

# L'intelligence en essaim sous l'angle des systèmes complexes : étude d'un système multi-agent réactif à base d'itérations logistiques couplées.

Rodolphe Charrier

LORIA - Université de Nancy

March 17, 2011



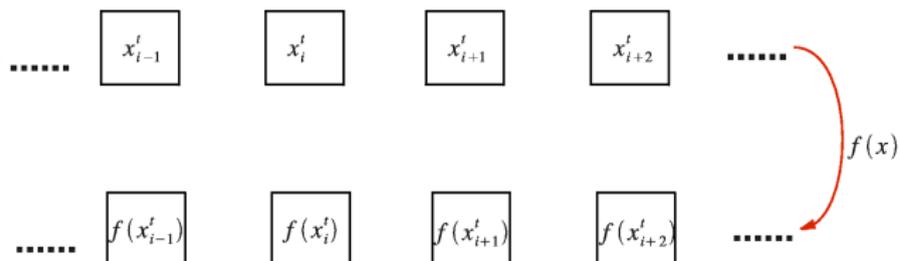
# Préambule : Idée fondatrice

Modèle de calcul des Réseaux d'Itérations Couplées :  
réseau d'unités chaotiques couplées.



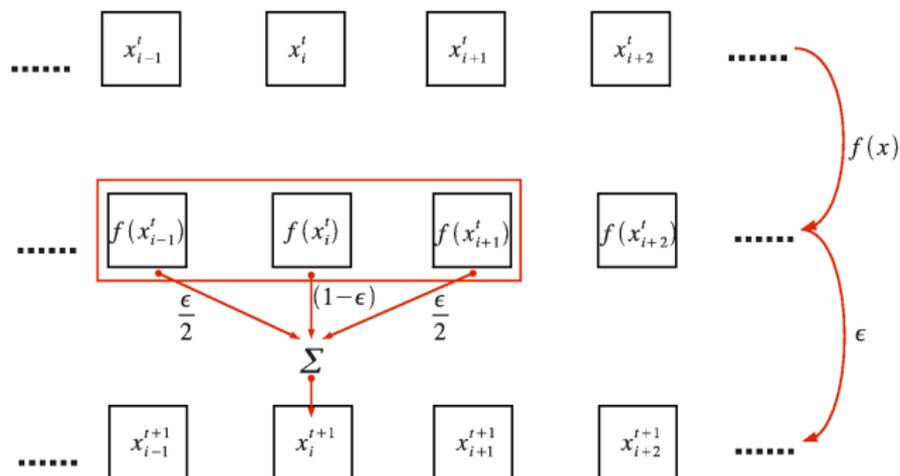
# Idée fondatrice

## Modèle de calcul des Réseaux d'Itérations Couplées



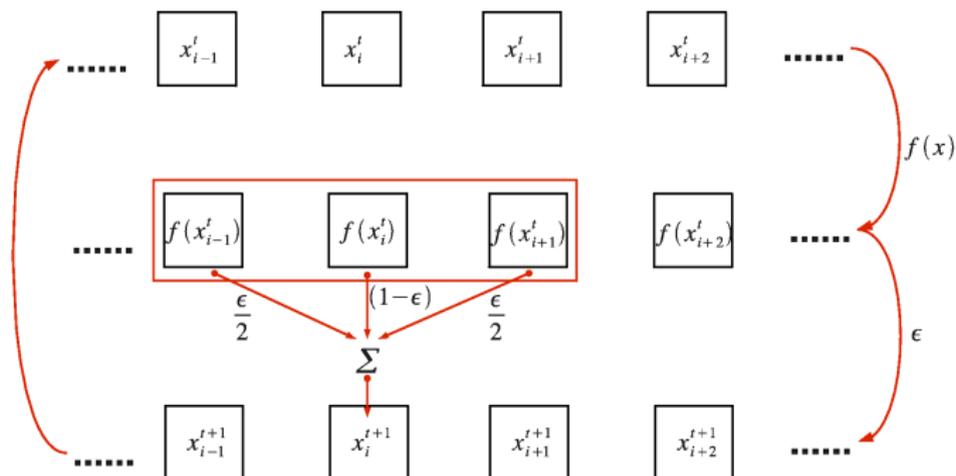
# Idee fondatrice

## Modèle de calcul des Réseaux d'Itérations Couplées



# Idee fondatrice

## Modèle de calcul des Réseaux d'Itérations Couplées



# Idée fondatrice

- ▶ Réseaux itérations couplées (RIC) [Kaneko, 1983] :  
 $N$  cellules d'état  $x_i$ , une application non linéaire  $f$ , couplage  $\epsilon$  :

$$\text{Couplage local : } x_i^{t+1} = (1 - \epsilon)f(x_i^t) + \frac{\epsilon}{2}(f(x_{i-1}^t) + f(x_{i+1}^t))$$

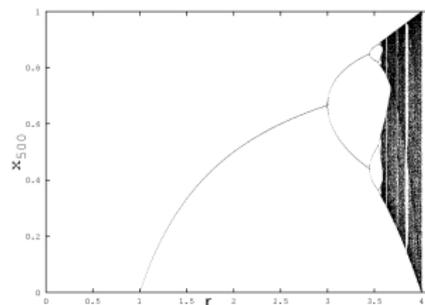
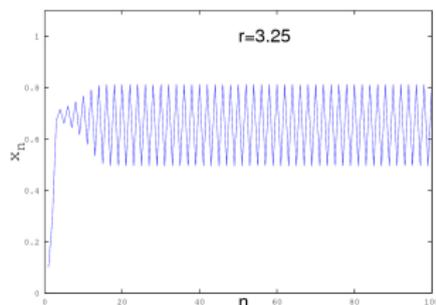
- ▶ Version gaz d'itérations couplées [Shibata et Kaneko, 2003] :  
cellules mobiles sur grille.
- ▶ Objectif : aborder les systèmes biologiques et en particulier  
l'intelligence en essaim biologique

## Thèse

Le modèle de système multi-agent logistique (SMAL).

