

# Phéromones Digitales

Résolution de problèmes multi-agents  
situés par marquage de l'environnement

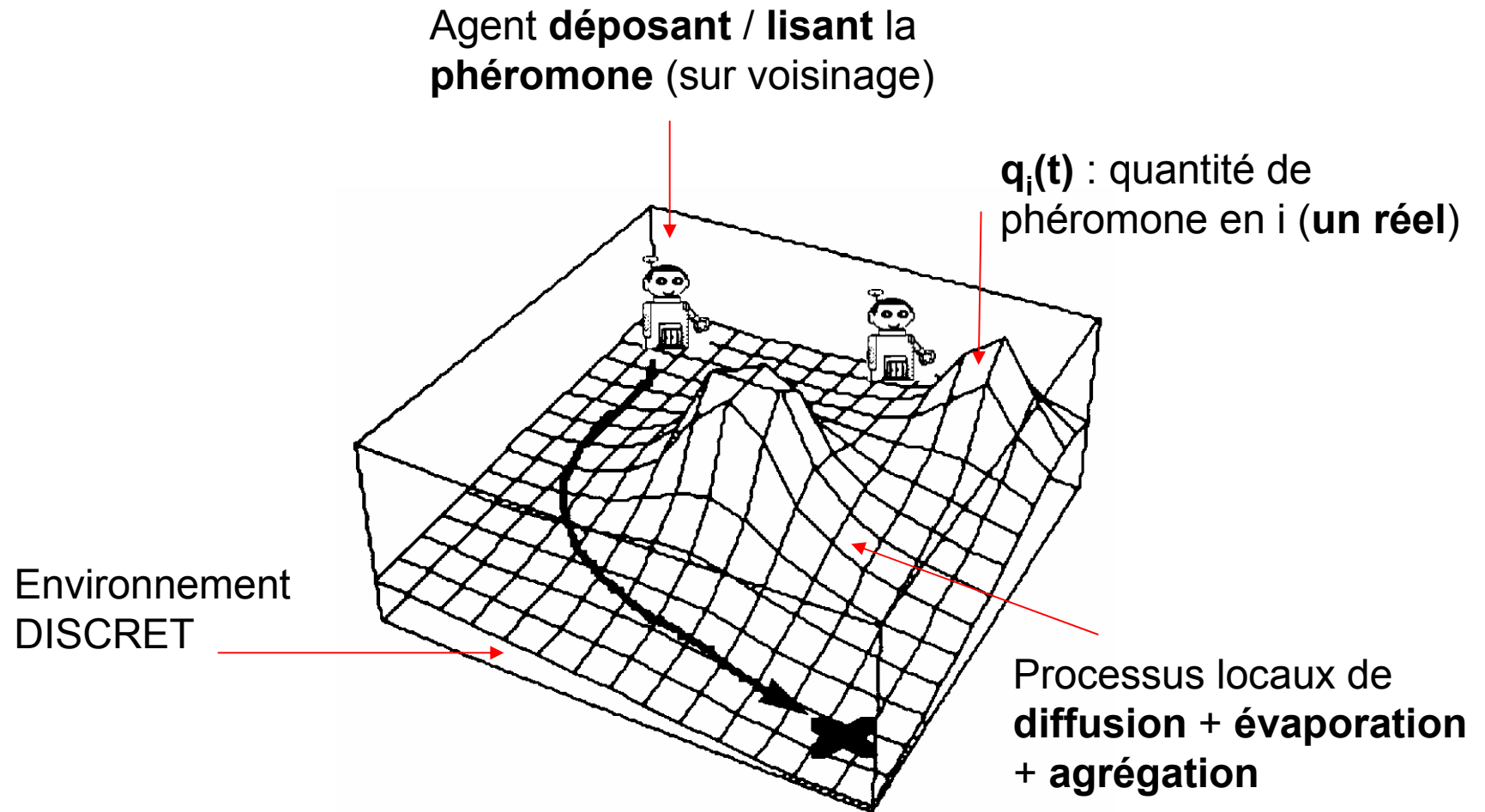
Séminaire Amorphous Computing

INRIA Futurs 18 juillet

*Olivier Simonin*

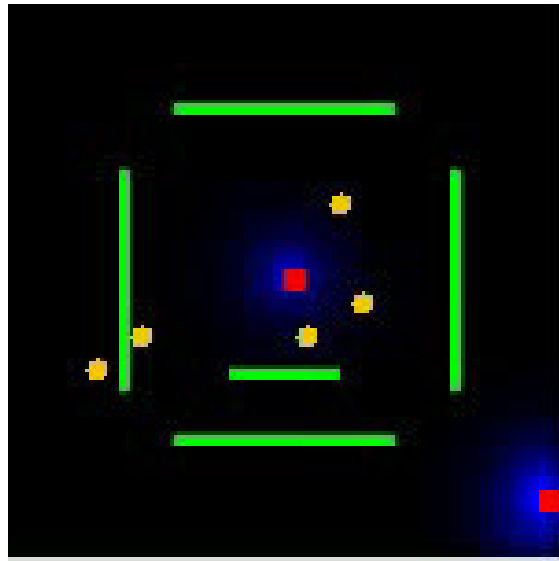


# Présentation intuitive



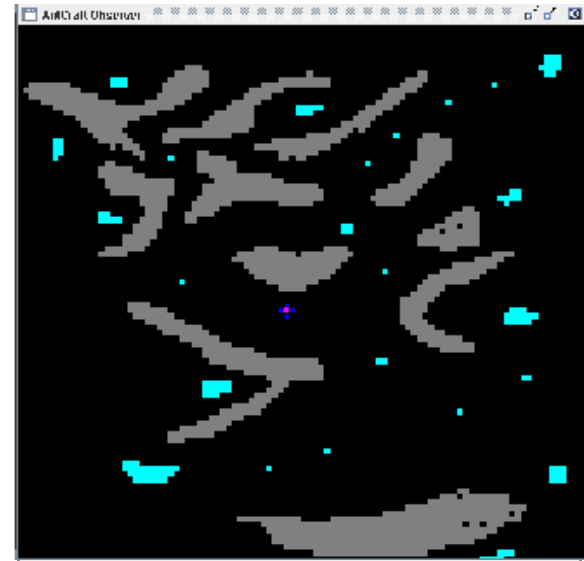
# Illustration de résolution de problèmes avec phéromones

Path planning avec 2 buts 1 Pheromone



(MAIA 07)

Foraging avec 2 pheromones



(basé sur Panait-Luke 04)

