

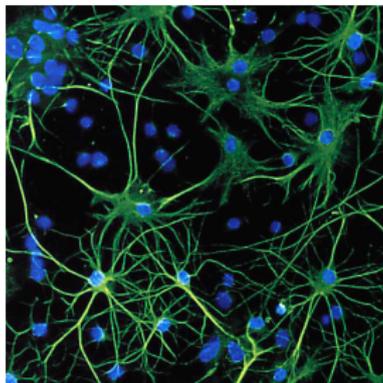
Les fourmis au pays des TIC et des puces



Frédéric Guinand

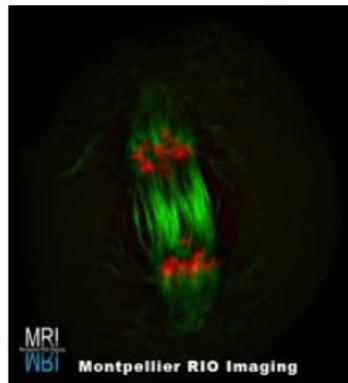
✦ **ALGOTEL 2016** ✦





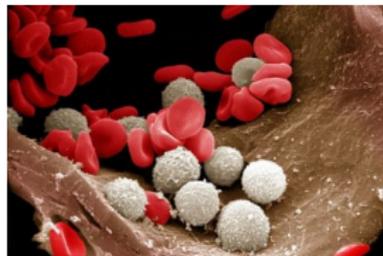
Réseaux de neurones

Algorithmes génétiques

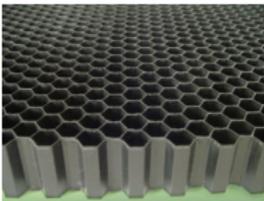
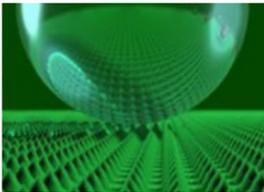


Système immunitaire

Dynamique tas de sable



la Nature : source d'inspiration



Les fourmis



- architecture
- agriculture
- élevage



Les fourmis



Actions collectives

- franchissement d'obstacles
- transport collectif
- tri (couvain, nourriture)



Comportement de groupes

Pourquoi ?

- quels ont été les processus de l'évolution ayant menés aux sociétés animales ?
→ [E. O. Wilson 1975] (sociobiologie)
- le comportement est-il "optimal" ?
→ [Krebs & Davies 1984] (approche évolutionniste de l'écologie comportementale)

Comment ?

- quels mécanismes permettent d'expliquer les structures formées par le groupe ?
→ [Deneubourg & Goss 1989]

Allelomimétisme

l'action d'un individu dépend de l'action de ses voisins



- phénomène courant dans le vivant
- indépendant degré de complexité des individus

