

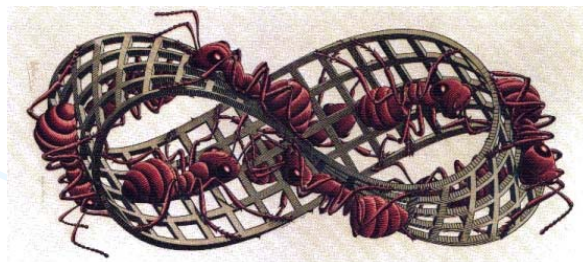
# L'intelligence artificielle en essaim

Joël Quinqueton  
Université Paul Valéry  
Cerics et Lirimm, Montpellier

## L'intelligence de l'essaim

Swarm intelligence

Quand l'intelligence vient du collectif



9/12/2004

Fing Intelligence Collective



# Les coactones

- Toute substance chimique responsable d'une interaction entre deux organismes (Florkin)
- Phéromone, du grec *pherein* (transporter) et *hormân* (exciter)
- En Anglais *pheromone*
- Substance spécifique d'une espèce.
- Se trouve chez les insectes et les vertébrés

9/12/2004

Fing Intelligence Collective



# Les phéromones des insectes

- Sexuelles:
  - papillon femelle *bombyx mori* (quelques molécules suffisent)
  - Papillon *Porthetria dispar* (capture des mâles)
  - Blatte *Periplaneta americana* ( $10^{-14}\mu\text{g}$ )
  - Reine des abeilles: la « substance royale »
    - transmise par échange de nourriture
    - attire les bourdons
    - inhibe l'ovogénèse chez les ouvrières
- Alarme et défense
  - Abeilles: acétate d'isoamyle
  - Fourmis: nombreuses substances

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# Les phéromones des vertébrés

- Marquage de territoire, reconnaissance de l'espèce, accouplement
- Glandes à parfum du chevrotain porte musc
- Civettone de la civette, du rat d'Amérique, chez des canards, certaines tortues et des alligators
- Daim, souris mâle
- Chez les primates: lié à l'odorat, en débat actuellement

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# Notion de Stigmergie

- Les échanges d'informations passent par une modification de l'environnement
  - concentrations locales de phéromones
- baptisé Stigmergie par P.P. Grassé en 1959
  - « La théorie de la Stigmergie : Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. », Insectes Sociaux, 6, 1959, p. 41-80.
  - *stigma* = piquêre
  - *ergon* = travail, œuvre
  - oeuvre stimulante: L'ouvrier ne dirige pas son travail, il est guidé par lui.

9/12/2004

Fing Intelligence Collective



## Le comportement

- Regroupement des cadavres
  - Similaire au regroupement des copeaux chez les termites
  - Pas de dépôt de phéromone nécessaire
  - Vision locale: on obtient plusieurs tas
- Recherche de nourriture
  - Ramener le plus efficacement possible de la nourriture au nid
  - Dépôt de phéromone

9/12/2004

Fing Intelligence Collective



## Les araignées sociales

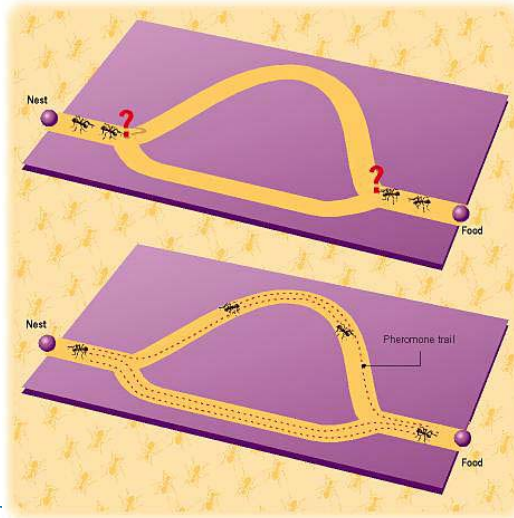
- ~15 espèces d'araignées sociales sur quelques milliers
- *Anelosimus eximius* (Guyane française)
  - Partagent la même toile
  - Coopèrent pour
    - élevage des petits,
    - capture et transport des proies
- Détection de régions dans des images
  - Construction collective de la toile