# Application logistique et RIC : propriétés importantes.

- ▶ Suite non linéaire :  $x_{n+1} = f(x_n) = r x_n(1 - x_n)$



- ▶ Mesure de stabilité : coefficient de Lyapunov.
  - ▶  $\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \ln |f'(x_k)| \right)$
  - ▶ Propriétés :  $\lambda < 0 \Rightarrow$  stabilité, sinon instabilité ou indifférent
- ▶ version globalement couplée en réseau (RIC) :
 
$$x_i(t+1) = (1 - \epsilon) f(x_i(t)) + \frac{\epsilon}{N} \sum_{j=1}^N f(x_j(t))$$
- ▶ Synchronisation totale (évolutions temporelles identiques)
 

ssi  $\epsilon > \epsilon^* = 1 - \exp(-\lambda)$

# Contributions principales du SMAL

- ▶ Approche “dynamique” et déterministe de l'intelligence en essaim vs. modèles actuels.
- ▶ Aspect unificateur
- ▶ Mécanismes explicites :
  - ▶ environnement à base de champs,
  - ▶ boucle de rétro-action agent-environnement (cybernétique)
- ▶ Synchronisation et contrôle paramétrique à la base des mécanismes d'auto-organisation et d'adaptation.
- ▶ Critères de stabilité par estimation des coefficients de Lyapunov et entropie  $K$ .
- ▶ Métaheuristique pour l'optimisation.

# Démarche globale

- ▶ Contexte et problématiques : intelligence en essaim et systèmes complexes
- ▶ Modèle...

## SMAL

Système Multi-Agent Logistique (SMAL)  $\equiv$  itérations couplées dans un système multi-agent réactif.

- ▶ Validation : comparaison avec des approches / modèles existants, comparaison de performances.

# Part I

## Contexte général

## Intelligence en essaim

Origine et définitions

Exemples types

# Intelligence en essaim : définition, enjeux, objectifs

- ▶ Première définition [Beni et Wang, 1989] : “Swarm intelligence in cellular robotics systems”
  - ▶ nombre d'entités  $10^2 < N \ll \mathcal{N}_A = 10^{23}$
  - ▶ comportements simples, quasi-identiques,
  - ▶ contrôle décentralisé, séquençement asynchrone.
- ▶ Avantages :
  - ▶ unités simples plus faciles à produire, interchangeables,
  - ▶ redondance  $\Rightarrow$  système plus fiable, plus robuste
- ▶ Intelligence :
  - ▶ capacités d'adaptation à l'environnement
  - ▶ résolution collective de problèmes.
- ▶ Problématiques :
  - ▶ de l'individu simple au collectif complexe
  - ▶ approches  $\neq$  : biologie, physique, informatique, robotique . . . .
  - ▶ intelligence en essaim / IA classique : imiter la nature

# Deux archétypes bio-inspirés

Phénomènes de référence :

- ▶ Phénomènes de “flocking” :
  - ▶ déplacement collectif par prise de décision décentralisée,
  - ▶ modèles particuliers de Reynolds et de Vicsek,
  - ▶ ⇒ métaheuristique d'optimisation par essaim particulaire.
- ▶ Phénomènes de stigmergie par phéromone :
  - ▶ exploration-exploitation par prise de décision décentralisée,
  - ▶ modèle stochastique de Deneubourg-Dorigo,
  - ▶ ⇒ métaheuristique d'optimisation par colonies de fourmis.



## Part II

# Le système multi-agent logistique

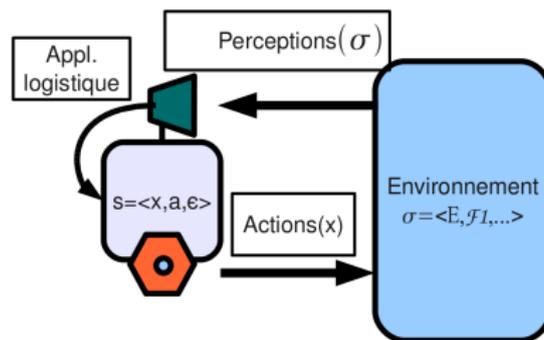


# Principes de conception du SMAL.

- ▶ Environnement d'état  $\sigma$ ,
- ▶ agents  $A_i, i = 1, \dots, N$  d'état  $s_i$ ,
- ▶ perceptions  $P_i$ , influence  $I_i$ ,

$$\begin{cases} s_i^{t+1} = F_i(s_i^t, P_i(\sigma^t)) & \text{pour tout agent } A_i \in \mathbb{A} \\ \sigma^{t+1} = R(\sigma^t, \prod_{i \in \mathbb{A}} I_i(s_i^t)) \end{cases}$$

Modèle centré sur l'intériorité de l'agent :

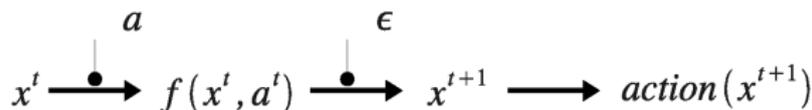


## Du RIC au SMA logistique.

- ▶ Population d'agents en interaction,
- ▶ interaction  $\Leftrightarrow$  couplage  $\epsilon$ ,
- ▶ décision individuelle gouvernée par application logistique

$$f(x, a) = 4 a x(1 - x)$$

- ▶ décision finale collective  $\Leftrightarrow$  couplage RIC **variable**.