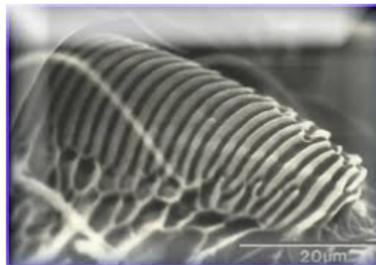


allelomimétisme \Leftrightarrow
communications/interactions

communications/interactions chez les fourmis

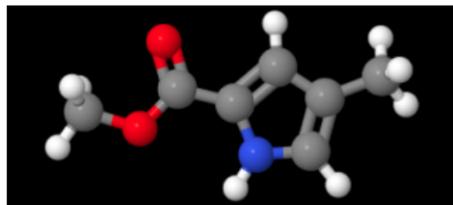
acoustique

stridulation



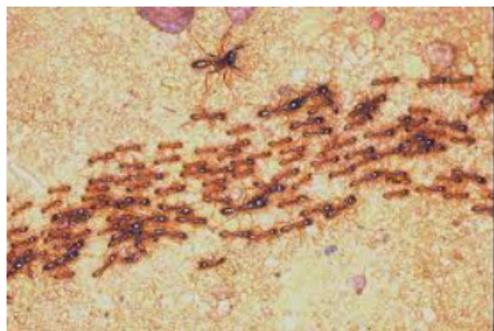
chimique
phéromones

tactile
antennation / trophallaxie



les phéromones

- produites par plusieurs glandes
 - phéromones sexuelles, d'agrégation (reine - ouvrières), de territoire : identification des membres de la colonie
 - phéromones '*no entry*' [Robinson et al. Nature 2005]
 - **phéromones de recrutement** → forme indirecte de l'allelomimétisme
- ⇒ boucle de **rétro-action positive**



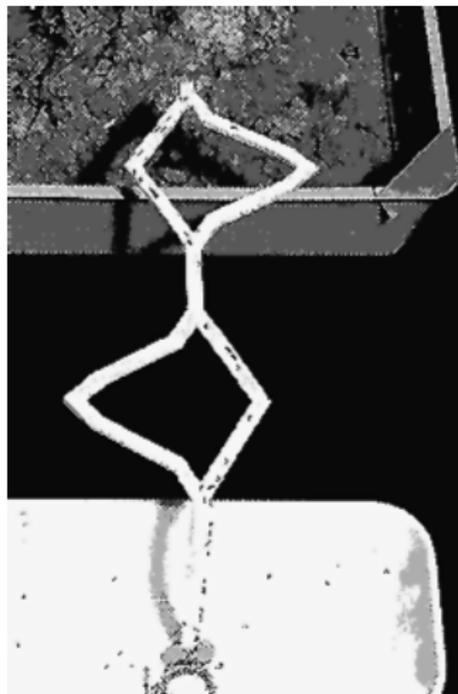
phéromones → plus court chemin

- forme de communication/coordination indirecte : **stigmergie** [Pierre-Paul Grassé 1959]
- mécanisme à la base de la détermination du plus court chemin
- expérience dite du *double bridge*

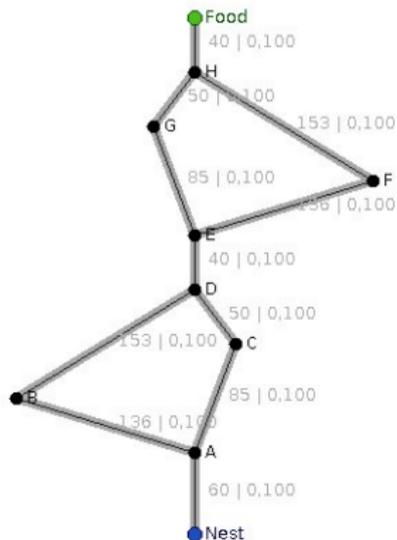
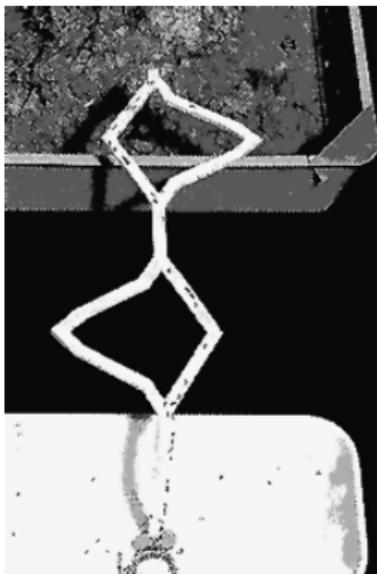
Naturwissenschaften 76, 579 – 581 (1989) © Springer-Verlag 1989

