

Intelligence des essaims (Swarm Intelligence)

Présentation
Ghislain O'Mahony

Les auteurs / caractéristiques ouvrage

➤ Les auteurs

- Eric Bonabeau
 - Chef scientifique Icosystem corporation (Cambridge)
 - S'appuie sur les enseignements tirés des comportements des insectes pour développer algorithmes et modèles comportementaux appliqués au business
- Marco Dorigo
 - Associé de recherche Fonds national belge pour la recherche scientifique
- Guy Theraulaz
 - Associé de recherche au CNRS

➤ Caractéristiques ouvrage (1999)

- Publié dans la collection « Santa Fe Institute Studies in the sciences of complexity »
- Santa Fe : fondé en 1984. Institut indépendant multidisciplinaire travaillant sur la science de la complexité
- ISBN 0 19 513159 2.

➤ Autres sources bibliographiques :

- Article Harvard Business Review : « Swarm Intelligence, a whole new way to think about business », mai 2001
- Le comportement collectif des insectes in Pour la science n° 314 décembre 2003
- D. Robilliard, C Fonlupt, Laboratoire d'Informatique du Littoral

Question centrale

- Qui commande ici ? Qui émet les ordres, élabore les plans, préserve l'équilibre de la colonie ?

Maeterlinck, naturaliste anglais, 1927, observant le comportement des colonies de fourmis, termites, abeilles

Les insectes sociaux

- Qu'est ce qui les gouverne ?
- Qui donne les ordres, élabore les plans, d'où vient cette intelligence collective ?
- ➔ **Chaque insecte semble avoir son agenda qui s'intègre dans le tout, sans intervention de superviseur**

Quelques faits et chiffres

- 10^{18} insectes sur terre (estimation !!)
- ~ 2% des insectes ont un comportement social
 - Toutes les fourmis
 - Toutes les termites
 - Certaines abeilles
- 50% des insectes sociaux sont des fourmis
- Poids moyen d'une fourmi entre 1 et 5 mg
- Poids total des fourmis = poids total des humains

Quelques exemples

- Les fourmis *Atta* coupent des feuilles d'arbres et organisent des autoroutes pour aller les chercher
- Les fourmis *Oecophylla* construisent des ponts avec leurs corps
- Les fourmis *Eciton* organisent des raids de chasse comprenant parfois jusqu'à 200 000 individus

Spécialisation

- Les fourmis vivent sur terre depuis 100 millions d'années, 7 millions d'années pour l'homo sapiens

- Taille d'une colonie de fourmis : de 30 à plusieurs millions
 - Reproduction → reine
 - Défense → soldats
 - Recherche de nourriture → travailleurs spécialisés
 - Construction du nid → fourmis spécialisées

Théorie de l'auto-organisation

- L'auto-organisation (AO) explique l'émergence d'un comportement collectif « intelligent » macroscopique par des interactions simples au niveau microscopique
- Note : l'AO n'exclut pas la complexité au niveau individuel. Elle suppose simplement qu'à un certain niveau, que les insectes se comportent comme des entités simples
 - Cas du vol d'une abeille

Auto organisation chez les insectes sociaux : les ingrédients

1. L'Amplification positive (ou recrutement et renforcement)

- Exemples de « recrutement » (de collègues) ou de renforcement :
 - Chez les fourmis ; dépôt d'une substance (phéromone) : + les fourmis utilisent un chemin, + la concentration de phéromone augmente, attirant alors d'autres fourmis (la distance joue également)
 - (cf. page suivante)

2. Le Renforcement négatif (aide à la stabilisation)

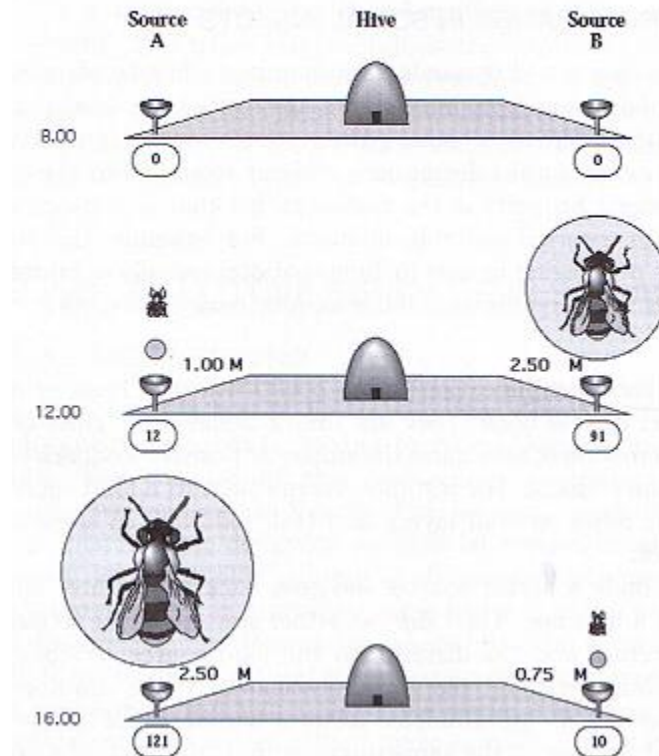
- Contrebalance les processus de recrutement / renforcement
- Exemple (dans le cas de recherche de nourriture, chez abeilles, fourmis) :
 - Saturation, embouteillage à la source de nourriture, concurrence entre différentes sources