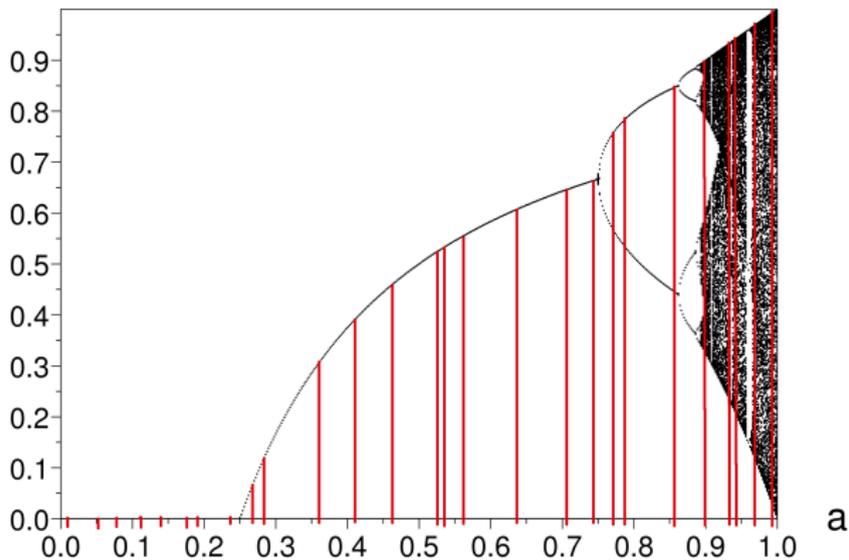
### État $s$ d'un agent logistique

$$s = \langle x, a, \epsilon \rangle \in \mathbb{D}^3 = [0, 1]^3$$

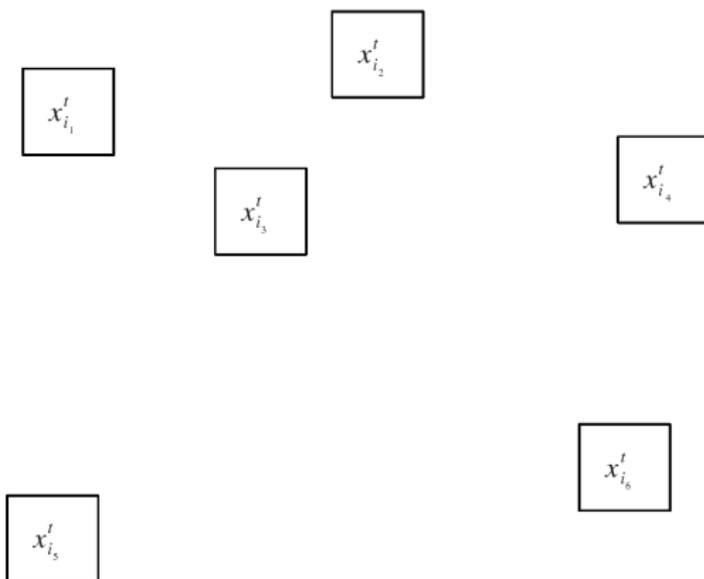
$x$	var. de décision = commande
$a$	var. de contrôle = excitabilité
$\epsilon$	var. de couplage = sociabilité