Self-organized Shortcuts in the Argentine Ant

S. Goss, S. Aron, J. L. Deneubourg, and J. M. Pasteels
Unit of Behavioural Ecology, C.P. 231, Université Libre de Bruxelles,
B-1050 Bruxelles



modélisation numérique du comportement des fourmis réelles

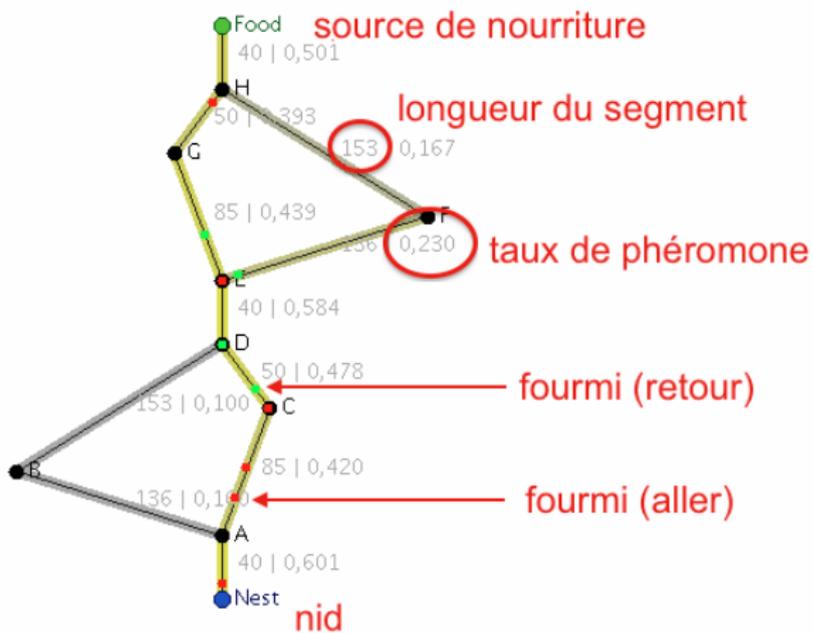


fourmis artificielles

Principe

- double pont : un graphe orienté (l'environnement)
- les fourmis déposent des **phéromones** sur les arêtes
- le choix de l'arête est **probabiliste**
- quantité de phéromones ↗ probabilité de choix ↗
⇒ boucle de **rétro-action positive**,
- premiers mouvements : **marche aléatoire**
- fluctuation de départ + rétro-action positive ⇒ renforcement du choix (bon ou mauvais)
mécanisme de rétro-action négative : **l'évaporation**

démonstration



Ant System

APPEARED IN PROCEEDINGS OF ECAL91 - EUROPEAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL LIFE, PARIS, FRANCE,
ELSEVIER PUBLISHING, 134-142.

Distributed Optimization by Ant Colonies

Alberto Colomi, Marco Dorigo, Vittorio Maniezzo
Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano
Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italy

IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B, Vol.26, No.1, 1996, pp.1-13

The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents

Marco Dorigo^{*^}, *Member, IEEE*, Vittorio Maniezzo^{%^}, and Alberto Colomi[#]

~ 15000 citations

Principe général

- processus itératif : m fourmis, p itérations
- au cours d'une itération
 - chaque fourmi choisit le sommet suivant en fonction d'une **régle de transition**
 - jusqu'à atteindre le sommet destination
- à la fin de l'itération, les taux de phéromones sont modifiés selon une **régle de mise à jour des phéromones**
- démarrage d'une nouvelle itération

Règle de transition

- choix du prochain sommet dépend de :
 - τ_{ij} : taux de phéromone
 - η_{ij} : la **visibilité** : valeur qui dépend du problème (coût, distance, poids, etc.)

$$p_{ij}^f = \frac{(\tau_{ij})^\alpha \times (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{k \in V(i)} (\tau_{ik})^\alpha \times (\eta_{ik})^\beta}$$

paramètres α et β pondération solution globale / heuristique locale ($\alpha = 1$)

Règle de mise à jour des phéromones

- les phéromones d'une arête (i, j) sont mises à jour en fonction de :
 - F_{ij} : ensemble des fourmis qui ont traversé cette arête durant l'intervalle $[t, t'$
 - ρ : le taux d'évaporation

$$\tau_{ij}(t') = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{f \in F_{ij}} \Delta_{ij}^f$$

Problèmes polynomiaux \rightarrow problèmes NP-difficiles ?

