

Intelligence en essaim

Algorithmes fourmis

Damien Olivier



2007

Plan

- 1 Sociétés d'insectes
 - Communications
 - Comportements
- 2 Émergence et auto-organisation
 - Simulation des comportements
- 3 En guise de conclusion

Les insectes sociaux

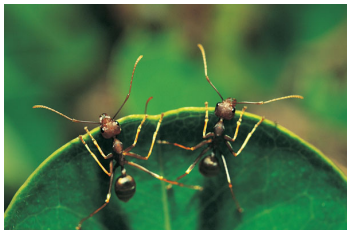
- Modèle naturel d'un système collectif décentralisé
 - Qu'est qui les gouverne ?
 - Qui donne les ordres, qui planifie ?
- Génèse d'une intelligence collective ?
 - Entités constitutives aux comportement corélés ;
 - But commun ;
 - Capacités d'adaptabilités et d'apprentissage au niveau global.

Mais alors ?

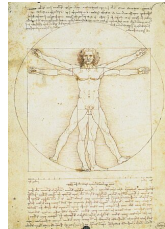
La fourmilière = Super-organisme

L'homme face à la fourmi

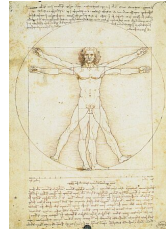
L'homme face à la fourmi



L'homme face à la fourmi

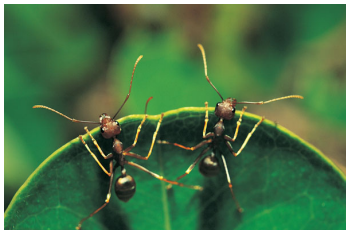


L'homme face à la fourmi

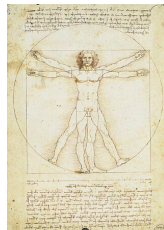


Apparition : 100 millions d'années

L'homme face à la fourmi



Apparition : 100 millions d'années



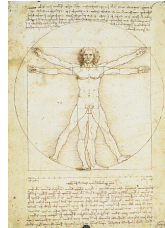
160 000 ans (Homo sapiens)

50-60 ans Homo informaticus ...

L'homme face à la fourmi



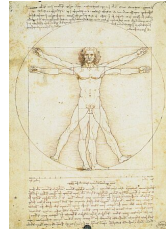
Taille : 1 mm à 3 cm



L'homme face à la fourmi

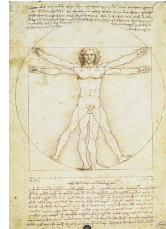


Taille : 1 mm à 3 cm



1m 85

L'homme face à la fourmi

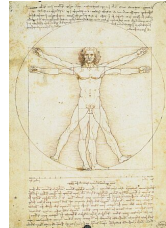


Poids : un millionième de notre poids

L'homme face à la fourmi



Poids : un millionième de notre poids



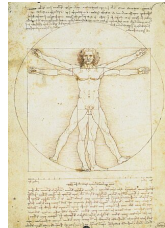
80 kg !

L'homme face à la fourmi



Nombre d'individus : 1% des 10^{18} d'insectes

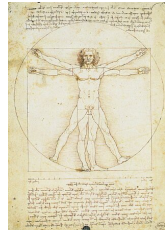
10 millions de milliards d'individus



L'homme face à la fourmi

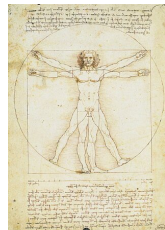


Nombre d'individus : 1% des 10^{18} d'insectes
10 millions de milliards d'individus



10×10^9 vers 2050

L'homme face à la fourmi

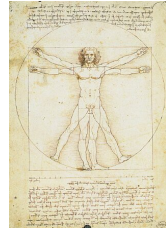


Masse totale : voisine de celle de l'humanité

L'homme face à la fourmi



Masse totale : voisine de celle de l'humanité

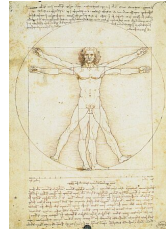


Voisine de celle des fourmis

L'homme face à la fourmi



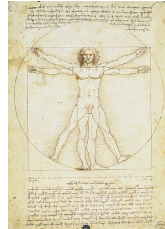
Animal (eu)social



L'homme face à la fourmi

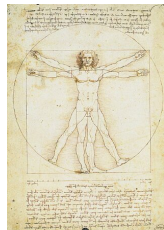
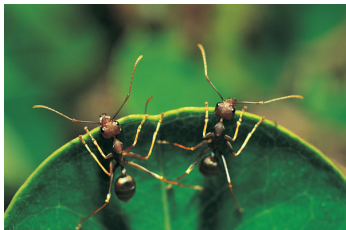


Animal (eu)social



Animal social

L'homme face à la fourmi



Question Amusante

Quel est l'organisme social dominant à la surface du sol ?