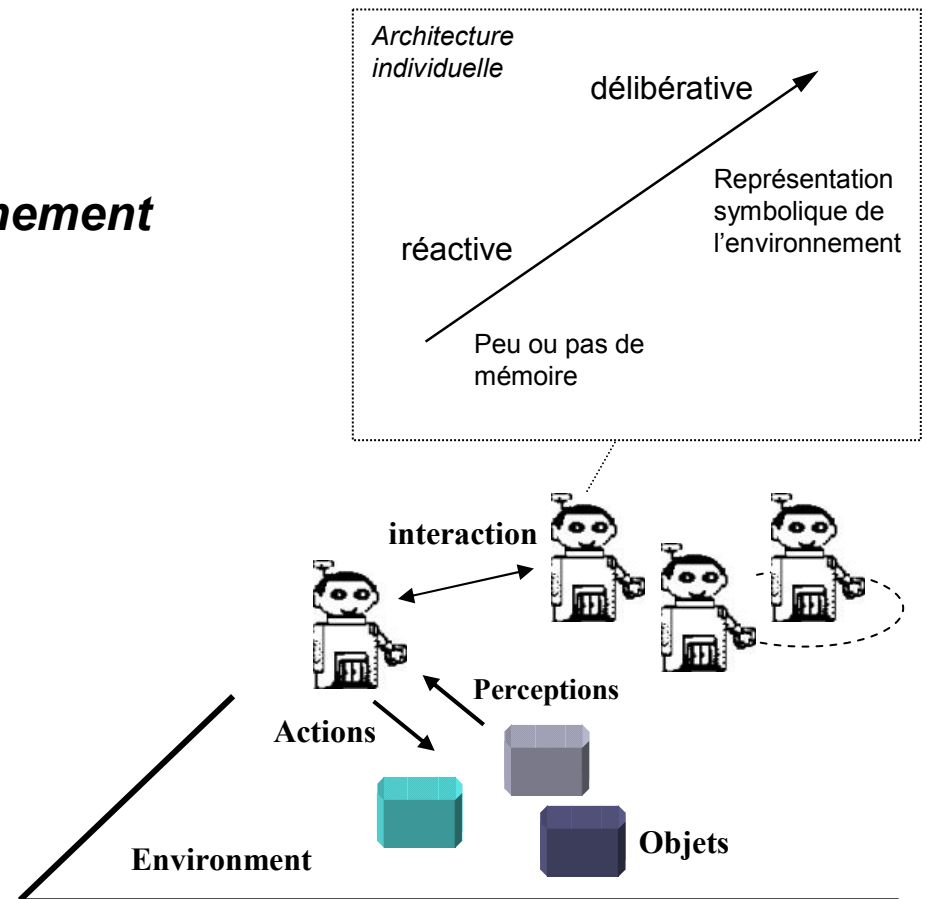
# Systemes Multi-Agents situés

Systeme composé

d'**entités autonomes** (les agents)  
en **interactions** dans un **environnement**  
commun pour réaliser des **tâches**  
individuelles ou communes

Propriétés

- Systeme **décentralisé**  
(non supervisé)
- Autonomie (**pro-activité**)  
des agents



# SMA Réactifs

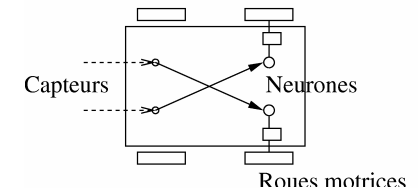
Agent réactif :

sans processus délibératifs

actions **réflexes** =  $F(\text{percepts})$

**perception** très locale

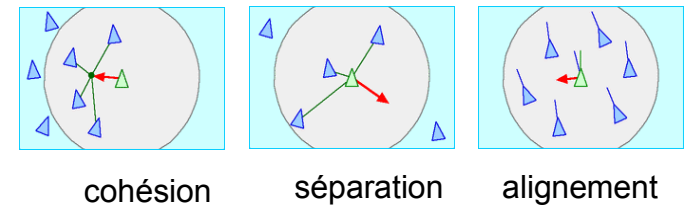
**communication indirecte** via l'environnement



Propriétés des SMAR

- Systèmes **massivement parallèles**
  - **Auto-organisés**: intelligence collective
  - **Bio-inspirés** (bottom-up), **Phisico-inspirés**
- **Cooperative Computing**

**Minsky, Reynolds, Brooks, Steels, Ferber, Mataric,...**  
(since 1986)





# Plan

1. SMA + Phéromones: bref historique
2. Processus de diffusion et d'évaporation
3. Applications
4. Quelques questions



# Plan

1. **SMA + Pheromones: bref historique**
2. Processus de diffusion et d'évaporation
3. Applications
4. Quelques questions

# Un modèle bio-inspiré



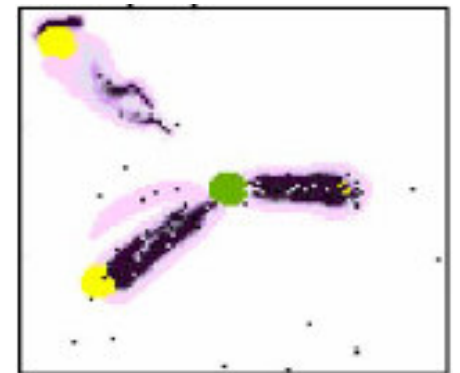
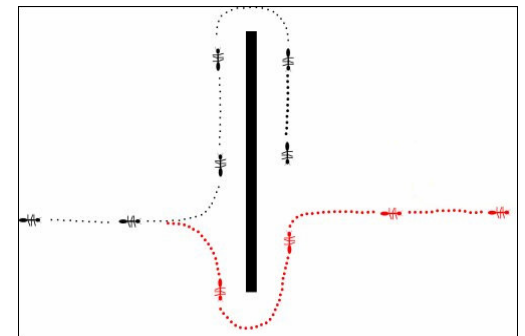
**Phéromones** naturelles chez les insectes sociaux:

Substance chimique servant de moyen de communication indirect entre individus

**Origine des Systèmes Multi-Agents Réactifs (SMAR)**

→ **Résolution Collective de problèmes**

- The Bridge problem (fourmis)  
Deneubourg 86
- Etude du Fourragement chez les fourmis  
Deneubourg-Goss 89, Dorigo-Colorni 91
- Simulation d'une fourmilière  
Drogoul-Corbara-Ferber 93