- plus court chemin : problème "simple" [Dijkstra 1959]
- problèmes NP-difficiles ?
 - *TSP* : problème du voyageur de commerce
 - *QAP* : problème d'affectation quadratique
 - *bin packing*



problème du voyageur de commerce

- données : n villes et D la matrice des distances entre les villes
- objectif : traverser chaque ville une fois et une seule en minimisant la distance totale parcourue
- modèle : graphe complet

TSP \rightarrow *AS-TSP*

Algorithme

- processus itératif : m fourmis, k itérations
- au cours d'une itération
 - chaque fourmi choisit le sommet suivant en fonction d'une **régle de transition**
 - jusqu'à avoir visité l'ensemble des sommets du graphe
- à la fin de l'itération, les taux de phéromones sont modifiés selon une **régle de mise à jour des phéromones**
- démarrage d'une nouvelle itération

Règle de transition

- \bar{V}_i^f : villes voisines de i **non** encore **visitées** par la fourmi f (liste tabou)
- τ_{ij} : taux de **phéromones** sur l'arête (i, j)
- $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$: **valeur heuristique**

$$p_{ij}^f = \frac{\tau_{ij} \eta_{ij}^\beta}{\sum_{k \in \bar{V}_i^f} \tau_{ik} \eta_{ik}^\beta}$$

Mise à jour des phéromones

$$\tau_{ij}(t') = (1 - \rho)\tau_{ij} + \sum_{f \in \text{fourmis}} \Delta_{ij}^f$$

avec

$$\Delta_{ij}^f = \frac{Q}{L^f}$$

Q : constante et L longueur du tour

⇒ quantité de phéromones déposées dépend de la qualité du tour construit

Analyse

- complexité $O(kn^2m) \rightarrow O(n^3)$
- après convergence une fraction des fourmis "en promenade"
⇒ exploration continue

Qualité des solutions

- petites instances : résultats équivalents aux meilleurs algorithmes
- problème : taille instance ↗ qualité de la solution ↘
- convergence prématurée vers minima locaux

exploitation \longleftrightarrow exploration
diversification \longleftrightarrow intensification

Améliorations

- *EAS* : élitisme
- *MMAS* : **Max-Min Ant System** [Stützle & Hoos 1997]
- *ACS* : **Ant Colony System** [Dorigo & Gambardella 1997]
 - renforcement de l'exploitation : dépôt + évaporation pour le meilleur tour uniquement
 - amélioration de l'exploration : chaque passage pénalise l'arête
- instances de grandes dimensions : **couplage** avec une procédure de **recherche locale** (2-opt) [Lin & Kernighan 1973]

résultats comparables à l'état de l'art

ACO : Ant Colony Optimization

cadre général pour le développement d'heuristiques basées sur la métaphore des fourmis

fourmi artificielle

- agent logiciel au comportement **stochastique**
- construction **itérative** d'une solution par ajout d'éléments à une solution partielle
- choix des éléments :
 - **phéromones** : mémoire de long terme
 - **valeurs heuristiques** : information/optimisation locale

représentation du problème ?

Représentation du problème

- **graphe de construction**
 - un ensemble de **composants** → sommets
 - un ensemble de **connexions** entre les composants → arêtes
 - à chaque arête (sommet) peut être associée une valeur heuristique et un taux de phéromones
 - une solution s'exprime comme une séquence de composants
- une fonction **objectif** : solution \leftrightarrow coût
- des contraintes (option)

Objectif : produire une solution de coût minimum

Difficulté : exprimer un problème en respectant ce cadre

ACO : Bin Packing

Problème

- n éléments de taille $w_i < W$
- des boîtes de capacité limitée à W
- objectif : affecter les éléments aux boîtes de manière à minimiser le nombre de boîtes utilisées
- NP-difficile

[Levine & Ducatelle 2004]

TSP \longleftrightarrow BPP

- TSP : ordonner les éléments
- BPP : grouper les éléments

ACO : Bin Packing

Remarque

- les éléments de même taille sont interchangeables
⇒ les éléments de même taille sont regroupés