# Couplage et contrôle paramétrique

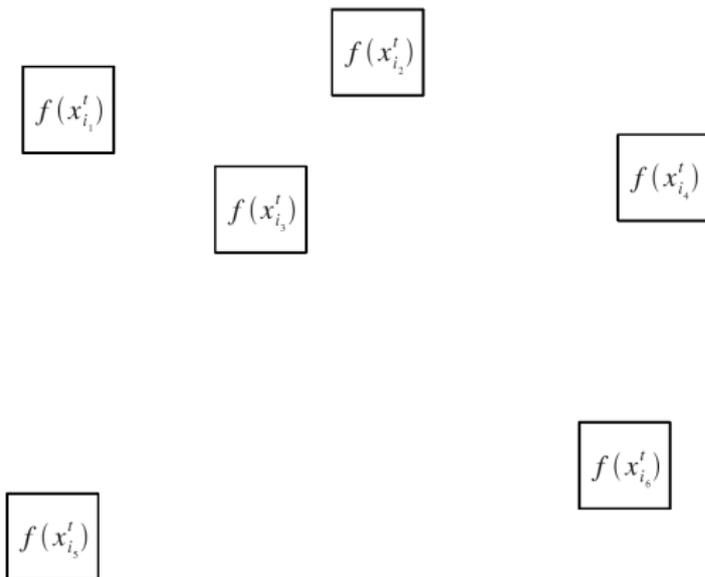
final x



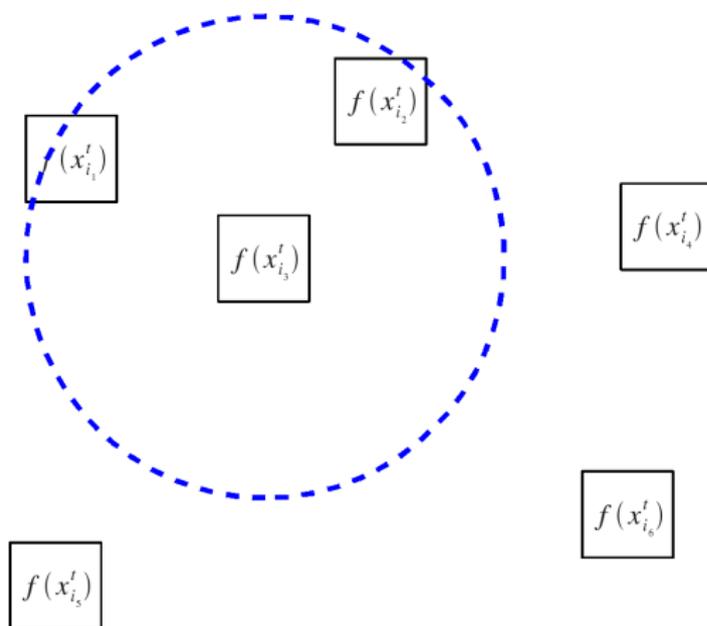
## États internes à t



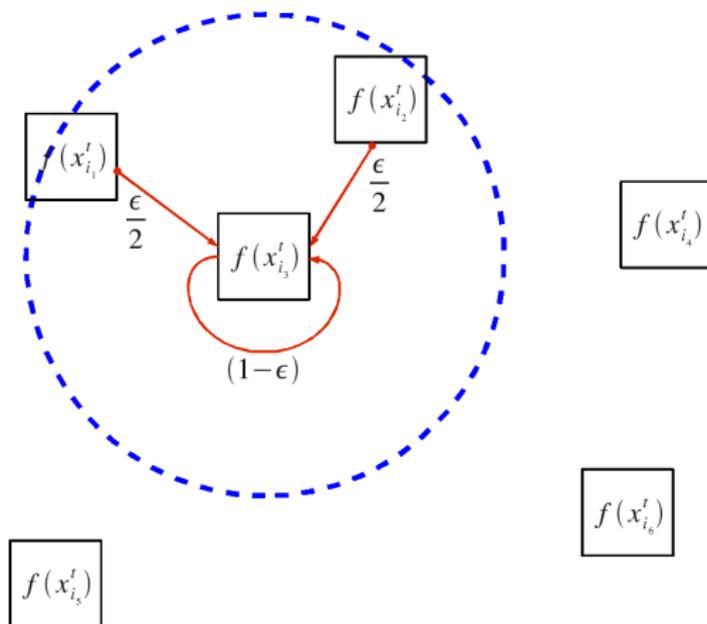
## Calcul application logistique



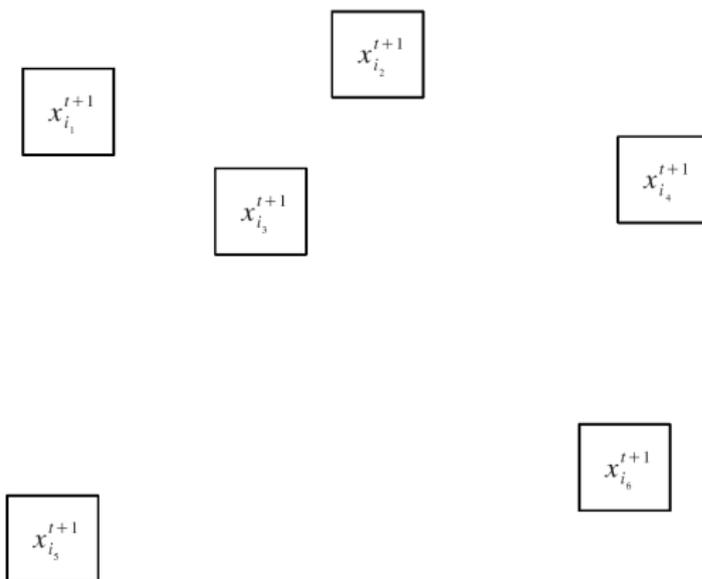
## Perception voisins



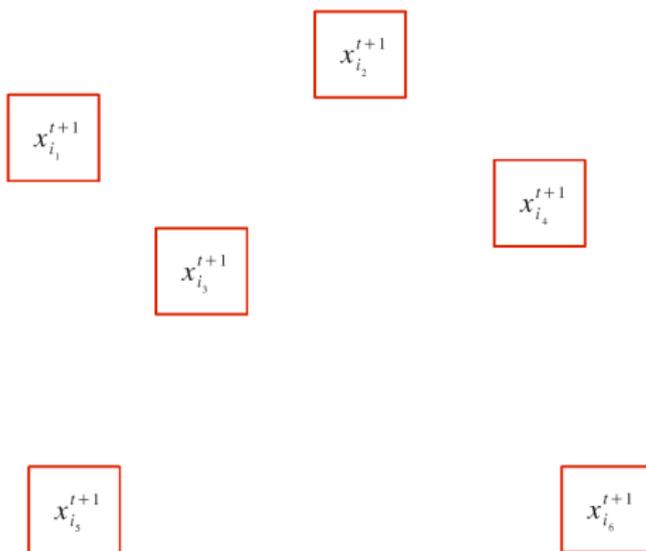
# Interaction - couplage



## États internes à $t+1$ - Décision



# Action



## L'agent logistique - formalisation.

État  $s$  d'un agent logistique :  $s = \langle x, a, \epsilon \rangle \in \mathbb{D}^3 = [0, 1]^3$

Phases de perception de l'agent  $A_i$  :

$$\begin{cases} a_i^{t+1} &= F_a(a_i^t, P_{a,i}(\sigma^t)) \\ \epsilon_i^{t+1} &= F_\epsilon(\epsilon_i^t, P_{\epsilon,i}(\sigma^t)) \end{cases}$$

### Équation maîtresse de prise de décision

$$x_i^{t+1} = (1 - \epsilon_i^{t+1})f(x_i^t, a_i^{t+1}) + \frac{\epsilon_i^{t+1}}{|V_i|^t} \sum_{j \in V_i} f(x_j^t, a_j^{t+1})$$

Action de l'agent  $A_i \leftarrow G(x_i^{t+1})$

## Environnement et interactions.

"Tout passe par le champ"  $\Rightarrow$  Modèle à base d'interactions indirectes uniquement :

