

Intelligence collective et systèmes dynamiques : un modèle à base d'applications logistiques couplées...

Rodolphe Charrier

LITIS
Université du Havre



Objectifs et principes généraux

Objectif : aborder l'intelligence en essaim avec des systèmes dynamiques déterministes pour :

- ▶ rechercher des modèles “unificateurs”,
- ▶ expliciter/exhiber les mécanismes : rétro-action agent-environnement (cf. cybernétique), dynamique interne des agents, . . . ,
- ▶ proposer de nouvelles métaheuristiques pour l'optimisation.

Hypothèses fondatrices

Les mécanismes d'auto-organisation et d'adaptation de l'intelligence en essaim sont régis par :

- ▶ des phénomènes de synchronisation (états d'oscillateurs couplés),
- ▶ des mécanismes d'adaptation par “contrôle paramétrique” (sur ces oscillateurs)

Concept d'Intelligence en essaim (IE)

IE bio-inspirée [Bonabeau et al., 1999]

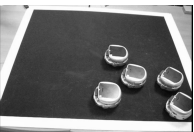
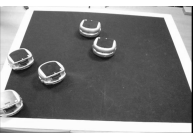
L'intelligence en essaim inclut toute tentative de conception d'un algorithme ou d'un dispositif visant à résoudre des problèmes de façon distribuée, inspirée du comportement collectif des insectes sociaux ou d'autres sociétés animales.

IE en sciences de l'ingénieur [Blum et Merkle, 2008]

L'intelligence en essaim est une discipline de l'intelligence artificielle moderne qui traite de la conception de systèmes multi-agents en vue d'applications telles que l'optimisation et la robotique.

Domaine d'étude : l'intelligence en essaim

- ▶ Première définition [Beni and 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.
- ▶ Pour quoi ?
 - ▶ unités simples, faciles à produire, interchangeables,
 - ▶ redondance \Rightarrow système fiable, robuste
- ▶ Notion d'intelligence :
 - ▶ capacités d'adaptation à l'environnement
 - ▶ résolution collective de problèmes.
- ▶ Problématiques associées :
 - ▶ de l'individu au collectif
 - ▶ du simple au complexe
 - ▶ de l'inerte au vivant



Deux phénomènes de référence : bio-inspirés

- ▶ Phénomènes de “flocking” :
 - ▶ déplacement collectif par prise de décision décentralisée,
 - ▶ modèles particuliers de Reynolds et de Vicsek,
 - ▶ \Rightarrow métaheuristique d'optimisation par essaim particulaire.

- ▶ Phénomènes de stigmergie par phéromone :
 - ▶ exploration-exploitation “guidée” par un champ de phéromone,
 - ▶ modèle stochastique de Deneubourg-Dorigo,
 - ▶ \Rightarrow métaheuristique d'optimisation par colonies de fourmis.



Flocking et systèmes dynamiques

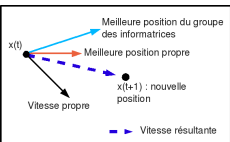
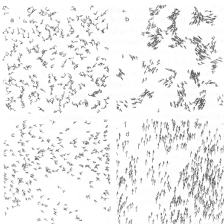
- ▶ Modèle particulière de Vicsek :

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

- ▶ Modèle particulière de Reynolds :
séparation, alignement, cohésion.
- ▶ Flocking \Rightarrow optimisation par essaim
particulaire (OEP) :

$$\begin{cases} \mathbf{v}_d(t+1) &= c_1 \mathbf{v}_d(t) + c_2 (\mathbf{p}_d(t) - \mathbf{x}_d(t)) + \\ & c_3 (\mathbf{g}_d(t) - \mathbf{x}_d(t)) \\ \mathbf{x}_d(t+1) &= \mathbf{x}_d(t) + \mathbf{v}_d(t+1) \end{cases}$$

avec c_2 et c_3 variables aléatoires



Métaheuristiques stigmergiques pour l'optimisation

- ▶ Expérience du double pont [Deneubourg et al., 1987] :

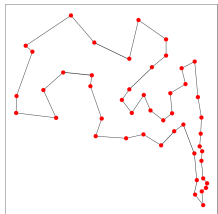
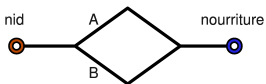
$$P_A = 1 - P_B = \frac{(K + A_i)^2}{(K + A_i)^2 + (K + B_i)^2}$$

- ▶ Fourmi \Rightarrow Optimisation par colonies de fourmis (ACO) :