Phéromones

- TSP : τ_{ij} désirabilité pour la ville i d'être suivie par la ville j
- BPP : τ_{ij} désirabilité pour un élément de taille i d'être regroupé avec un élément de taille j dans la même boîte

Heuristique

- *first-fit decreasing*
- $\eta_j = w_j$

ACO : Bin Packing

Méthode de résolution

- fourni commence initialement avec l'ensemble des éléments à ranger et une boîte vide
- itérativement jusqu'à épuisement des éléments :
 - 1 choix d'un nouvel élément en fonction de la **règle de transition**
 - 2 lorsque les éléments restants ne peuvent plus être inclus dans la boîte courante, une nouvelle boîte est considérée
- lorsque tous les éléments ont été rangés :
 - évaluation de la solution
 - **mise à jour** de la matrice des **phéromones**

Règle de transition (fourmi f)

$$\rho_{f,j,b} = \frac{\tau_{jb} \eta_j^\beta}{\sum_{k \in E_f(b)} \tau_{kb} \eta_k^\beta}$$

$$\tau_{jb} = \frac{\sum_{i \in b} \tau_{ij}}{|b|}$$

- j éligible pour inclusion dans b
- $E_f(b)$: éléments éligibles pour inclusion dans b
- $\tau_{jb} = 1$ si la boîte est vide

Mise à jour des phéromones

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + m\Delta_{ij}(s)$$

- m nombre de fois où des éléments de taille i et de taille j sont présents ensemble dans une même boîte
- $\Delta_{ij}(s)$ la quantité déposée peut dépendre de la qualité de la solution trouvée

$$f_s = \frac{\sum_{i=1..N} (F_i/W)^\Phi}{N}$$

ACO : Bin Packing

Améliorations

- Hybrid-ACO : couplage stratégie de recherche locale

Problèmes connexes

- schéma applicable à divers problèmes d'affectation
- coloration de graphes [Costa & Hertz 1997]
- QAP, etc.

Traitement de problèmes distribués et dynamiques ?

Lever certaines contraintes

- une fourmi \longleftrightarrow une solution
- fonction de coût pour qualifier la solution globale pour la mise à jour des phéromones

Exemples de problèmes

- routage adaptatif dans les réseaux de télécommunication
- répartition dynamique de charge

Problème

- sources → noeuds intermédiaires → destinations
- les **conditions** du trafic **changent** continuellement et la **topologie** du réseau peut également **varier au cours du temps** (réseaux mobiles ad hoc)
- multiples objectifs : maximiser le débit global du réseau, minimiser les délais d'acheminement, réduire la congestion

Solutions à base de fourmis

- réseaux à commutation de circuits : *ABC : Ant-Based Control* [Schoonderwoerd et al. 1996]
- réseaux à commutation de paquets : *AntNet* [Di Caro & Dorigo 1998]
- réseaux mobiles ad hoc : *AntHocNet* [Di Caro et al. 2004]

Routage dynamique par ACO

Principe général

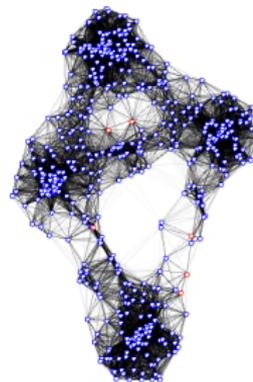
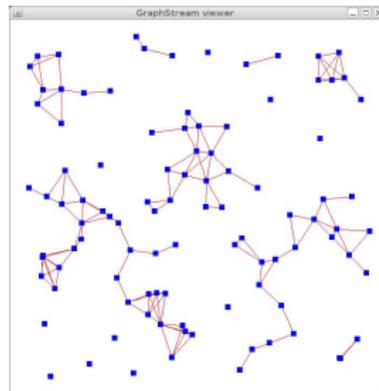
- sommet \rightarrow génération de fourmis + sommets destinations
- aller :
 - collecte d'informations : délai, nombre de sauts, etc.
 - choix du sommet suivant selon la **règle de transition**
- retour :
 - **mise à jour** des **phéromones**
 - tables de routage du sommet i :
 $\{(d, V_{\text{phéromones}}^i) \mid d \in \text{destinations}\}$
 - $V_{\text{phéromones}}^i = \{(k, \tau_{kd}^i) \mid k \in \text{voisins}(i)\}$