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# Une recherche du plus court chemin

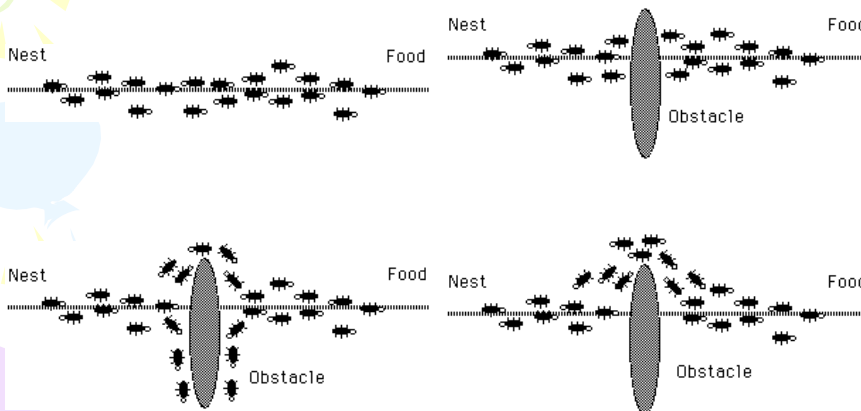
- Plus de phéromone sur le plus court chemin



9/12/2004

Fir

# S'adapter aux changements



9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# Application en intelligence artificielle

- Inspiré du comportement des fourmis réelles
- Travaux de Marco Dorigo depuis 1992: les *Ant algorithms*
- Les fourmis suivent de préférence les chemins riches en phéromone
- Retrouvent le plus court chemin en cas d'obstacle

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# Modèle stochastique de Deneubourg et Goss (1989)

- 2 branches (s et l) et deux points de décision (1 et 2). Probabilité  $P_{is}(t)$  de choisir la branche s au point i à l'instant t en fonction de la phéromone.
- La phéromone est fonction du flux de fourmis

$$p_{is}(t) = \frac{(t_s + \varphi_{is}(t))^\alpha}{(t_s + \varphi_{is}(t))^\alpha + (t_s + \varphi_{il}(t))^\alpha}$$

$$\frac{d\varphi_{is}}{dt} = Np_{js}(t - t_s) + Np_{is}(t) \quad \frac{d\varphi_{il}}{dt} = Np_{jl}(t - r.t_s) + Np_{il}(t)$$

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

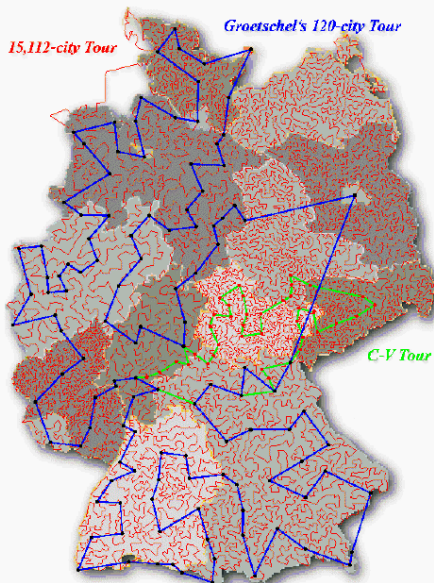
# Généralisation

- Feedback positif (auto catalytique)
- La piste de phéromone est plus vite reconstituée sur le plus court chemin
- Toutes les fourmis vont approximativement à la même vitesse

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# Le problème du voyageur de commerce



- Trouver le chemin le plus court passant une fois et une seule dans chaque ville
- $N$  villes:  $N!$  chemins possibles (3 millions pour 10 villes!)