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

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

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



Bilan

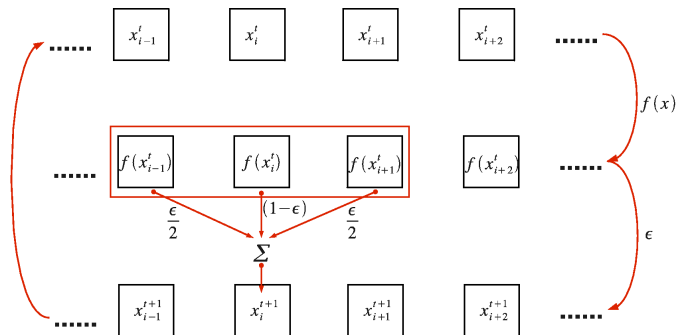
- ▶ Modèle particulière = objet de la physique.
- ▶ Pas d'état interne/décisionnel de la particule (\nRightarrow autonomie du vivant).
- ▶ Approches stochastiques pour l'optimisation.
- ▶ Modèles distincts flocking/fourmis.

Recherche d'un modèle dynamique pour l'intelligence en essaim

- ▶ Exhiber les mécanismes de synchronisation (flocking),
- ▶ Exhiber l'asservissement par le champ de la stigmergie comme un contrôle dynamique,
- ▶ Tenter d'unifier les deux phénomènes.

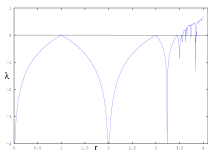
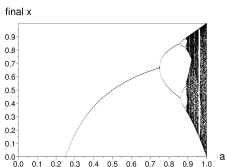
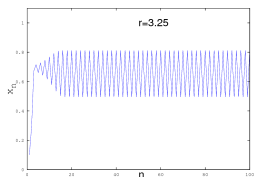
Un "autre" modèle pour l'IE ?

Réseau d'unités chaotiques couplées :



Choix de f : l'application logistique

- ▶ Suite non linéaire : $x_{n+1} = f(x_n, a) = rx_n(1 - x_n)$
- ▶ ou ramené sur $[0, 1]$: $x_{n+1} = f(x_n, a) = 4a x_n(1 - x_n)$



- ▶ Calcul du 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 du point fixe, sinon instabilité ou indifférent

- ▶ Réseaux itérations couplées (RIC) [Kaneko, 1983] :
 N cellules d'état x_i , une application non linéaire discrète f (ex : application logistique), couplage ϵ :

$$\text{Couplage global : } x_i^{t+1} = (1 - \epsilon)f(x_i^t) + \frac{\epsilon}{N} \sum_{j=1}^N f(x_j^t)$$

- ▶ Formulation matricielle :

$$\mathbf{x}^{t+1} = \left((1 - \epsilon)\mathbf{I} + \frac{\epsilon}{N}\mathbf{G} \right) \mathbf{f}(\mathbf{x}^t)$$

où \mathbf{G} est la matrice de connexion (remplie de 1 ici...).

- ▶ Synchronisation complète : $\forall i \ x_i^t = s^t$

$$\text{Jacobienne en } \mathbf{x} = \mathbf{s}, \quad \mathbf{J} = \left((1 - \epsilon)\mathbf{I} + \frac{\epsilon}{N}\mathbf{G} \right) f'(s^t)$$

$$\text{Lyapunov transverse : } \lambda_{\perp} = \lambda + \ln(1 - \epsilon)$$

$$\text{Seuil de synchro : } \epsilon^* = 1 - \exp(-\lambda)$$

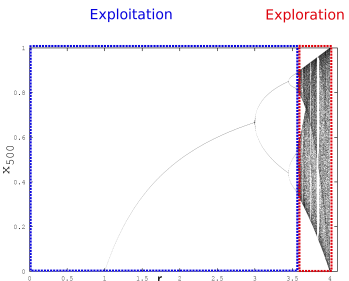
- ▶ Gaz d'itérations couplées (GIC) [Shibata and Kaneko, 2003] :
 cellules mobiles sur grille $\Rightarrow \mathbf{G}$ non stationnaire.

Réseau d'applications logistiques pour l'Intelligence en essaim - Agents logistiques

- ▶ Idées fondatrices des "agents logistiques" :
 - ▶ f générateur interne de décisions des agents
 - ▶ Deux paramètres en jeu : couplage ϵ et contrôle a
 - ▶ x variable de décision \Rightarrow $Actions(x)$
- ▶ Problématique nouvelle : "tout" peut varier avec t

$$\mathbf{x}^{t+1} = \left((1 - \epsilon^t)\mathbf{I} + \frac{\epsilon^t}{N^t} \mathbf{G}^t \right) \mathbf{f}(\mathbf{x}^t, \mathbf{a}^t)$$

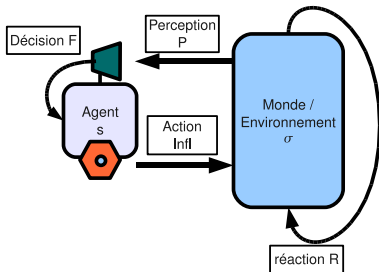
- ▶ Conséquences : clusters de synchronisation partielle, étude de \mathbf{G}^t .