La fourmi un animal eusocial

- **Coopération dans le soin aux jeunes ;**
- Les descendants aident leurs parents ;
- Il existe des individus spécialisés - reproduction - tâches communautaires -

La fourmi un animal eusocial

- Coopération dans le soin aux jeunes ;
- Les descendants aident leurs parents ;
- Il existe des individus spécialisés - reproduction - tâches communautaires -

La fourmi un animal eusocial

- Coopération dans le soin aux jeunes ;
- Les descendants aident leurs parents ;
- Il existe des individus spécialisés - reproduction - tâches communautaires -

Paradoxe de l'eusociabilité

- Seule une minorité se reproduit ;
- Les autres sont altruistes et aident les reproducteurs ;
- Ils renoncent donc (semble t-il) à transmettre leurs gènes !

Bien du groupe \neq Sélection naturelle

Cela semble aller à l'encontre de la sélection naturelle, en particulier la transmission du comportement altruiste devrait disparaître !

Paradoxe de l'eusociabilité

- Seule une minorité se reproduit ;
- Les autres sont altruistes et aident les reproducteurs ;
- Ils renoncent donc (semble t-il) à transmettre leurs gènes !

Bien du groupe \neq Sélection naturelle

Cela semble aller à l'encontre de la sélection naturelle, en particulier la transmission du comportement altruiste devrait disparaître !

Paradoxe de l'eusociabilité

- Seule une minorité se reproduit ;
- Les autres sont altruistes et aident les reproducteurs ;
- Ils renoncent donc (semble t-il) à transmettre leurs gènes !

Bien du groupe \neq Sélection naturelle

Cela semble aller à l'encontre de la sélection naturelle, en particulier la transmission du comportement altruiste devrait disparaître !

Paradoxe de l'eusociabilité

- Seule une minorité se reproduit ;
- Les autres sont altruistes et aident les reproducteurs ;
- Ils renoncent donc (semble t-il) à transmettre leurs gènes !

Bien du groupe \neq Sélection naturelle

Cela semble aller à l'encontre de la sélection naturelle, en particulier la transmission du comportement altruiste devrait disparaître !

L'eusociabilité (partiellement) expliquée

- Les femelles sont diploïdes (un double jeu de chromosomes) ;
- Les males sont haploïdes (un seul jeu de chromosomes) ;
 - Ils proviennent d'oeufs non fécondés ;

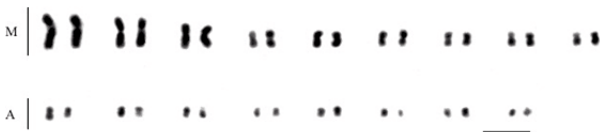


Figura 2. Cariótipo diploide de *C. brasiliensis*. Barra = 5µm

L'eusociabilité (partiellement) expliquée

- Les femelles sont diploïdes (un double jeu de chromosomes) ;
- Les males sont haploïdes (un seul jeu de chromosomes) ;
 - Ils proviennent d'oeufs non fécondés ;

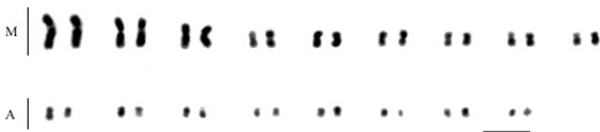
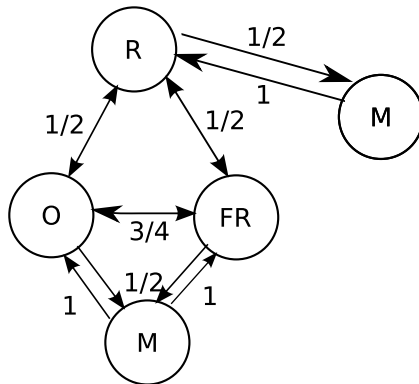