Routage dans les MANETs

- **changement** rapide de la **topologie**
- bande passante limitée

Routage par les fourmis

- capacités exploratoire
 - **chemins multiples**
 - ⇒ **robustesse**



AntHocNet

- principe : utiliser l'ensemble des chemins de manière stochastique
- lors du démarrage d'un échange de données, les chemins sont construits
- source \rightarrow destination : *reactive forward ants* : déterminer des chemins multiples (application [règle de transition](#))
- destination \rightarrow source : *backward ants* : établir ces chemins ([mise à jour des phéromones](#))
- paquets sont routés stochastiquement
- au cours des échanges les routes sont maintenues et améliorées par les *proactive forward ants*.

AntHocNet

Règle de transition

$$p_{i,n,d} = \frac{(\tau_{nd}^i)^\beta}{\sum_{j \in V_d^i} (\tau_{jd}^i)^\beta}$$

Mise à jour des phéromones (chemin (i, n, \dots, d))

$$\tau_{nd}^i = \gamma \tau_{nd}^i + (1 - \gamma) t_{nd}^i$$

avec t_{nd}^i une valeur qui dépend du nombre de hops entre i et d (passant par n), ainsi que des longueurs des queues des paquets en attente d'envoi au niveau MAC sur chaque sommet traversé

$$t_{nd}^i = \left(\frac{\sum_{k \in \text{path } i \rightarrow d} (Q_{mac}^k + 1) T_{mac}^k + h T_{hop}}{2} \right)^{-1}$$

Résultats

- simulation Qualnet
- performances supérieures à *AODV* : *Adhoc On-demand Distance Vector*

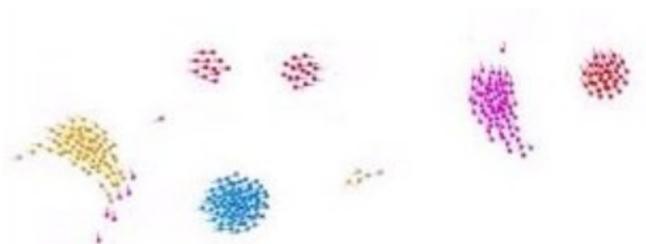
Répartition dynamique de charge

Objectif

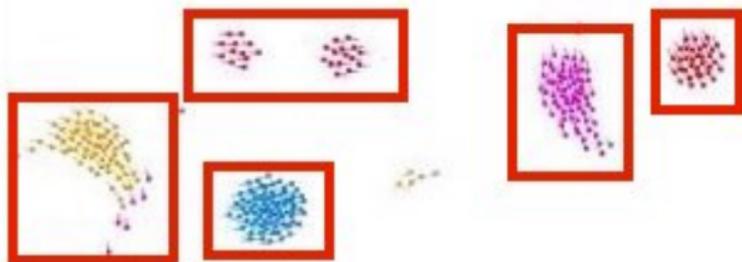
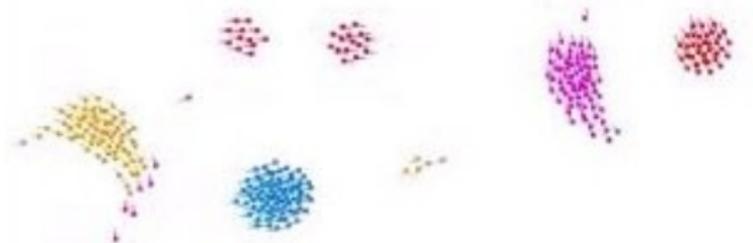
- équilibrer la charge et minimiser les communications entre processeurs
 - compromis
 - équilibrage \implies distribuer les calculs
 - minimiser les communications \implies regrouper les calculs
- problème par nature décentralisé et dynamique

