$\lambda^* = \arg \max_{\lambda \in \Lambda} P(V = O | \lambda)$$

- 2 opérateurs sont à définir sur l'espace de recherche des MMC ( $N^2 + N \times M + M$  paramètres + contraintes de stochasticité) :
  - ▶ l'opérateur d'initialisation de la position initiale du nid
  - ▶ l'opérateur d'exploration
- optimisation locale (algorithme de Baum-Welch)

# Paramètres de API

- $\mathcal{N}$  (la taille de la colonie),
- $\mathcal{A}_{\text{site}}^i$  (l'amplitude d'exploration autour du nid pour le choix des sites de chasse),
- $\mathcal{A}_{\text{local}}^i$  (l'amplitude d'exploration autour d'un site de chasse),
- $\mathcal{T}_{\text{Déplacement}}$  (le nombre d'itérations entre deux déplacements du nid),
- $e_{\text{max}}$  (le nombre d'essais successifs infructueux pour un site de chasse avant de l'oublier),
- $\mathcal{N}_{\text{BW}}$  (le nombre d'itérations de l'algorithme de Baum-Welch).

# Perspectives de API

- algorithme robuste et simple à adapter (meta-heuristique) et à programmer
- comparaison avec d'autres méthodes basées sur des populations de solutions (algorithmes évolutionnaires, essais particuliers...) [AupMonSli07a.springer]
- modification de la structure de l'espace de recherche (pour réduire les contraintes, les symétries...) [AupMonSliLia05a.ea]

# Conclusion

- bien que les fourmis artificielles soient le plus souvent des agents réactifs, des développements plus « cognitifs » sont possibles (par exemple en robotique [BeuChaMonVen05a.cogni]) ou le collectif n'est pas la seule force
- de nombreux comportements des fourmis sont encore à développer sous forme de méta-heuristique, de robots...
- la réserve - potentielle - de 20 000 espèces laisse du travail...

# Conclusion

Pour aller plus loin :

- Bibliographie sur les fourmis artificielles :  
[<http://www.hant.li.univ-tours.fr/artantbib/artantbib.php>]
- Exposition « Les insectes artificiels » [LebForPurMonGauSliLas06a.ants]  
(muséum d'histoire naturelle de la ville de Tours) : du 1er octobre 2005 au 20 août 2006 : **Trop tard!!**  
[<http://www.hant.li.univ-tours.fr/museum>]
- Evolution Artificielle 2007 : Tours, du 29 au 31 octobre 2007  
<http://ea07.hant.li.univ-tours.fr>



Sébastien Aupetit, Nicolas Monmarché, and Mohamed Slimane.

Hidden Markov models training using population based metaheuristics.

In Zbigniew Michalewicz and Patrick Siarry, editors, *Advances in Metaheuristics for Hard Optimization*, Natural Computing Series. Springer, 2007.

to appear.



Sébastien Aupetit, Nicolas Monmarché, and Mohamed Slimane.

Utilisation des Modèles de Markov cachés pour la reconnaissance robuste d'images : apprentissage par colonie de fourmis, algorithme génétique et essaim particulaire.

In Patrick Siarry, editor, *Optimisation en traitement du signal et de l'image*, Traité IC2, chapter 9, pages 245–269. Hermès-Lavoisier, février 2007.



Sébastien Aupetit, Nicolas Monmarché, Mohamed Slimane, and Pierre Liardet.

An Exponential Representation in the API Algorithm for Hidden Markov Models Training.

In El-Ghazali Talbi, Pierre Liardet, Pierre Collet, Evelyne Lutton, and Marc Schoenauer, editors, *Artificial Evolution : 7th International Conference, Evolution Artificielle, EA 2005, Lille, France, October 26-28, 2005, Revised Selected Papers*, volume 3871 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 61–72, Lille, France, 2006. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.



Guy Beugnon, Stéphane Chameron, Nicolas Monmarché, and Gilles Venturini.

Systèmes de navigation autonomes : de la fourmi au robot.

In C. Thinus-Blanc and J. Bullier, editors, *Agir dans l'espace*, Cognitique, chapter 10, pages 193–213. édition de la maison des sciences de l'homme edition, 2005.



D. Fresneau.

*Biologie et comportement social d'une fourmi ponérine néotropicale (Pachycondyla apicalis)*.

Thèse d'état, Université de Paris XIII, Laboratoire d'Ethologie Expérimentale et Comparée, France, 1994.



P.P. Grassé.

La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *bellicositermes natalensis* et *cubitermes sp.* la théorie de la stigmergie : essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs.

*Insectes Sociaux*, 6 :41–80, 1959.



Nicolas Labroche, Nicolas Monmarché, and Gilles Venturini.

**AntClust : Ant Clustering and Web Usage Mining.**

In Erick Cantu-Paz, editor, *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, volume 2723 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 25–36, Chicago, july 12-16 2003. Springer-Verlag Telos.



Nicolas Labroche, Nicolas Monmarché, and Gilles Venturini.

**Visual clustering with artificial ants colonies.**

In V. Palade, R.J. Howlett, L.C. Jain, and C. Lakhmi, editors, *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems : Seventh International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information & Engineering Systems (KES 2003)*, volume 2773 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 332–338, Oxford, UK, September, 3-5 2003. Springer Berlin/Heidelberg.



Nicolas Labroche, Fredy-Jeanne Richard, Nicolas Monmarché, Alain Lenoir, and Gilles Venturini.

**Modelling of the chemical recognition system of ants.**

In C. K. Hemelrijk, editor, *International Workshop on Self-Organization and Evolution of Social Behaviour*, pages 283–292, Monte Verità, Ascona, Switzerland, September 8-13 2002.



Pierre Lebocey, Julie Fortune, Arnaud Puret, Nicolas Monmarché, Pierre Gaucher, Mohamed Slimane, and Didier Lastu.

**On the Popularization of Artificial Insects : an interactive exhibition for a wide audience to explain and demonstrate computer science and robotic problem solving taking inspiration of insects.**

In M. Dorigo, L.M. Gambardella, M. Birattari, A. Martinoli, R. Poli, and T. Stützle, editors, *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, 5th International Workshop, ANTS 2006*, volume 4150 of *Lecture Notes in Computer Science*, Bruxelles, Belgium, September 5-7 2006. Springer-Verlag.



Nicolas Monmarché.

***Algorithmes de fourmis artificielles : applications à la classification et à l'optimisation.***

Thèse de doctorat, Laboratoire d'Informatique, Université de Tours, décembre 2000.



Nicolas Monmarché, Gilles Venturini, and Mohamed Slimane.

**On how *Pachycondyla apicalis* ants suggest a new search algorithm.**

*Future Generation Computer Systems*, 16(8) :937–946, 2000.