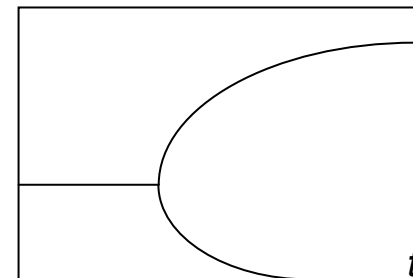
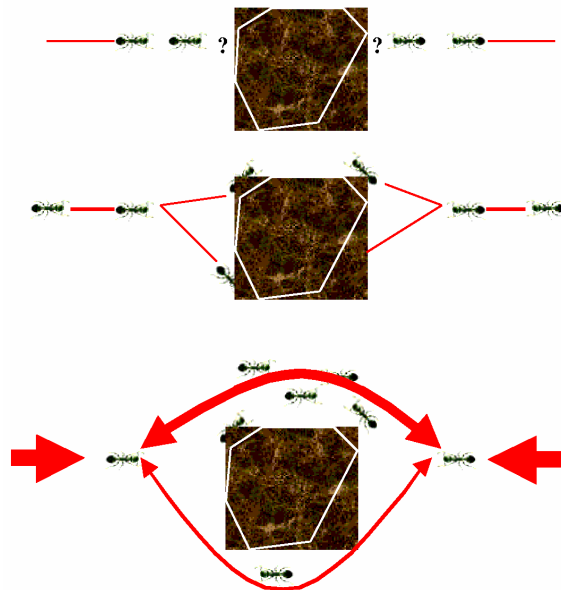


# The bridge problem

Chaque fourmis dépose de la phéromone  $P$  sur son parcours

Les fourmis sont attirées par la phéromone

**Évaporation + distance** → *sélection du chemin le plus court*



[Deneubourg and Goss 89]

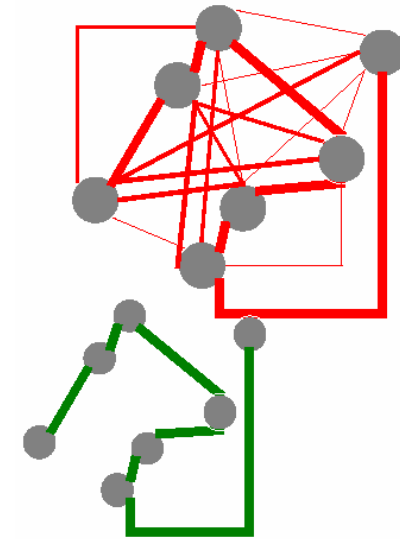
[Beckers et al 90]

# ACO Ant Colony Optimisation

*Dorigo et al 91*

- A chaque arc est attribué un poids ( $\eta=1/d$ ) et un taux de phéromone ( $\tau$ )
- Une itération consiste à faire parcourir un tour complet des villes à toutes les fourmis, selon une règle probabiliste favorisant les arcs les plus courts et les plus riches en phéromones
- Environnement = Graphe

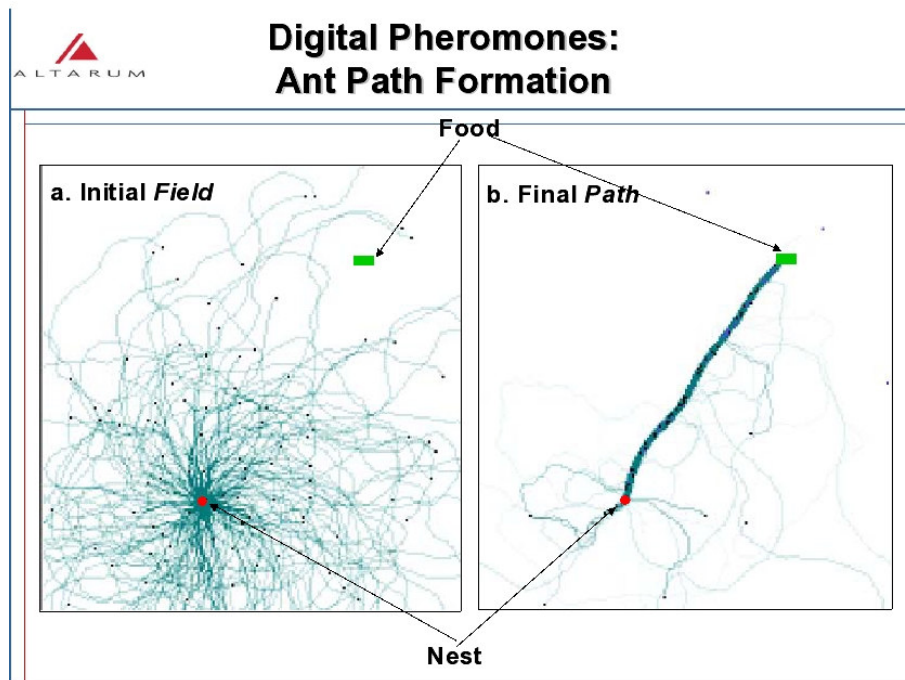
*Efficace sur TSP dynamique mais convergence difficile à prouver*



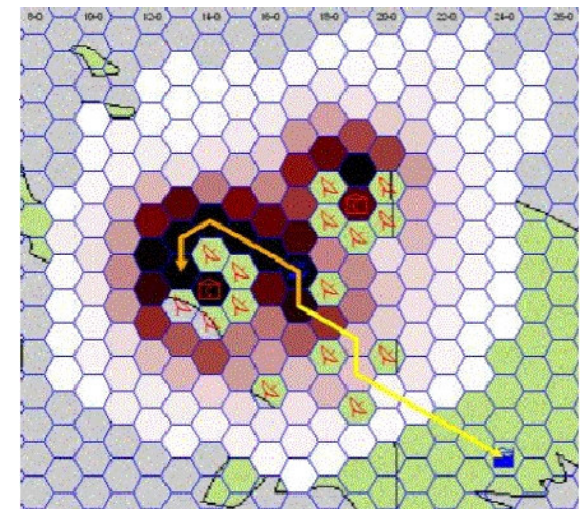
$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha \cdot (\eta_{ij}(t))^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} ((\tau_{il}(t))^\alpha \cdot (\eta_{il}(t))^\beta)} & \text{si } j \in J_i^k \\ 0 & \text{si } j \notin J_i^k \end{cases}$$