ence Collective



# Voyageur de commerce

- Chaque fourmi est un agent
  - Doté d'une mémoire de travail (liste des villes déjà visitées)
  - Se promène d'une ville à une autre
  - Choisit la ville suivante en fonction
    - De la quantité de phéromone
    - D'une fonction décroissante de la distance
- Choix non déterministe
- Chaque fourmi est autonome
  - Elle part d'un sommet choisi au hasard

9/12/2004

Fing Intelligence Collective



# Déroulement

- Au début: pas de phéromone
  - Chaque fourmi va probablement vers le plus proche voisin
- Après un cycle
  - Chaque fourmi a trouvé un chemin
    - Mise à jour de la phéromone le long du chemin
    - Inverse de la longueur du chemin
  - Les arêtes composant les chemins courts selon choisies plus souvent en moyenne au cycle suivant
  - Apprentissage par renforcement

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# La phéromone

- A chaque passage sur une arête  $a$ :
  - $f(a) := (1-p)*f(a) + p*f_0$
  - $p$  et  $f_0$  sont des paramètres
- Quand la fourmi a terminé le tour:
  - Évaporation de la phéromone
  - soit  $c$  le chemin trouvé
  - pour tout  $a$  dans  $c$ :
    - $f(a) := (1-p)*f(a) + p/|c|$ ,

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# Point fixe

- S'il n'y a de la phéromone que sur un chemin:
  - il n'y en aura jamais plus ailleurs
  - Choix déterministe: l'arête optimise  $f(a)p(a)$  car c'est la seule avec  $f(a) > 0$
  - Choix probabiliste: l'arête est choisie avec une probabilité 1
- Donc convergence dès que toutes les fourmis choisissent le même chemin
  - Le système peut être arrêté

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

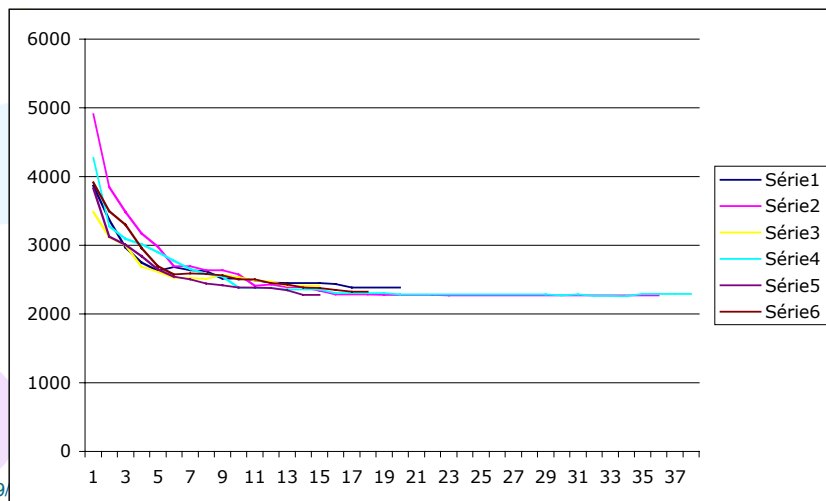
# Expérimentation

- 40 villes
- 400 fourmis
- Exposant  $b = 3$
- Evaporation  $p = 25\%$
- Probabilité  $q = 25\%$
- Phéromone  $f_0 = 1$ .

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# Résultats





## Vers une méta heuristique

- État interne d'une fourmi:
  - De quoi représenter une éventuelle solution (même mauvaise)
- Dépôt de phéromone:
  - Une fois qu'une solution candidate est trouvée
  - Fonction de la qualité de la solution

9/12/2004

Fing Intelligence Collective



## Applications

- Problèmes statiques
  - Les données ne changent pas pendant la résolution
  - Ce n'est qu'une heuristique parmi d'autres
- Problèmes dynamiques
  - Les données évoluent pendant la résolution
  - Nécessité d'adaptation: là, les fourmis sont efficaces