Exemple : simulation distribuée

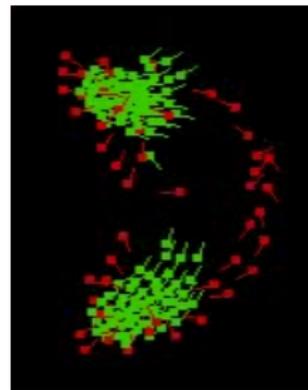
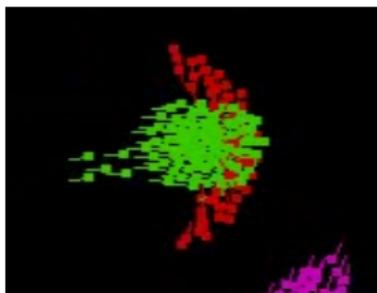
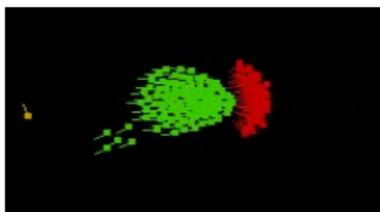
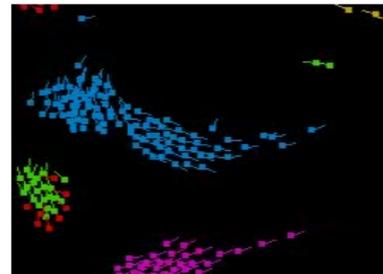
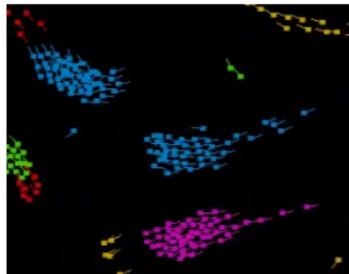
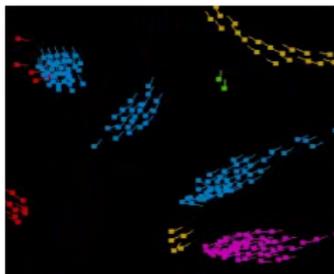
- Application
 - nombreuses entités en interaction (poissons, proies, prédateurs)
 - modèle inspiré des *boids* [Reynolds 1986]
 - 3+1 règles : séparation, alignement, cohésion et prédation
- Environnement de calcul
 - un nombre fixé k de machines
 - hypothèse : le réseau d'interconnexion est un graphe complet



- détecter des groupes d'entités fortement communicantes
- entités appartenant au même groupe → allocation au même processeur



les groupes changent au cours de la simulation



Répartition dynamique de charge : $AntCO^2$

⇒ on ne recherche **pas l'optimalité** à chaque instant mais une forme de **stabilité des groupes** dans le temps

phéromones → inertie

Phéromones

- coopération ↔ compétition
- coopération pour la **détection** des groupes
- compétition pour la **séparation** les groupes

⇒ **différentiation des phéromones** (couleur)

Principe général

- graphe :
 - entités \longleftrightarrow sommets
 - arêtes \longleftrightarrow interactions
- k processeurs \longrightarrow k colonies \longrightarrow k couleurs de phéromones
- les fourmis se déplacent d'entité en entité dans le graphe d'interaction
- entité \longleftrightarrow couleur \longrightarrow processeur
- allocation entité \longrightarrow processeur **déterministe**
phéromone majoritaire sur l'entité détermine le processeur

AntCO²

AntCO²

- colonie $C_a \rightarrow$ phéromone a
- fourmi $\in C_a$ attirée par phéromone a repoussée par les autres phéromones
- déplacements stochastiques : règle de transition
- fourmis déposent des phéromones du type de leur colonie sur les arêtes et sur les sommets
- mise à jour des phéromones
- évaporation locale