Figura 2. Cariótipo diploide de *C. brasiliensis*. Barra = 5µm

L'eusociabilité (partiellement) expliquée

Une explication la *proximité génétique* :



Communications

Quatre formes de communication :

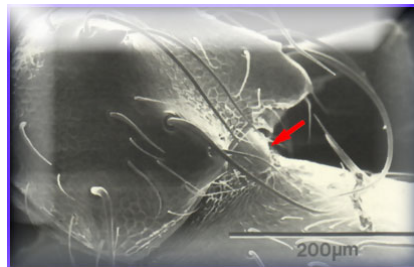
- Sonore ;
- Tactile ;
- Visuelle ;
- Chimique.

Communications sonores

- Avec organes stridulatoires
 - Au secours !
 - Le resto est bon !
 - Venez m'aider.
- Sans organes stridulatoires
 - Se tape la tête contre les murs.

Communications sonores

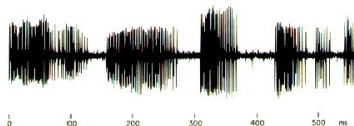
- Avec organes stridulatoires
 - Au secours !
 - Le resto est bon !
 - Venez m'aider.
- Sans organes stridulatoires
 - Se tape la tête contre les murs.



Organe de stridulation

Communications sonores

- Avec organes stridulatoires
 - Au secours !
 - Le resto est bon !
 - Venez m'aider.
- Sans organes stridulatoires
 - Se tape la tête contre les murs.



Communications sonores

- Avec organes stridulatoires
 - Au secours !
 - Le resto est bon !
 - Venez m'aider.
- Sans organes stridulatoires
 - Se tape la tête contre les murs.



Aphenogaster croondant

Communications sonores

- Avec organes stridulatoires
 - Au secours !
 - Le resto est bon !
 - Venez m'aider.
- Sans organes stridulatoires
 - Se tape la tête contre les murs.

Communications sonores

- Avec organes stridulatoires
 - Au secours !
 - Le resto est bon !
 - Venez m'aider.
- Sans organes stridulatoires
 - Se tape la tête contre les murs.

Communications tactiles

- Antennation ;
- Grâce aux pattes (régurgitation).



2 fourmis communiquant à l'aide des antennes



Attouchement d'antennes

Communication visuelle

- Première forme de communication progressivement abandonnée au cours de l'évolution ;
- Les fourmis entament une danse pour recruter souvent combinée avec de la communication tactile ;
- Certaines fourmis retrouvent leur chemin de façon visuelle



Danse de recrutement

Communication visuelle

- Première forme de communication progressivement abandonnée au cours de l'évolution ;
- Les fourmis entament une danse pour recruter souvent combinée avec de la communication tactile ;
- Certaines fourmis retrouvent leur chemin de façon visuelle
 - Un labyrinthe formé de boîtes dans chaque boîte 2 issues au dessus de chaque issue une forme géométrique. Une seule issue conduit à la boîte suivante.



Danse de recrutement

Communications chimiques

- La forme de communication la plus sophistiquée ;
- Utilisation de phéromones ;
- Les odeurs sont captées par les antennes ;
- Phéromone = carte d'identité ;
- Les phéromones servent à :
 - L'attraction ;
 - Le recrutement ;
 - L'alerte ;
 - L'identification des autres castes ;
 - La reconnaissance des différents stades de développement ;
 - La discrimination entre fourmis étrangères et congénères.

Communications chimiques

- La forme de communication la plus sophistiquée ;
- Utilisation de phéromones ;
- Les odeurs sont captées par les antennes ;
- Phéromone = carte d'identité ;
- Les phéromones servent à :
 - L'attraction ;
 - Le recrutement ;
 - L'alerte ;
 - L'identification des autres castes ;
 - La reconnaissance des différents stades de développement ;
 - La discrimination entre fourmis étrangères et congénères.

Communications chimiques

- La forme de communication la plus sophistiquée ;
- Utilisation de phéromones ;
- Les odeurs sont captées par les antennes ;
- Phéromone = carte d'identité ;
- Les phéromones servent à :
 - L'attraction ;
 - Le recrutement ;
 - L'alerte ;
 - L'identification des autres castes ;
 - La reconnaissance des différents stades de développement ;
 - La discrimination entre fourmis étrangères et congénères.