3. Amplification des fluctuations (marches aléatoires, erreurs...) → Nouvelles solutions

4. Interactions multiples

- Un système auto organisé exige une densité minimale d'agents réagissant aux actions de leurs homologues et mutuellement tolérants

Amplification positive chez les abeilles à la recherche de nouvelles sources de nourriture



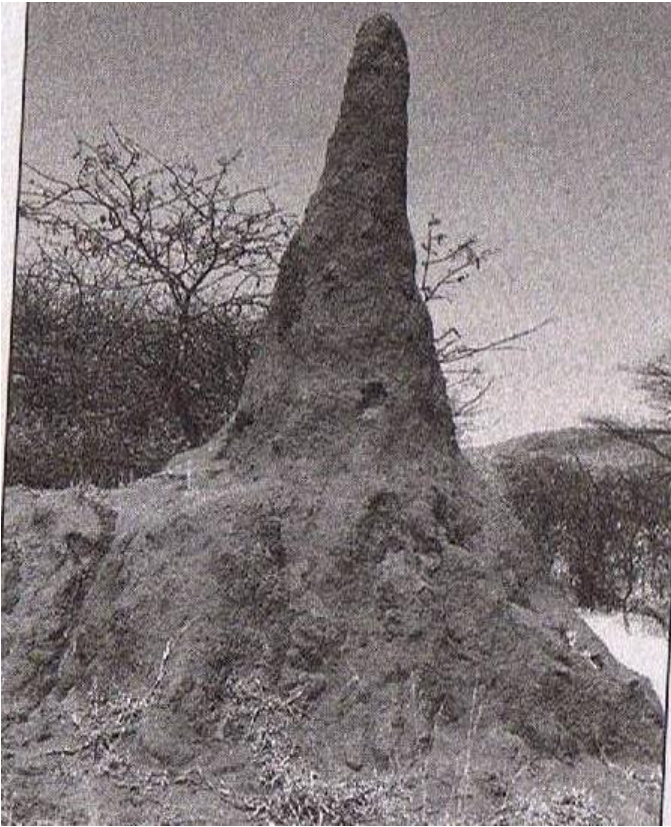
Un changement du degré de concentration en sucre de la source de nourriture (A vs. B) entraîne à +/- brève échéance un déplacement du chemin d'approvisionnement des fourmis

Caractérisation de l'Auto-organisation (AO)

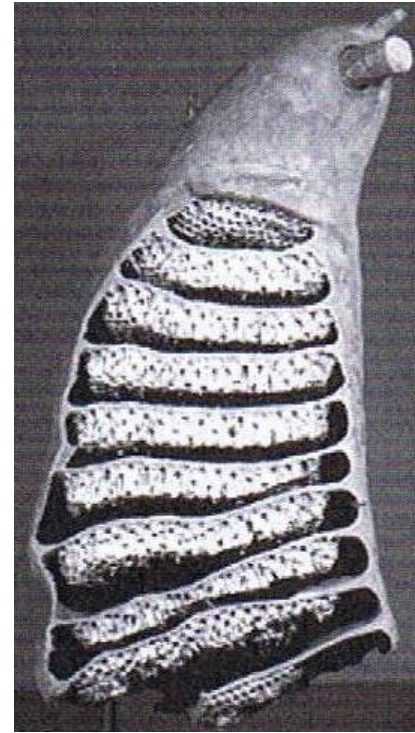
- Création de structures spatio-temporelles (nids, organisation sociale...)
- Multi-stabilité (coexistence de plusieurs états **stables**)
- Changement rapide de comportements lorsque des paramètres varient (accumulation d'un dépôt par les termites *macrotermes*)