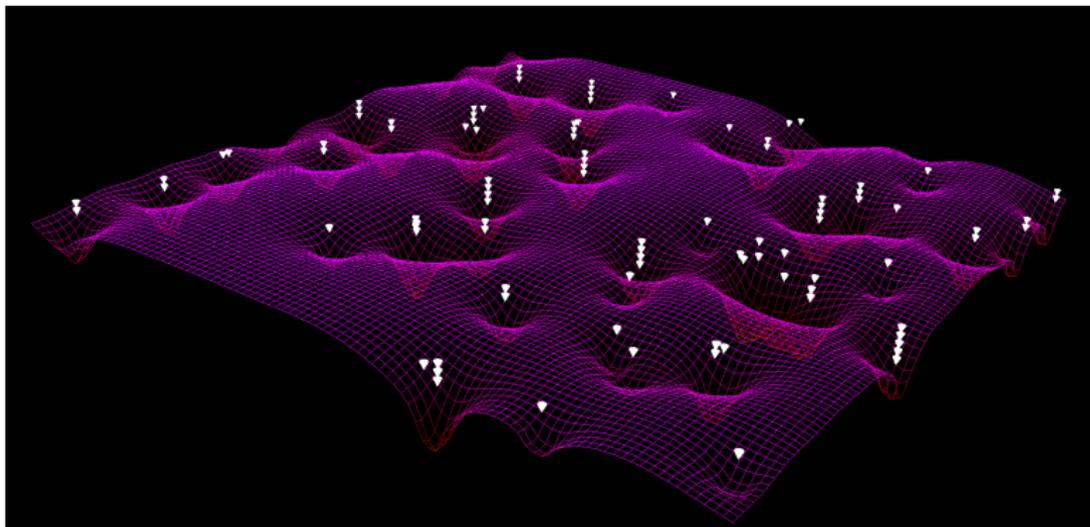
- ▶ Environnement multi-couche de champs :  $\mathbb{W} \equiv \langle E, \mathbb{F} \rangle$ ,
- ▶ Définition d'un champ :  $\mathcal{F}^t : E \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,
- ▶ Ex : champs de position, de phéromone, de distances, ...
- ▶ Champ  $\equiv$  structure de données / mémoire environnement.
- ▶ Opérateurs sur les champs : perception / action / influence.
- ▶ Propriétés : évaporation, diffusion, ...

### Réaction de l'environnement

Mise à jour des champs à partir des champs d'influences.

Ex : champ de coefficient d'évaporation  $\rho : \mathcal{C} \leftarrow (1 - \rho)\mathcal{C} + \sum_i \tilde{\mathcal{C}}_i$

## Visualisation d'un champ d'un environnement 2D



## Part III

# Application du SMAL à l'intelligence en essaim

Simulation d'un phénomène d'auto-organisation : flocking

Mécanismes d'adaptation

Fourmi logistique comme méta-heuristique pour l'optimisation  
Fourmis logistiques sur un TSP

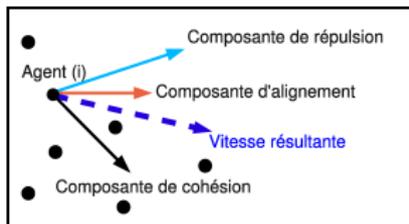
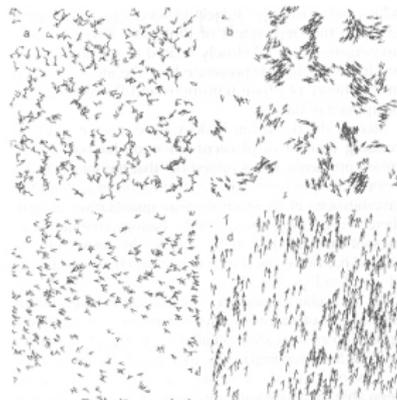
# Flocking

- ▶ Modèle particulière de Vicsek :

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i^{t+1} &= \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^t \\ \theta_i^{t+1} &= \langle \theta^t \rangle_{i,r} + \Delta\theta \end{cases}$$

- ▶ Modèle particulière de Reynolds :

- ▶ séparation
- ▶ alignement
- ▶ cohésion

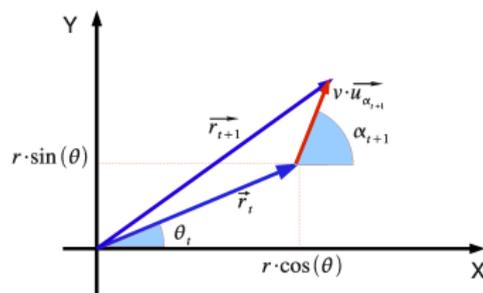


# Auto-organisation : flocking avec le SMAL

- ▶ Etat de l'agent  $i$  :  $s_i^t = \langle x_i^t, a_i, \epsilon \rangle$ 
  - ▶  $x_i^t$  : donne la direction de la vitesse,
  - ▶  $a_i$  variable selon l'agent, stationnaire,
  - ▶  $\epsilon$  constant sur toute la population.
- ▶ Equation décisionnelle :

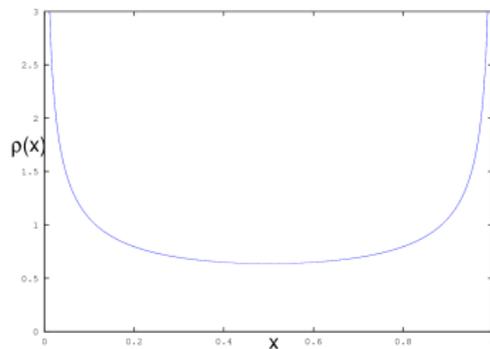
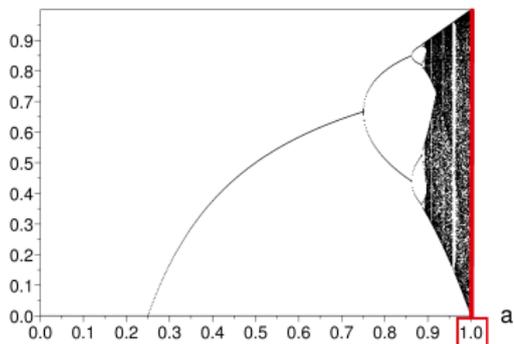
$$x_i^{t+1} = (1-\epsilon)f(x_i^t, a_i) + \epsilon \frac{\sum_{j \in V_i} f(x_j^t, a_j)}{N_i^t}$$

- ▶ Action : nouvelle direction de déplacement  
 $\alpha = 2 \pi x_i^{t+1}$ .