# Retour aux problèmes spatialisés (situés)

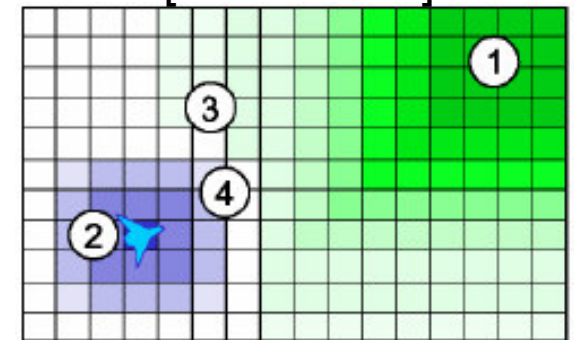
V. D. Parunak 98-07



Mondes grilles  
[Parunak 02]



[Parunak 05]



(exploite la **diffusion**)

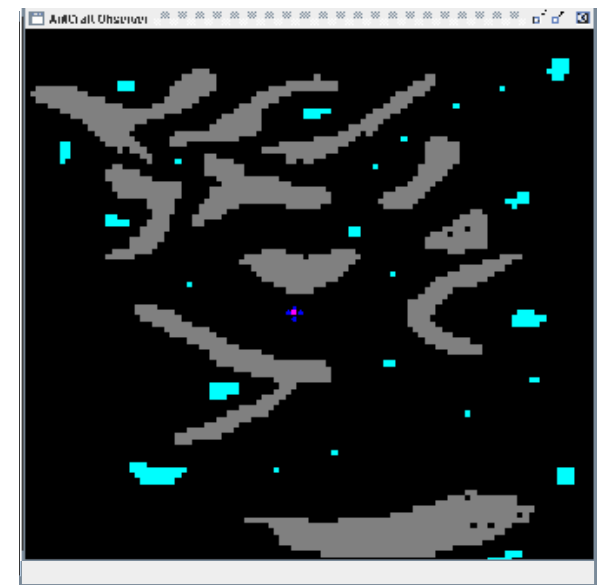
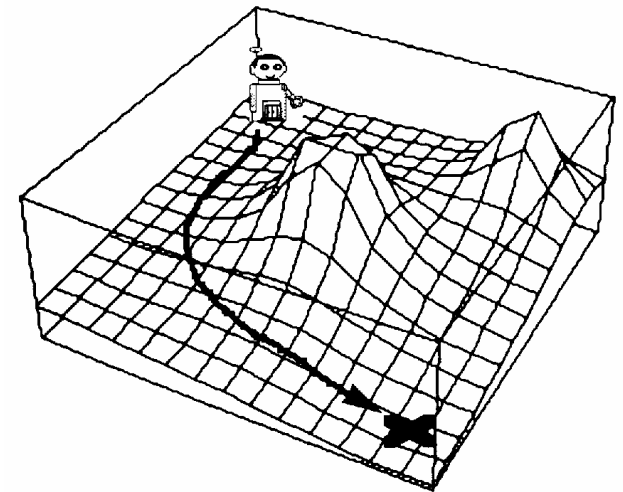
# Comportements réactifs

## intérêts et limites

- **Tropismes:** montée/descente de gradients

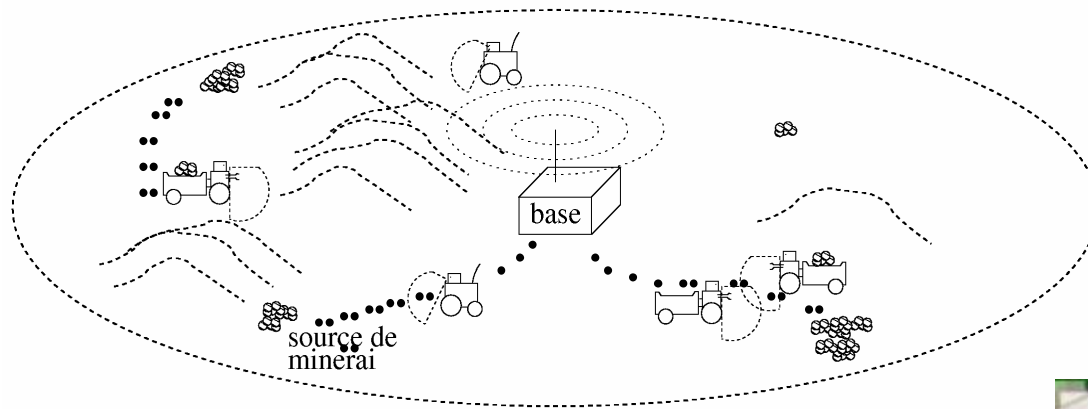
$$\vec{F}(pos) = \pm \vec{\nabla}U(pos)$$

- Paramétrage empirique ou appris (GA, renforcement)
- Problème des **minima locaux**..
- Applications: Path-planning, Foraging, Poursuite, etc.