Règle de transition (1)

- p_C : ensemble des phéromones
- fourni $f \in C_a$

$$P_{(f,u,v)}^{(1)} = \frac{\frac{\tau_{(u,v)}^a}{\sum_{b \in p_C} \tau_{(u,v)}^b}}{\sum_{w \in V_u} \left(\frac{\tau_{(u,w)}^a}{\sum_{b \in p_C} \tau_{(u,w)}^b} \right)}$$

Règle de transition (2)

- détection des groupes partielle
- rétro-action positive \implies certaines zones du graphe sont désertes et d'autres surpeuplées
 \implies rétro-action négative
- n_v : nombre de fourmis sur le sommet v
- V'_u : ensemble des voisins de u qui ont au moins une fourmi

$$P_{(f,u,v)}^{(2)} = \begin{cases} 1, & \text{si } n_v = 0 \\ \frac{1/n_v}{\sum_{w \in V'_u} (1/n_w)} & \text{sinon} \end{cases}$$

Règle de transition

$$P_{(f,u,v)} = \begin{cases} 1, & \text{si } P_{(f,u,v)}^{(2)} = 1 \\ \gamma P_{(f,u,v)}^{(1)} + (1 - \gamma) P_{(f,u,v)}^{(2)} & \text{sinon} \end{cases}$$

Mise à jour des phéromones pour l'arête (u, v) traversée par f

$$\tau_{(u,v)}^a = \tau_{(u,v)}^a + \Delta_a$$
$$\forall b \in \rho_C, \tau_{(u,v)}^b = (1 - \rho)\tau_{(u,v)}^b$$

Mise à jour des phéromones pour le sommet u à l'arrivée de f

$$\tau_u^a = \tau_u^a + \Delta_a$$
$$\forall b \in \rho_C, \tau_u^b = (1 - \rho)\tau_u^b$$

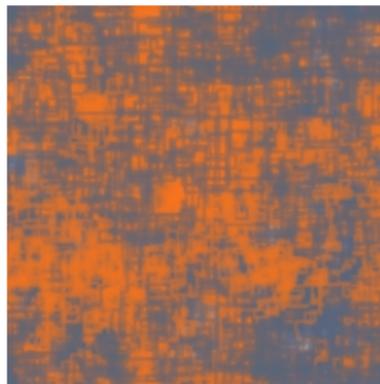
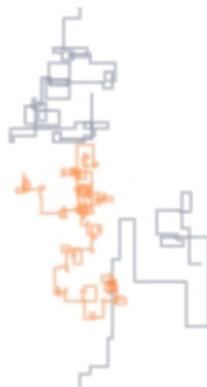
- ρ taux d'évaporation
- $f \in C_a$
- ρ_C ensemble des phéromones

Simulation distribuée



Bien d'autres applications

- robotique collective (*swarm robotics*)
- peinture (Nicolas Monmarché)
- musique (Nicolas Monmarché)



[Deneubourg & Goss 1989]

"les principes gouvernant l'auto-organisation dans les sociétés animales peuvent être utilisés pour la conception de systèmes de contrôle distribués fiables pour des groupes de robots"

[Biebricher, Nicolis & Schuster 1995]

*"Order in Nature is not and **cannot be realized by a centralized process**. Order can only be maintained by **self-organization**. Self-organizing systems allow adaptation to environmental conditions; for instance they react to modifications in the environment thanks to a thermodynamical answer that make them extraordinary **flexible** and **robust** with respect to external **perturbations**. We want to underlined the superiority of self-organizing systems compared to usual human technology that avoid carefully complexity and manage in a centralized way the majority of technical processes"*

Merci de votre attention



Stefan Balev



Cyrille Bertelle



"Ant-One" Dutot



Frédéric Guinand



Damien Olivier



Yoann Pigné



Guilhelm Savin



GraphStream



RI2C