Quelques exemples

Fourmilière africaine



Nid de guêpes



Stigmergie chez les insectes sociaux

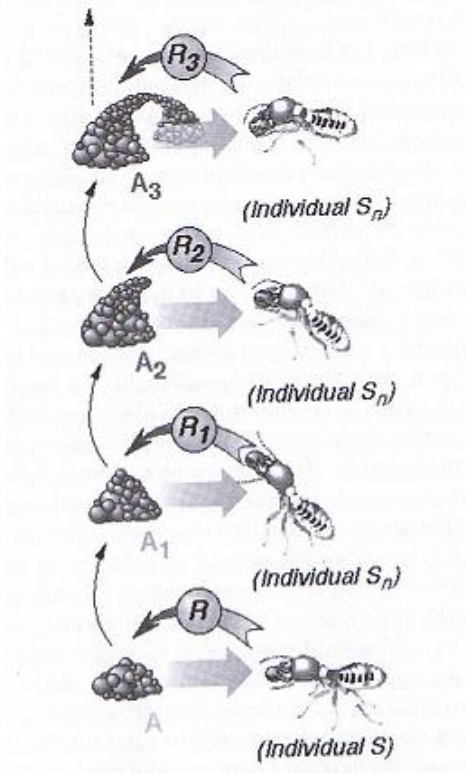
- L'AO peut être :
 - Directe : contact par les antennes, contact visuel
 - Indirecte : des insectes peuvent inter-agir quand l'un des individus modifie son environnement et que les autres en trouvent leur comportement modifié

➔ Stigmergie

- La stigmergie permet par une communication indirecte de modifier le comportement des insectes

Stigmergie chez les insectes sociaux (termites, fourmis...)

➔ Notion de stigmergie appliquée à la construction de piles par les termites



➤ Mécanisme qui relie des comportements individuels d'insecte et des comportements de masse :

- Un comportement individuel modifie l'environnement
- L'environnement modifié influe et modifie le comportement individuel des autres agents.
- Etc.

➤ Exemples :

- Chemins auto organisés par les fourmis (dépôt de phéromone) : modification environnement qui conduit les collègues à suivre ce chemin
- ...

Application de la stigmergie à l'intelligence artificielle (IA)

- Remplacer coordination via communication directe par des interactions indirectes :
 - Intéressant si l'on veut concevoir des agents simples et réduire la communication entre agents
- Construction par incrément
 - Les termites s'appuient sur ce qui a été construit par d'autres termites pour apporter leur propre contribution
 - Trouve des applications en IA (construction d'une nouvelle solution à partir de solutions antérieures)
- Stigmergie souvent associé à flexibilité :
 - Changement d'un environnement via perturbation externe
 - Réponse appropriée des agents à cette perturbation, la colonie peut répondre collectivement à cette perturbation avec des insectes développant les mêmes comportements
 - En IA : très précieux : pas besoin de reprogrammer des agents pour répondre à cette perturbation

Les insectes et l'informatique

- Le monde des fourmis obtient à partir de comportements simples d'excellents résultats sur des problèmes complexes
- Colonie de fourmis → **système décentralisé de résolutions de problèmes**
- L'étude du comportement des fourmis fournit un modèle pour la création de nouveaux modèles informatiques
- Système à base de colonies de fourmis (ACO)

Avantages

- L'AO nous apprend qu'émergent des solutions non prévues au niveau individuel
- Le chemin vers une solution est généralement non défini mais émergent
- Pas besoin de contrôle centralisé (difficile à mettre en œuvre dans les réseaux de communication par exemple)
- Possibilité de construction de micro-robots (exploration spatiale ou médecine)

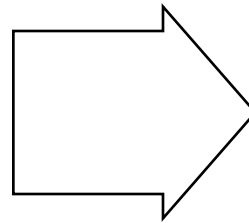
Guide de lecture (pour les pros) : conjectures sur le futur de l'intelligence artificielle

- Chaque chapitre traite d'un comportement particulier observé chez les insectes sociaux, et des applications de ce comportement dans le domaine de l'IA :
 - Chapitre 2 : recherche de nourriture
 - Chapitre 3 : division du travail
 - Chapitre 4 : regroupement et tri
 - Chapitre 5 et 6 : construction
 - Chapitre 7 : transport / coopération

Stigmergie et fourmis

- Les algorithmes de fourmis exploitent la stigmergie artificielle comme technique de coordination du système multi-agents et de progression vers la solution de problèmes complexes