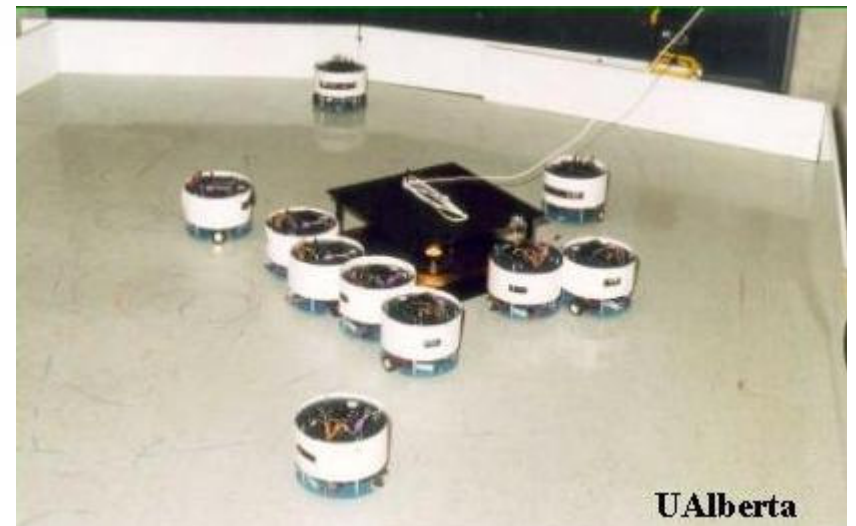
# Robotique collective

## Marquage & Signaux

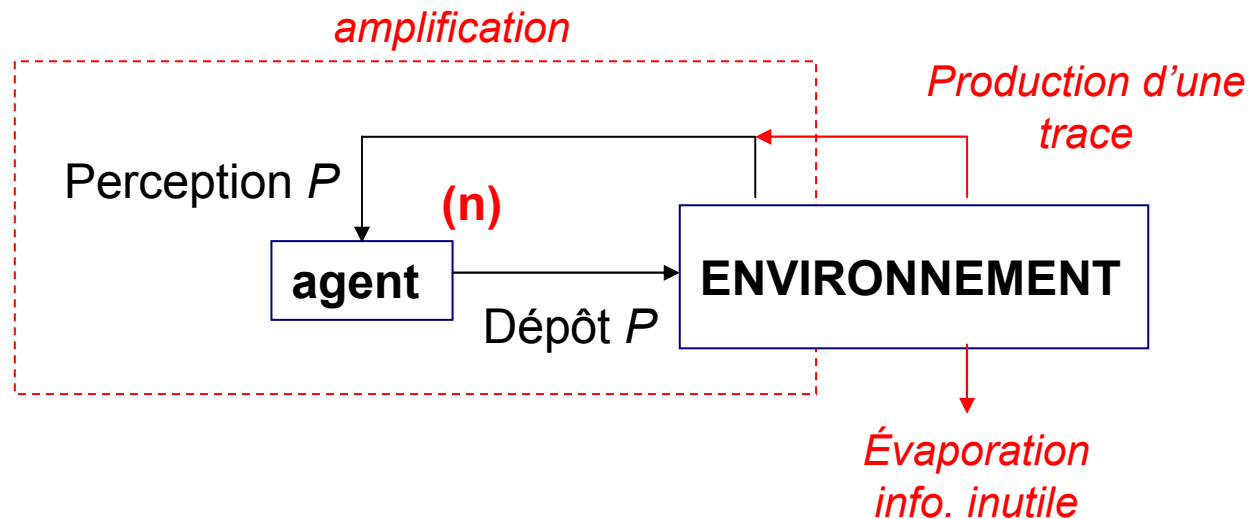


*Ferber, Drogoul 94, Mataric 94..*

- Dépôt de marques, de balises
- Inscription de phéromones dans une représentation centralisée de l'environnement
- ...



# Bilan: principe de stigmergie (avec phéromone)



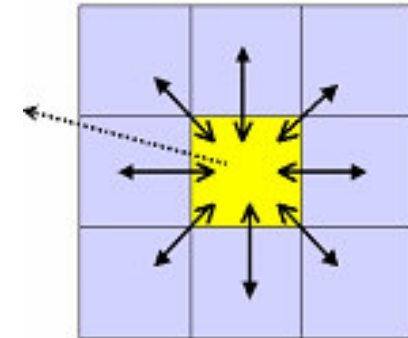


# Plan

1. SMA + Phéromones: bref historique
2. **Processus de diffusion et d'évaporation**
3. Applications
4. Quelques questions

# Formules..

- Espace 2D discret
- Voisinage **8** connexité (ou 4)
- à t, la quantité de phéromones présente dans une cellule



**se diffuse** : coef de diffusion  $\rho$

$$q_i(t+1) = (1 - \rho) \cdot q_i(t) + \sum_{j=1..n} (\rho / n) \cdot q_j(t)$$

**s'évapore** : taux d'évaporation  $\sigma$

$$q_i(t+1) = (1 - \sigma) \cdot q_i(t)$$

s'additionnent éventuellement à un apport  $H(t+1)$



# Simulation..

- On trouve dans la littérature parfois cette fonction

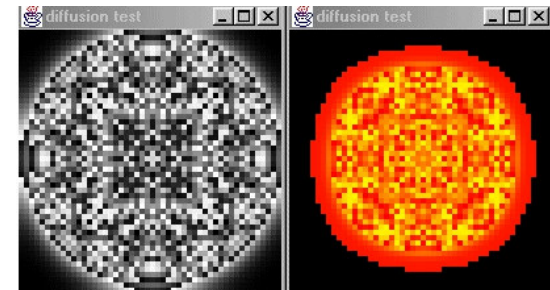
$$q_i(t+1) = (1 - \sigma).q_i(t) + (1 - \rho).q_i(t) + \sum_{j=1..n} (\rho / n).q_j(t) [ + H(t+1) ]$$

codée par

$$\begin{aligned} \forall i \quad q_i(t+0.5) &= (1 - \rho).q_i(t) + \sum_{j=1..n} (\rho / n).q_j(t) && \text{avec buffer} \\ \forall i \quad q_i(t+1) &= (1 - \sigma).q_i(t+0.5) \end{aligned}$$

!!!

- Simulation synchrone  
pour modèle asynchrone ?



Diffusion d'une unité de phéromone  
(TurtleKit – Madkit)

# Processus d'évaporation

Évaporation en fonction du temps:  $\sigma$  in  $]0;1[$

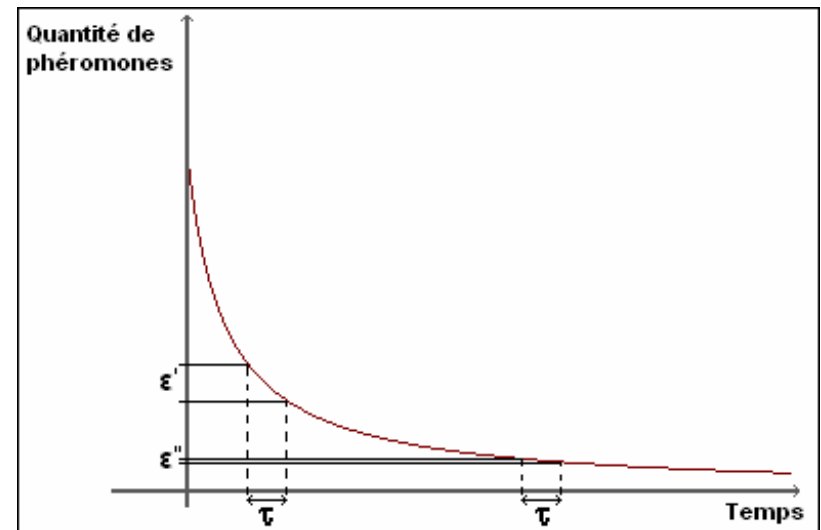
$$q(t+1) = (1 - \sigma) \cdot q(t) = c \cdot q(t)$$