# Simulation agents chaotiques

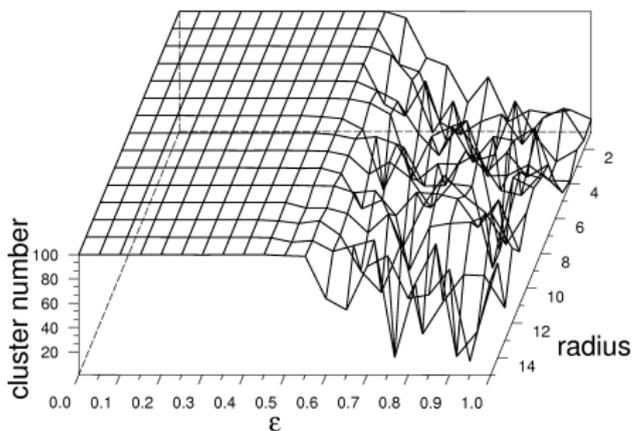
final x



## Simulation d'une population d'agents chaotiques

Agents tous chaotiques,  $\epsilon = 0,9$ ,  $t_0 = 2500$ ,  $R = 10$ , env.  $100 \times 100$ .

## Seuil de synchronisation

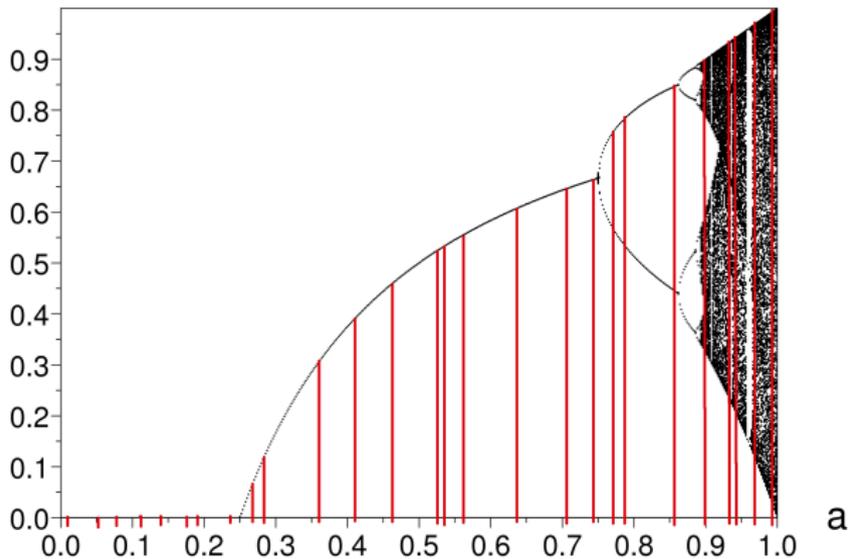


### Vérification expérimentale

Seuil de synchronisation théorique  $\epsilon_* = \frac{1}{2}$  pour agents chaotiques.

# Simulation d'une population "uniforme" d'agents

final x



## Simulation d'une population "uniforme" d'agents

Agents uniformément distribués,  $\epsilon = 0,99$ ,  $t_0 = 0$ ,  $R = 10$ , env.  
 $100 \times 100$ .

# Coefficients de Lyapunov

Calcul des coefficients de Lyapunov.

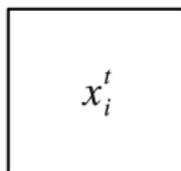
## Définition

Supposons deux points initiaux proches  $x_0$  et  $x_0 + \gamma$ . Après  $\tau$  itérations, l'exposant de Lyapunov est défini par l'équation :

$$\gamma e^{\tau \lambda(x_0)} = |f^\tau(x_0 + \gamma) - f^\tau(x_0)|$$

- ▶ Propriétés :
  - ▶  $\lambda < 0 \Rightarrow$  stabilité,
  - ▶  $\lambda = 0 \Rightarrow$  indifférent,
  - ▶  $\lambda > 0 \Rightarrow$  instabilité - chaos.
- ▶ Approximation locale pour SMA : utilisation des "agents jumeaux".

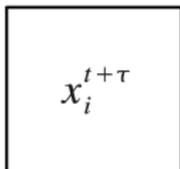
# Agents jumeaux

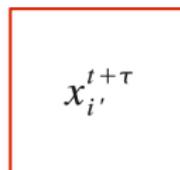


# Agents jumeaux

$$x_i^t = x_i^t + \gamma$$

# Agents jumeaux

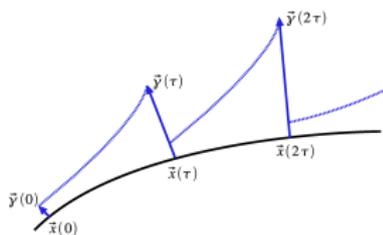

$$x_i^{t+\tau}$$


$$x_{i'}^{t+\tau}$$

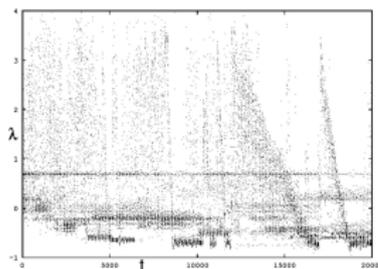
# Calcul des coefficients de Lyapunov "partiels"

- ▶ Approximation : calcul de  $\hat{\lambda}_i(k)$  sur  $\Delta t = 10$
- ▶ Estimation du coefficient de Lyapunov "partiel" ( $p = 5$  séquences) :  

$$\hat{\lambda}_i(p) = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \lambda_k$$



(j) Schéma de calcul.



(k) "Spectre" du cas chaotique.