Stigmergie
artificielle



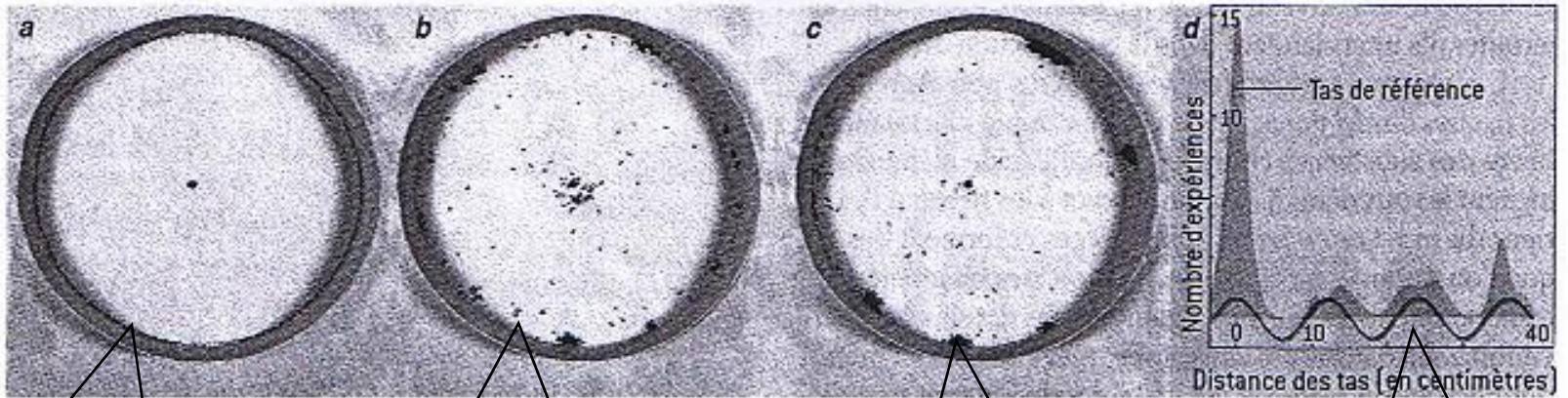
Communication indirecte transmise par une modification numérique de l'environnement par l'intermédiaire d'agents locaux communicants

Analogie avec les fourmis



Domaines	Applications générales	Applications Marketing
Recherche de nourriture	Routage en télécom	Optimisation des tournées
Division du travail	Allocation des tâches	Spécialisation des fonctions
Agrégation des cadavres	Analyse de données Partition de graphes	Segmentation
Architecture des nids	Auto-assemblage	Design
Transport coopératif	Coopération de robots	Equipes pluridisciplinaires / panels Partenariats

Zoom sur l'agrégation de cadavres



cadavres disposés
uniformément
autour d'une arène

les fourmis forment
des tas répartis de
façon uniforme sur
le pourtour

Au final, les tas les plus
gros attirent toujours +
de cadavres, dans un
processus auto-
catalytique
d'amplification

les tas sont
répartis
régulièrement
les uns par
rapport aux
autres

Les applications marketing : Southwest Airlines s'inspire des techniques de recherche de nourriture des fourmis, pour optimiser taux de remplissage / qualité de service du fret

- Utilisation capacité cargo : seulement 7%
- Goulots d'étranglement sur quelques hubs

- Employés chargent le fret sur le premier avion à destination
- Perte de temps à déplacer le fret inutilement

- Analyse comportementale du mode de détermination par les fourmis des sources de nourriture

- Recherche appliquée au problème Southwest
- Parfois il vaut mieux laisser le fret dans un avion allant dans la mauvaise direction

- ↘ taux de transfert fret > 80%
- ↘ charge de travail manutentionnaires de 20%
- ↘ transferts de nuit

- Réduction des espaces de stockage / manutention
- Réduction / minimisation coûts salariaux
- Génération nouveau business (moins d'avions volent à pleine capacité)



Les applications marketing : Hewlett Packard et l'industrie des telecom s'inspirent des techniques de recherche de nourriture des fourmis, pour optimiser le routage des appels

- Chercheurs Hewlett Packard, dev agents logiciel :
 - qui scannent le réseau télécom et laissent des données (phéromone digital) pour identifier les canaux les moins congestionnés
 - Appels téléphoniques suivent ensuite les routes identifiées par les agents
 - Phénomène d'évaporation du phéromone reproduit informatiquement → permet au programme des ajustements rapides aux conditions de trafic
- France Telecom, British Telecom, MCI WorldCom s'inspirent des observations de recherche de nourriture des fourmis pour développer leur système de routage des appels