Quantité de phéromone présente au temps  $t$  avec une quantité initiale  $q_0$ :

$$q(t) = c^{t-t_0} \cdot q_0$$

Durée après laquelle la quantité de phéromone descend sous le seuil  $\epsilon$ :

$$t = \log(\epsilon/q_0)/\log(c)$$



# Processus de diffusion

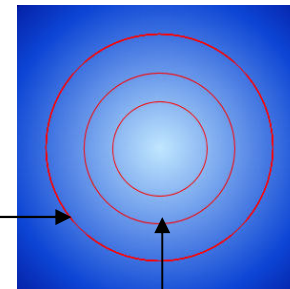
Diffusion en fonction du temps (sans évaporation):  $\rho$  in  $[0;1]$

$$q_i(t+1) = (1-\rho).q_i(t) + \sum_{j=1..n} (\rho/n).q_j(t)$$

## Valeur en périphérie du champ:

Progression d'une cellule par itération

$$q_{\min} = q_0.(d/n)^t$$



## Calcul de la valeur des autres cellules

Approximation numérique

(Équation aux dérivées partielles en espace continu)

# Éléments de complexité

En général on considère le nombre d'états par cellule *infini*

Si on prend un nombre fini d'états par cellule (basé sur l'évaporation)

$$\text{nbEtatsCell} = \log(\varepsilon/q_0)/\log(1-\sigma)$$

un environnement de taille n cellules aura **nbEtatsCell<sup>n</sup>** états possibles

## Application numérique:

environnement 20x20 cellules, dépôt  $q_0$  de 100 unités de phéromone

évaporation  $\sigma = 0.005$ , seuil  $\varepsilon = 1$

$(\log(1/100)/\log(1-0,005))^{400} \approx \mathbf{2,39 \times 10^{296}}$  états possibles



# Plan

1. SMA + Phéromones: bref historique
2. Processus de diffusion et d'évaporation
3. **Applications**
4. Quelques questions

# 1. Path Planning

## Lien avec le contrôle par potentiels harmoniques:

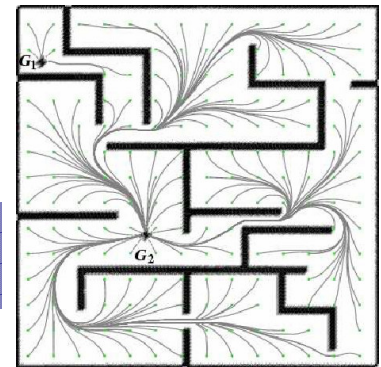
*Le contrôle par potentiels harmoniques est un cas particulier de contrôle optimal (cf. B.Scherrer, A.Boumaza 07)*

## Fonction harmonique discrète:

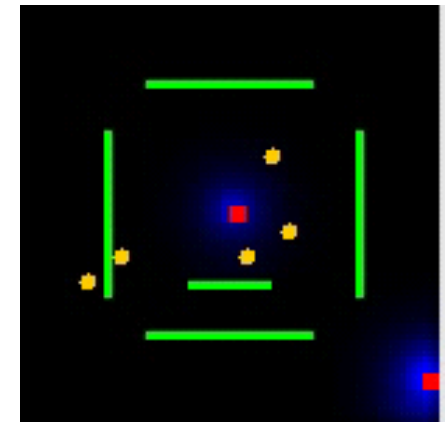
$$f(x,y) = 1/4 \cdot (f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1))$$

## Equation de *diffusion* en 4-connexité:

$$f(x,y)_{t+1} = d/4 \cdot (f(x+1, y)_t + f(x-1, y)_t + f(x, y+1)_t + f(x, y-1)_t) + (1-d) \cdot f(x,y)_t$$



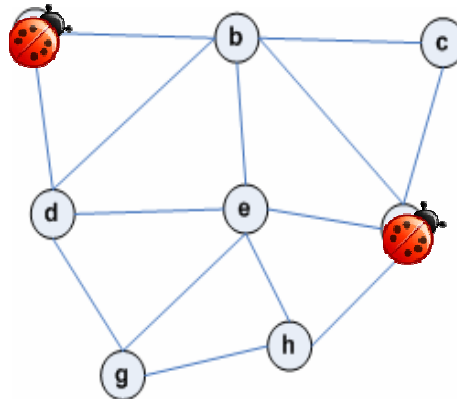
- Intérêts Phéromones:  
adaptation automatique en temps réel à un environnement dynamique



## 2. Patrouille multi-agent : définition

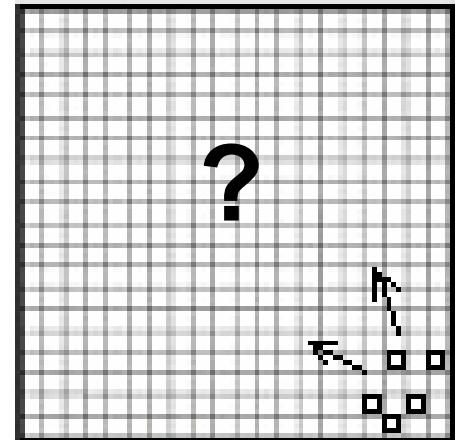
- Environnement fini E (généralement un graphe donné)
- N agents coopératifs, avec perception limitée
- Objectif: **visiter régulièrement** l'ensemble des lieux accessibles de E.

➔ Minimiser le délai entre deux visites d'un même lieu  
Critère d'optimisation = oisiveté moyenne, max..



# Patrouiller en environnements inconnus / incertains

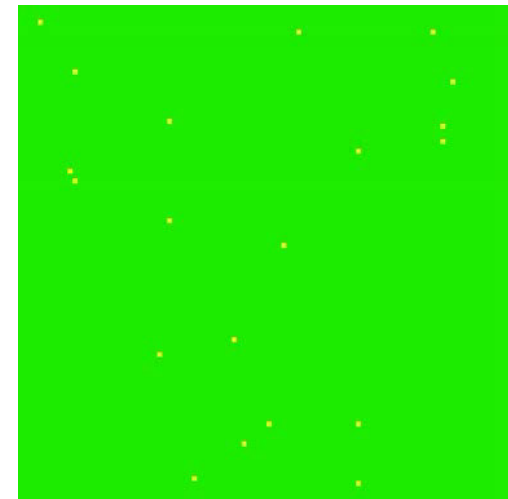
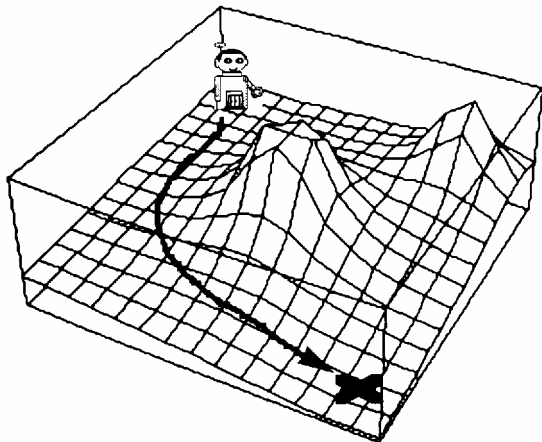
- Besoin de robustesse et d'auto-adaptation (évolution temps réel des contraintes)
- Hypothèses:
  - robots mobiles simples
  - carte de l'environnement absente ou partielle → grille vide