Système multi-agent logistique (SMAL).

- ▶ Agents situés dans un environnement d'état σ ,
- ▶ agents $A_i, i = 1, \dots, N$ d'état s_i ,
- ▶ perceptions P_i , influence I_i (modèle Influence-réaction),

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

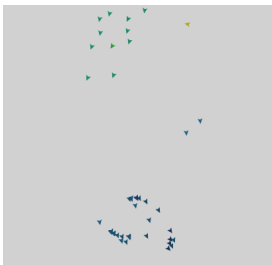
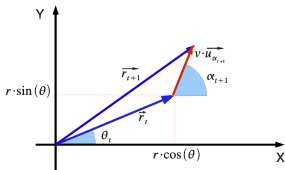


Effet de synchronisation par couplage : flocking

- ▶ Etat de l'agent logistique 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,
 - ▶ ϵ 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
 $\alpha_i = 2 \pi x_i$.
- ▶ Simulation ci-contre avec $\epsilon = 0.96$ et
 $a_i = \text{rand}(0, 1)$
- ▶ cf. [Charrier et al., 2007]



Convergence vers un point fixe par contrôle paramétrique : fourmi logistique

Processus sensorimoteur - fourmi logistique sur
un TSP :

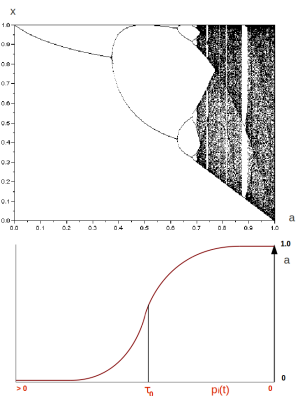
- ▶ Perception-décision :

$$\begin{cases} a_i^{t+1} = \frac{1}{1 + e^{\alpha (P_i(\mathcal{T}^t) - \tau_0)}} \\ x_i^{t+1} = f(x_i^t, a_i^{t+1}) \end{cases}$$

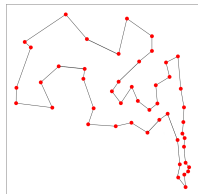
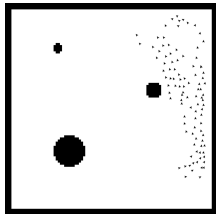
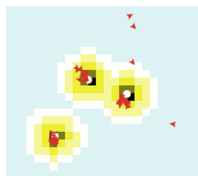
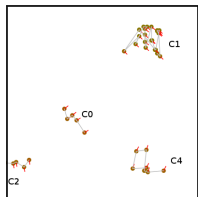
- ▶ Actions :

- ▶ $x_i^{t+1} \Rightarrow$ choix arc de déplacement (rang selon phéromones décroissantes),
- ▶ déplacement sur le noeud correspondant,
- ▶ Mise à jour du champ de phéromone \mathcal{T}^{t+1}

- ▶ cf. [Charrier et al., 2010]



Applications...



Bilan - Perspectives / Questions ouvertes

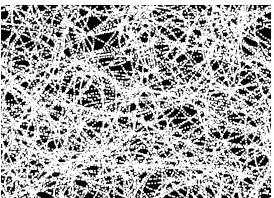
Bilan :

- ▶ Synchronisation d'états internes des agents → dynamique de groupes, clusters.
- ▶ Contrôle paramétrique → adaptation à l'environnement, optimisation.

Questions :

- ▶ Nouvelle métaheuristique pour l'optimisation ?
- ▶ Outil de simulation.
- ▶ Etude de la synchronisation (liens avec graphes dynamiques) et de la stabilité.
- ▶ Autres générateurs chaotiques...

Pensée complexe...





Abarbanel, H., Rulkov, N., and Sushchik, M. (1996).
Generalized synchronization of chaos : The auxiliary system
approach.

*Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids And Related
Interdisciplinary Topics*, 53(5) :4528–4535.



Beni, G. and 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.



Charrier, R., Bourjot, C., and Charpillet, F. (2007).
Flocking as a synchronization phenomenon with logistic agents.
In ECCS'07, European Conference on Complex Systems, Dresden,
Dresden.



Charrier, R., Bourjot, C., and Charpillet, F. (2010).
A deterministic metaheuristic approach using logistic ants for
combinatorial optimization.

In ANTS 2010, volume 6234 of *LNCS*, pages 344–351, Berlin
Heidelberg. Springer.



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. and Kaneko, K. (2003).

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

Physica D, 181 :197–214.