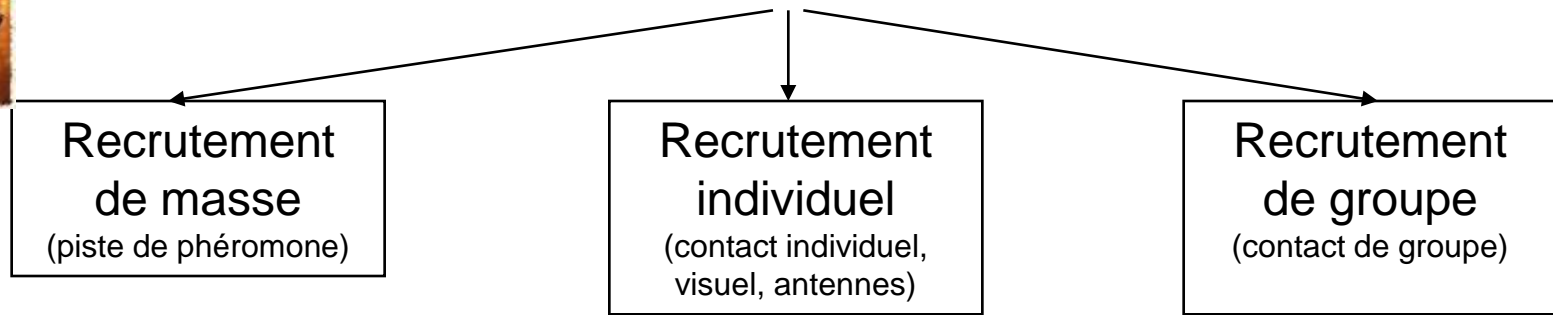
2 avantages .

Reroutage appels vers routes les moins congestionnées :
meilleure qualité de service

Désengorgement routes les plus congestionnées via ajustement en temps réel :
meilleure qualité de service

Les techniques d'auto-organisation inspirées de l'observation des insectes sociaux trouvent aussi des applications pour permettre aux entreprises de trouver des nouveaux marchés : le cas ENRON

3 options pour attirer vers nouvelles sources de nourriture :



- Efficace
- Pas flexible

- Très grandes colonies

- Flexible
- Peu efficace

- Petites unités

- Flexible
- Efficace

- Colonies de taille moyenne

→ **Analogie avec les entreprises :**

Très grands groupes

PME / TPE

Groupes taille moyenne, **ENRON**



Les applications marketing. Cas ENRON (suite) : un exemple – probant ?- de recrutement de groupe

➤ Avril 1999 :

- ENRON trader physique d'énergie
- Le patron des activités gas trading décide de créer le marché de trading on line d'énergie :
 - Commence à recruter en interne
 - Les recrues enrôlent d'autres employés ENRON
 - En qqs mois, 300 personnes sont mobilisées pour développer le système en temps réel de trading,

➤ En 2001 :

- Le trading en temps réel d'énergie représente 1 Mds \$ de transactions
- Permet de faire grossir la capitalisation du groupe



Qu'est ce qui explique le succès des « insectes sociaux »

- On retrouve les insectes sociaux partout dans l'écosphère car :
 1. Flexibilité
 - Capacité d'une colonie de s'adapter à un environnement changeant
 2. Résilience
 - Si l'un ou plusieurs des agents échoue, le groupe peut encore fonctionner
 3. Auto organisation
 - Les activités ne sont pas soumises à un contrôle central
 - Et ne sont pas supervisées localement
- ➔ **Si les patrons d'entreprises intègrent bien les 2 premières notions, il n'en va pas de même de la troisième**

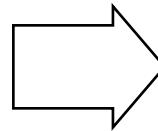
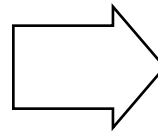
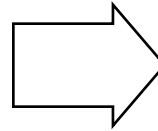
Conclusion : la compréhension des mécanismes d'auto-organisation des insectes sociaux ouvre de vastes opportunités dans le monde de l'entreprise



Agrégation des cadavres

Séparation nids d'abeilles

Adoubement par la reine abeille de certaines vassales



Etc.



Segmentation,
analyse de données
(banques,...)

Spin offs conglomérats

Politique RH

Nouveau cadre de pensée : remise en cause du contrôle, de la supervision. Entreprise agile, entreprise bottom up

Les freins

- **Systeme auto-organisé :**
 - Peu connu
 - Heurte le rationalisme / les systemes de pensee des managers

- **Analogie insectes / employés**
 - Difficile à concevoir