# EVAP: approche par dépôt-évaporation d'une phéromone

- EVAP: un modèle exploitant uniquement le processus d'évaporation
  - visite = dépôt d'une phéromone
  - oisiveté = évaporation
  - comportement (heuristique) = descente du gradient

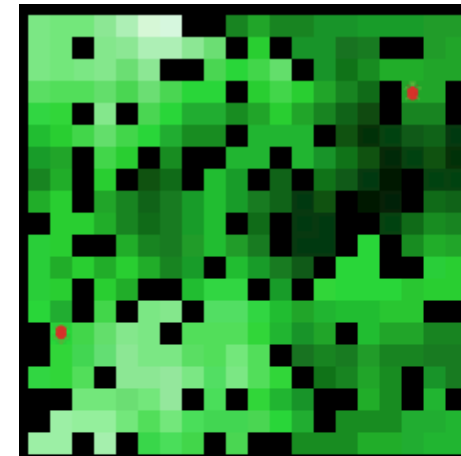


# Projet SCOUT déploiement robotique

## STIC-ASIE TAO-MAIA-IFI-IRD-MICA..

- Etude d' EVAP  
(4 connexité)

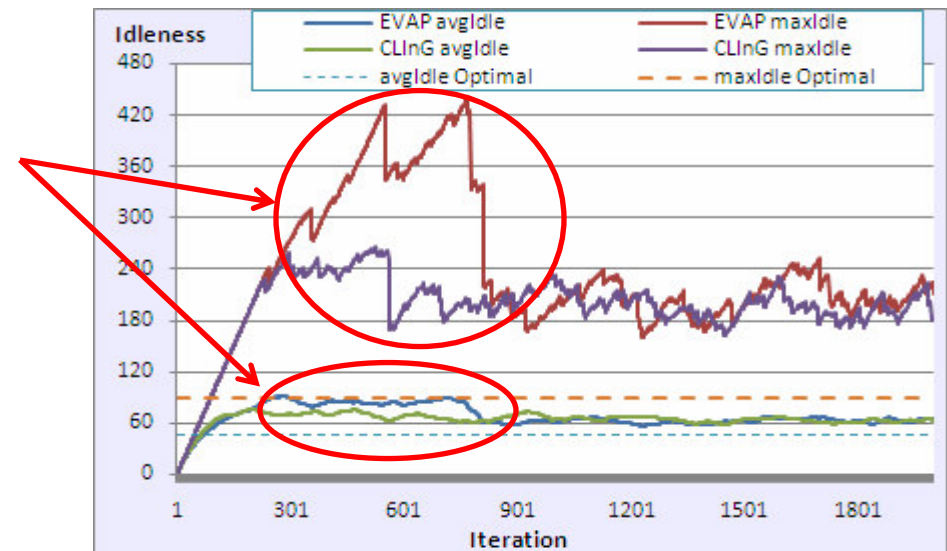
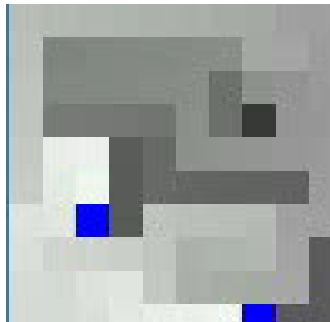
vs. CLING (Sempé & Drogoul 03)  
Propagation d'info. par l'environnement



A. Glad, H. Chu, O. Simonin, F. Sempé, A. Drogoul, F. Charpillet, Méthodes réactives pour le problème de la patrouille, informations propagées vs. dépôt d'informations, JFSMA'07

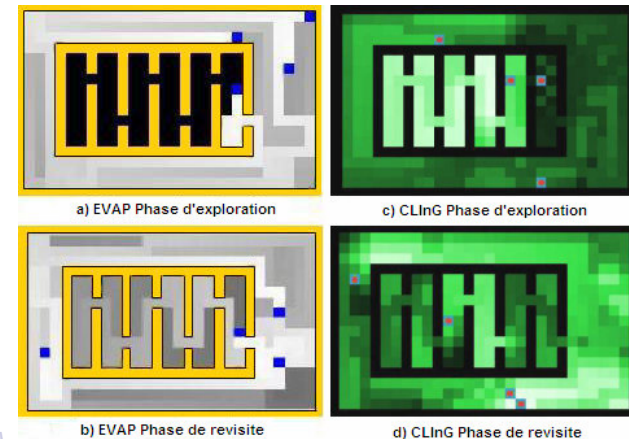
# EVAP: principaux résultats (1/2)

- Apparition de 2 phases:
  - exploration
  - Patrouille (optimale)
- Emergence de cycles



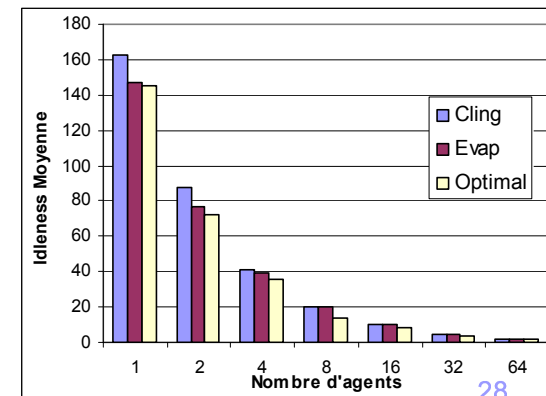
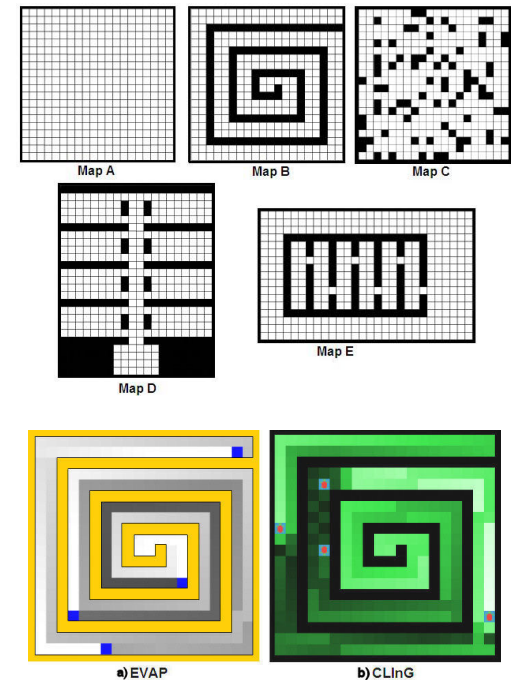
Pièces imbriquées (E), 4 agents, 2000 itérations