9/12/2004

Fing Intelligence Collective



## Problèmes statiques

- Voyageur de commerce
- Quadratic assignment: placer des installations
  - on donne des flots entre installations: min flot total
- Affectation de tâches
- vehicle routing
  - Visite de tous les clients par une flotte de véhicules de livraison
- Plus petite surséquence commune
  - $(L = \{bcab, bccb, baab, acca\} \Rightarrow baccab)$ .
- Coloration de graphe
- Ordre séquentiel
  - circuit hamiltonien de poids minimal sur un graphe orienté

9/12/2004

Fing Intelligence Collective



## Problèmes dynamiques

- Routage (orienté par les connections) dans les réseaux
- Routage sans connection (connection-less)
- D'après Marco Dorigo Gianni Di Caro and Luca M. Gambardella, *Ant Algorithms for Discrete Optimization*, Artificial Life, Vol.5, No.3, pp. 137-172, 1999.

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# Théorie des jeux

- Le besoin de communication
- Le dilemme du prisonnier
  - chaque prisonnier peut avouer ou non
  - si aucun n'avoue : 2 ans
  - si les 2 avouent: 4 ans
  - si un seul avoue: il est libre et l'autre a 5 ans

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# Jeux à 2 joueurs

	J2: d1	J2: d2
J1: d1	x,x	u,v
J1: d2	v,u	y,y

- Jeux symétriques
- Jeu d'accord social ssi:
  - $x$  ou  $y > 0$  et , si  $x$  et  $y > 0$ , alors  $x=y$
  - $u$  ou  $v$  négatif

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

## Dilemme des prisonniers

	J2: d1	J2: d2
J1: d1	-2,-2	-5,0
J1: d2	0,-5	-4,-4

- $x = -2, y = -4$
- $u = -5, v = 0$
- Ce n'est pas un jeu d'accord social

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

## Jeu de coordination

	J2: d1	J2: d2
J1: d1	1,1	-1,-1
J1: d2	-1,-1	1,1

- $x = y = 1$
- $u = v = -1$
- C'est un jeu d'accord social

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

## Jeu de coopération

	J2: d1	J2: d2
J1: d1	1,1	-3,3
J1: d2	3,-3	-2,-2

- $x = 1, y = -2$
- $u = -3, v = 3$
- C'est un jeu d'accord social

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

## Equilibre de Nash

- Un jeu non coopératif décrit un cadre institutionnel dans lequel chaque joueur arrête seul ses choix sans consulter les autres joueurs.
- L'équilibre de Nash décrit une issue d'un jeu non coopératif dans lequel aucun joueur n'a intérêt à modifier sa stratégie, compte tenu des stratégies des autres joueurs.

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# Définition

- Soit un jeu non-coopératif à  $n$  joueurs, et  $s^* = (s^*_1, \dots, s^*_n)$  une combinaison de choix stratégiques de ces  $n$  joueurs
  - $s^*_i$  est le choix stratégique du joueur  $i$
  - $s^*_i \in S_i$ , l'ensemble des stratégies praticables par le joueur  $i$ .
  - $u_i(s^*_1, \dots, s^*_n)$  est le gain du joueur  $i$  lorsque  $s^*$  est sélectionné.
- $\forall s_i \in S_i \quad u_i(s^*_1, \dots, s^*_i, \dots, s^*_n) > u_i(s^*_1, \dots, s_i, \dots, s^*_n)$

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

# Optimum de Pareto

- Préférence au sens de Pareto  $>_P$ :
  - Entre les états des agents d'un jeu
  - $(u_1, \dots, u_i, \dots, u_n) >_P (u'_1, \dots, u'_i, \dots, u'_n)$  ssi  $\forall i \in [1, n], u_i > u'_i$
- Optimum de Pareto: maximum de cette relation
- on ne peut augmenter le gain d'un agent sans diminuer celui d'un autre

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

## Dilemme des prisonniers

	J2: d1	J2: d2
J1: d1	-2,-2	-5,0
J1: d2	0,-5	-4,-4

- équilibre de Nash: (d2,d2)
- optimum de Pareto: (d1,d1)
- Pour l'atteindre: suite de coups avec mémoire