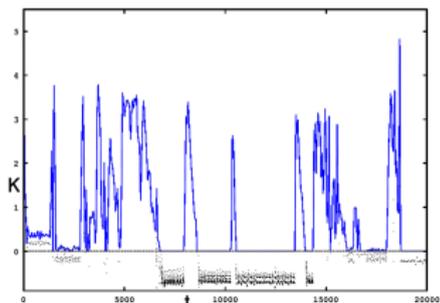
# Estimation de l'entropie de Kolmogorov

Mesure du degré de chaos  $\Rightarrow$  entropie  $K$  (de Kolmogorov).

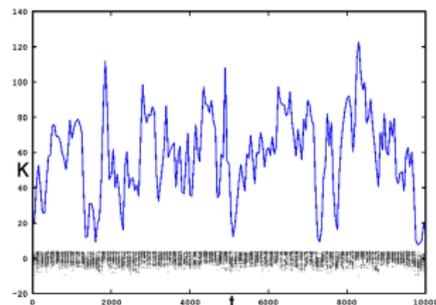
$$K = \sum \begin{cases} \lambda_i & \text{si } > 0 \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Estimation de l'entropie  $K$  partielle sur  $\Delta t = 50$

$$\hat{K}_p = \sum \begin{cases} \hat{\lambda}_i(p) & \text{si } > 0 \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$



(l) Cluster chaotique.



(m) Cas agents "uniformes"

# Adaptation : flocking sur environnement avec obstacle

- ▶ S'adapter aux obstacles  $\Leftrightarrow$  variations de couplage
- ▶ Principe :  $\mathbf{U}_i = (1 - \epsilon_{i,1})\mathbf{T}_{O \rightarrow i} + \epsilon_{i,1}(\mathbf{T}_{i,1} + \mathbf{T}_{i,2})$ 
  - ▶  $\epsilon_{i,1} = 0$  si perception obstacle
  - ▶  $\epsilon_{i,1} = 1$  si pas d'obstacle
- ▶ Action sur l'angle de  $\mathbf{U}_i$  et la norme de la vitesse

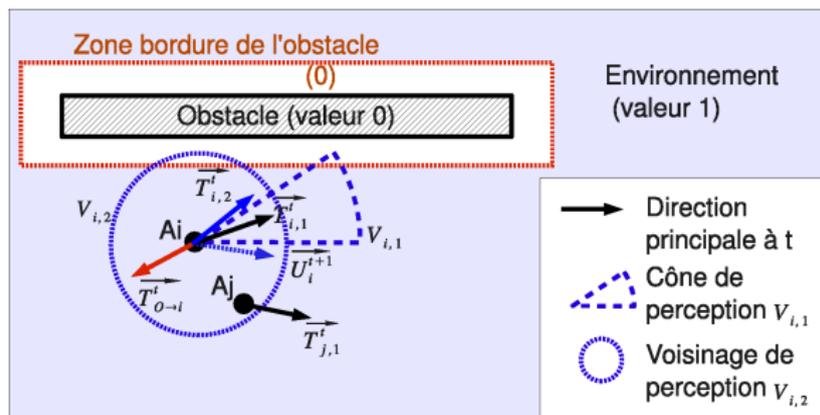


Figure: Schéma de principe de l'évitement d'obstacles.

## Obstacles et agents à distribution gaussienne

100 agents à distribution gaussienne de moyenne  $\mu = 0,6$  et d'écart-type  $\sigma = 0,15$ .

# Essaim de robots

# Bilan sur le flocking

## Intérêt du modèle SMAL

- ▶  $\neq$  modèle particulière,
- ▶ intègre de façon simple les obstacles (pas de champ de potentiel),
- ▶ couplages internes explicites,
- ▶ phénomènes de synchronisation  $\Leftrightarrow$  couplage,
- ▶ synchronisation interne  $\Rightarrow$  regroupement géométrique,
- ▶ mesure de stabilité  $\Rightarrow$  entropie  $K$ .

# Principe exploration-exploitation du SMAL

$$x^{t+1} = f(x^t, a) = 4 a x^t(1 - x^t)$$

Exploitation

Exploration

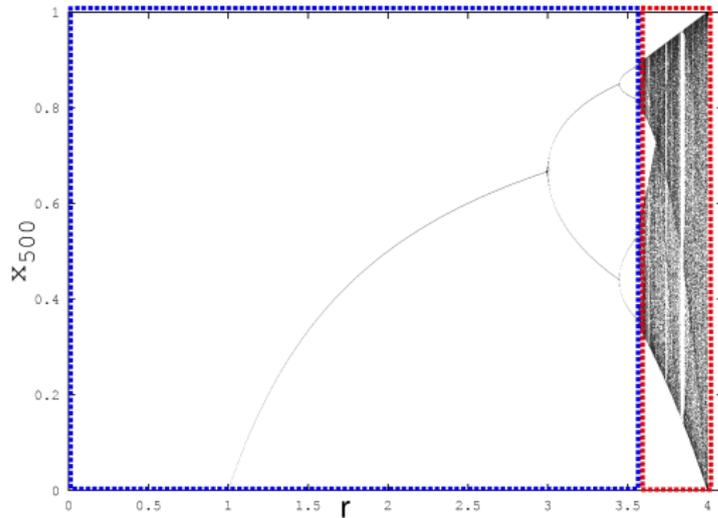


Figure: Application du principe exploration-exploitation aux zones du diagramme de bifurcation de l'application logistique  $x_{n+1} = r x_n(1 - x_n)$

# Fourmis

Optimisation par colonies de fourmis ("TSP") [Dorigo et al., 1996]

$$p_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum \tau_{il}^\alpha \eta_{il}^\beta}$$

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^k, \text{ si } (i, j) \in A_k$$

$$\Delta\tau^k = \begin{cases} Q, & \text{ou bien} \\ \frac{Q}{L^k} \end{cases}$$

# Fourmi logistique sur le TSP

Processus sensorimoteur - fourmi logistique :