- Cas d'étude discriminant:  
N-pièces imbriqués



# EVAP: principaux résultats (2/2)

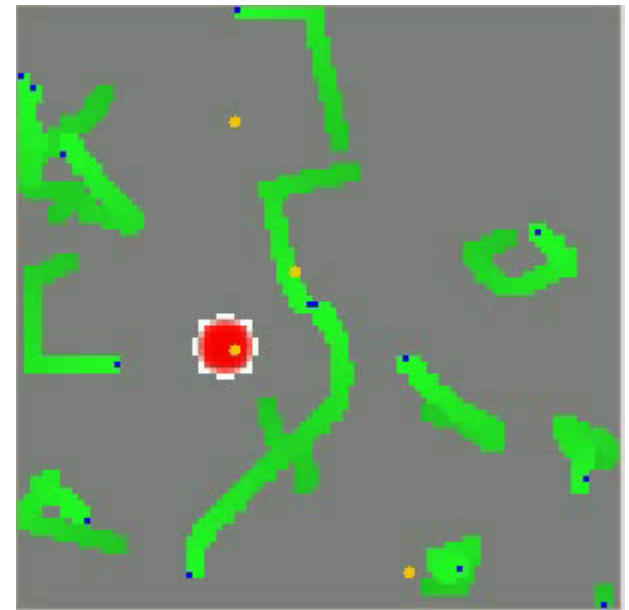
- Des environnements de complexité croissante
  - EVAP optimal sur Spirale et Couloir-Pièces
  - Émergence de cycles
  - Pas d'hypothèses sur l'environnement
- Robuste au bruit
  - Simulation du bruit sur capteurs et effecteurs
- Passage à l'échelle



# 3. SMAART Poursuite & patrouille

## PEA DGA-MAIA

- Environnement borné
- Des intrus PO à intercepter
- Détection d'intrus (capteurs) =>
  - dépôt phéromone Alarme
  - diffusion = bulle de déplacement probable
- N drones
  - Patrouille = EVAP
  - Poursuite = remonter grad. Alarme (et le consommer)





# Plan

1. SMA + Phéromones: bref historique
2. Processus de diffusion et d'évaporation
3. Applications
4. **Quelques questions**

# Phéromones + SMA: Amorphous computing ?

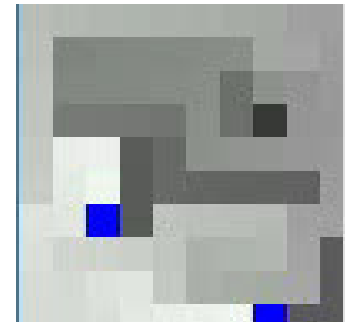


- Programmation de comportements émergents
  - **Briques élémentaires** : connexion avec langage GPL ?
  - Impact du **calcul synchrone / asynchrone** ?
    - Processus de diffusion / évaporation
    - Scheduling des agents (Michel 05)
  
- Calcul via l'environnement
  - Calcul émergent: feedback agents-environnement (Muller 03)
  - Convergence vers un comportement global cohérent ?
  - Quid de l'optimalité

# EVAP: Émergence et convergence ?

## ■ Auto-organisation

- Émergence: répartition spatiale des agents ?
- Convergence vers des cycles: systématique ?
- Solutions efficaces ?
- Robuste ?



## ■ Preuves formelles..?

- Couverture: visite une fois de toutes les cellules accessibles
- Patrouille: nombre de visite  $\infty$  de chaque cellule
- ..

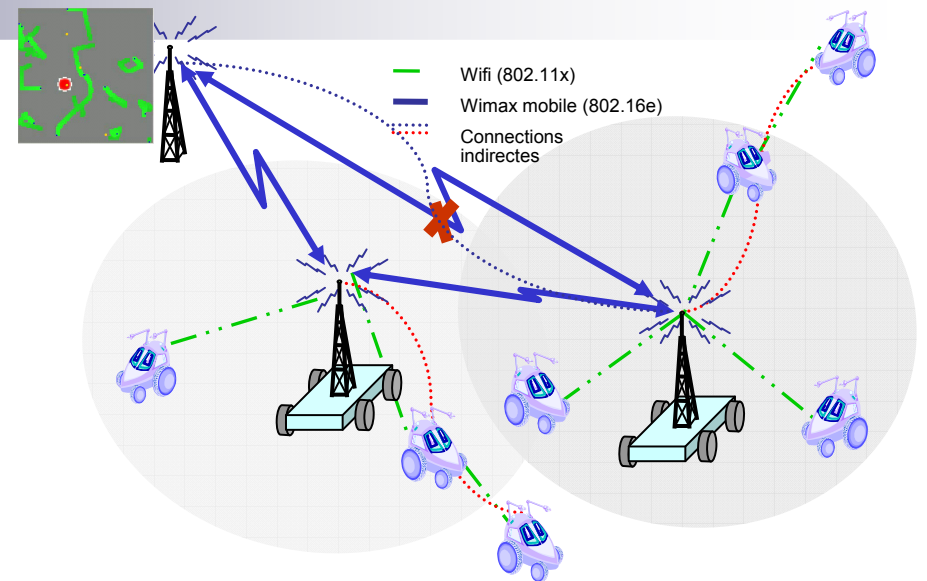




# Vers l'implémentation matérielle

- Phéromones: calcul distribué massivement parallèle
  - sur carte type FPGA
  - sur « grille » de calcul
  - avec une forme d'AC ?
- Implémentation dans l'environnement réel ?

# Robots et Phéromones..



- Des robots mobiles qui interagissent avec
  - une **Map partagée**:  
*besoin de communication et de localisation*
  - des Balises – marques - **substances**: *réaliste ?*  
*tag RFID*
  - un **Réseau de capteurs** ?  
Poussière de capteurs (Smart sensors)
  - en environnement intelligent ?  
[Zambonelli 04]