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

## Stratégies sur des suites (1)

- **Donnant-donnant** : coopération au premier tour, puis stratégie précédente du partenaire.
- **Majorité mou** : choix majoritaire de l'adversaire, coopération si égalité et au premier tour.
- **Rancunière** : coopération, puis défection permanente si le partenaire fait une fois défection
- **Donnant-donnant dur** : coopération, sauf si le partenaire a trahi une des 2 fois précédentes
- **Gentille** : toujours coopérer
- **Périodique gentille** : séquence cyclique de deux coopération, puis une défection

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

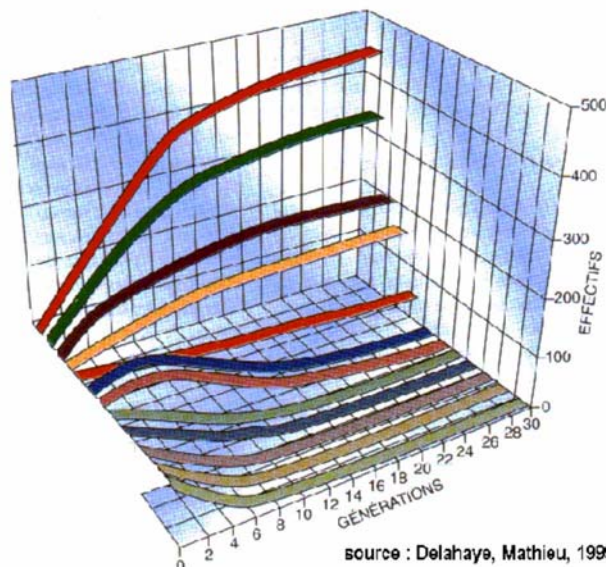
## Stratégies sur des suites (2)

- **Sondeur** : séquence trahir, coopérer, coopérer
- **Lunatique** : défection une fois sur deux en moyenne (séquences aléatoires)
- **Méfiant** : défection au premier tour, puis stratégie précédente du partenaire
- **Majorité dur**: choix majoritaire de l'adversaire, défection si égalité et au premier tour.
- **Méchante** : toujours faire défection
- **Périodique méchante** : séquence cyclique de deux défections, puis une coopération

9/12/2004

Fing Intelligence Collective

## Comparaison



9/12/2004

Périodique-méchante

source : Delahaye, Mathieu, 1999



## Tournoi du 50e anniversaire

- Chaque équipe pouvait soumettre plusieurs programmes
- Équipe Nick Jennings (Southampton)
- Stratégie = séquence de 10 coups pour se reconnaître
  - Si oui: stratégie maître esclave
  - Si non: stratégie méchante

9/12/2004

Fing Intelligence Collective



## Contraintes

- Les jeux de coordination permettent d'exprimer des contraintes entre valeurs de variables
- Il n'y a souvent pas d'équilibre de Nash (toutes les décisions se valent)
- Ce sont des jeux d'accord social
- Une solution représente une loi sociale au sens Shoham-Tennenholz

9/12/2004

Fing Intelligence Collective



## Pour en savoir plus...

- Numéro spécial de « pour la science »
  - N° 314, Décembre 2003
  - Sur les phénomènes d'émergence
- « Intelligence Collective »
  - de E. Bonabeau, G. Théraulaz,
  - Editions Hermès, 1994
- « Swarm Intelligence »,
  - de E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Théraulaz,
  - Oxford University Press, 1999
  - En Anglais
- « Ant Colony Optimization »
  - M. Dorigo , T Stützle
  - MIT Press, 2004

9/12/2004

Fing Intelligence Collective



## Sites Internet

- Site Starlogo:
  - <http://education.mit.edu/starlogo/>
- Site Madkit:
  - <http://www.madkit.org/>
- Mon mél
  - [Joel.quinqueton@univ-montp3.fr](mailto:Joel.quinqueton@univ-montp3.fr)

9/12/2004

Fing Intelligence Collective