- ▶ Perception-décision :

$$\begin{cases} P_{i,a}(\sigma^t) = \mathcal{T}(\operatorname{argmax}_{l \in S \setminus \{k \cup \mathcal{V}_i\}} \{\mathcal{O}(k, l)\}) \\ a_i^{t+1} = \frac{1}{1 + e^{\alpha (P_{i,a}(\sigma^t) - \tau_0)}} \\ x_i^{t+1} = f(x_i^t, a_i^{t+1}) \end{cases}$$

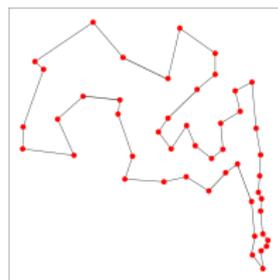
- ▶ Actions :

- ▶  $x_i^{t+1} \Rightarrow$  choix arc,
- ▶ déplacement vers le noeud choisi  $l^*$ ,
- ▶ Mise à jour du champ d'influence de phéromone (non persistant) :  
 $\tilde{\mathcal{T}}_i^{t+1}(k, l^*) = x_i^{t+1} \mathcal{W}(k, l^*)$

# Résultats (1)

## Problème TSP "att48"

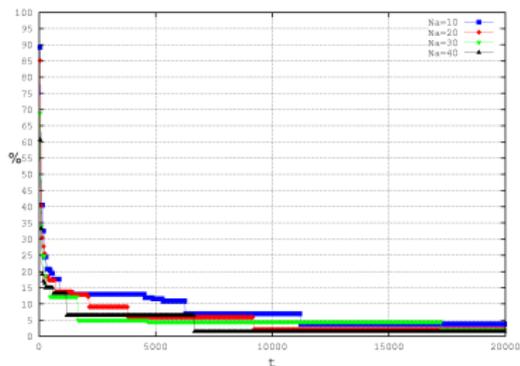
Algorithme	$N$	$\rho$	meilleure performance
AS	10	0,0	11028
AS	20	0,06	10845
AS	30	0,06	10847
AS	40	0,08	10777
LA	10	0,01	11074
LA	20	0,0	11049
LA	30	0,02	10894
LA	40	0,01	11026



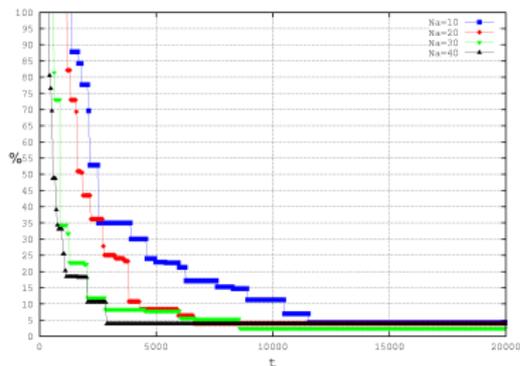
└ Fourmi logistique comme méta-heuristique pour l'optimisation

└ Fourmis logistiques sur un TSP

## Résultats (2)



(b) "Ant System".



(c) Fourmis logistiques.

## Bilan sur la stigmergie fourmi

- ▶ Phénomène d'auto-organisation et d'adaptation  $\Rightarrow$  auto-adaptation.
- ▶ Champ de phéromone  $\equiv$  champ de décision + champ de contrôle.
- ▶ Optimisation  $\Rightarrow$  insertion de données exogènes.
- ▶ Mécanismes de synchronisation par contrôle.
- ▶ Convergence visible dans le diagramme de bifurcation.

## Part IV

# Conclusion



# Résultats

- ▶ Modèle générique : flocking et stigmergie par phéromone.
- ▶ Interprétation / explication :
  - ▶ agrégation  $\Leftrightarrow$  synchronisation par couplage d'états internes,
  - ▶ stigmergie  $\Leftrightarrow$  synchronisation par contrôle interne.
- ▶ Construction déterministe et explicite :
  - ▶ boucle de rétro-action "influence-réaction",
  - ▶ auto-organisation et adaptation  $\Leftrightarrow$  données (champs) endogènes et exogènes,
  - ▶ mesures de la dynamique  $\Leftrightarrow$  stabilité, prédiction,
  - ▶ outils de visualisation.

Pour :  $\Rightarrow$  synthèse de systèmes complexes pour l'intelligence en essai,  
 $\Rightarrow$  métaheuristique pour l'optimisation.

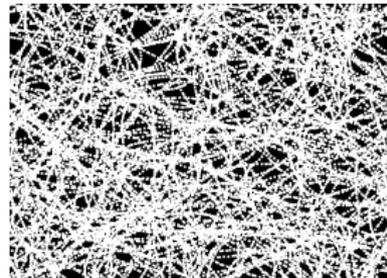
# Perspectives

- ▶ Espaces  $n$ -dimensionnels (notamment pour du PSO).
- ▶ Adaptation à la fois sur couplage et contrôle.
- ▶ Extension de la mesure dynamique à tous les cas.
- ▶ Affiner l'optimisation et tester sur des problèmes "difficiles"
- ▶ Application à d'autres contextes d'étude (réseaux, mobilité, gestion de trafic routier, déplacement de foules, . . . ).
- ▶ Passage à l'échelle en robotique collective

# Pensée complexe...



(d) Jackson Pollock



(e) Agents logistiques



BENI, G. et WANG, J. (1989).

Swarm intelligence in cellular robotics systems.

*In Proceeding of NATO Advanced Workshop on Robots and Biological System*, pages 26–30, Tuscany, Italy.



KANEKO, K. (1983).

Transition from torus to chaos accompanied by the frequency locking with symmetry breaking – in connection with the coupled logistic map.

*Progres of theoretical physics*, 69(5):1427.



SHIBATA, T. et KANEKO, K. (2003).

Coupled map gas: structure formation and dynamics of interacting motile elements with internal dynamics.

*Physica D*, 181:197–214.