Communications chimiques

- La forme de communication la plus sophistiquée ;
- Utilisation de phéromones ;
- Les odeurs sont captées par les antennes ;
- Phéromone = carte d'identité ;
- Les phéromones servent à :
 - L'attraction ;
 - Le recrutement ;
 - L'alerte ;
 - L'identification des autres castes ;
 - La reconnaissance des différents stades de développement ;
 - La discrimination entre fourmis étrangères et congénères.

Communications chimiques

- La forme de communication la plus sophistiquée ;
- Utilisation de phéromones ;
- Les odeurs sont captées par les antennes ;
- Phéromone = carte d'identité ;
- Les phéromones servent à :
 - L'attraction ;
 - Le recrutement ;
 - L'alerte ;
 - L'identification des autres castes ;
 - La reconnaissance des différents stades de développement ;
 - La discrimination entre fourmis étrangères et congénères.

Communications chimiques



Dépôt de phéromones

Communications chimiques



Piste de phéromones

Communications chimiques



Recrutement

Communications chimiques



Des comportements variés

- Pratiquent :
 - La guerre à outrance ;
 - L'esclavage ;
 - L'agriculture ;
 - ...
- Fabriquent :
 - Des édifices collectifs ;
 - Des pièges ;
 - Des antibiotiques ;

Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Des comportements variés

- Pratiquent :
 - La guerre à outrance ;
 - L'esclavage ;
 - L'agriculture ;
 - ...
- Fabriquent :
 - Des édifices collectifs ;
 - Des pièges ;
 - Des antibiotiques ;



Position de combat

Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Des comportements variés

- Pratiquent :
 - La guerre à outrance ;
 - L'esclavage ;
 - L'agriculture ;
 - ...
- Fabriquent :
 - Des édifices collectifs ;
 - Des pièges ;
 - Des antibiotiques ;



Duel de fourmis

Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Des comportements variés

- Pratiqueur :
 - La guerre à outrance ;
 - L'esclavage ;
 - L'agriculture ;
 - ...
- Fabriquant :
 - Des édifices collectifs ;
 - Des pièges ;
 - Des antibiotiques ;



Le meurtre a eu lieu

Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Des comportements variés

- Pratiqueur :
 - La guerre à outrance ;
 - L'esclavage ;
 - L'agriculture ;
 - ...
- Fabriquant :
 - Des édifices collectifs ;
 - Des pièges ;
 - Des antibiotiques ;



Récolte de miela

Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Des comportements variés

- Pratiquent :
 - La guerre à outrance ;
 - L'esclavage ;
 - L'agriculture ;
 - ...
- Fabriquent :
 - Des édifices collectifs ;
 - Des pièges ;
 - Des antibiotiques ;



Atta coupeuse de feuilles

Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Des comportements variés

- Pratiqueur :
 - La guerre à outrance ;
 - L'esclavage ;
 - L'agriculture ;
 - ...
- Fabriquant :
 - Des édifices collectifs ;
 - Des pièges ;
 - Des antibiotiques ;



Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Des comportements variés

- Pratiquent :
 - La guerre à outrance ;
 - L'esclavage ;
 - L'agriculture ;
 - ...
- Fabriquent :
 - Des édifices collectifs ;
 - Des pièges ;
 - Des antibiotiques ;



Champignonnière

Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Des comportements variés

- Pratiquent :
 - La guerre à outrance ;
 - L'esclavage ;
 - L'agriculture ;
 - ...
- Fabriquent :
 - Des édifices collectifs ;
 - Des pièges ;
 - Des antibiotiques ;

Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Des comportements variés

- Pratiquent :
 - La guerre à outrance ;
 - L'esclavage ;
 - L'agriculture ;
 - ...
- Fabriquent :
 - Des édifices collectifs ;
 - Des pièges ;
 - Des antibiotiques ;



Fourmilière

Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Des comportements variés

- Pratiquent :
 - La guerre à outrance ;
 - L'esclavage ;
 - L'agriculture ;
 - ...
- Fabriquent :
 - Des édifices collectifs ;
 - Des pièges ;
 - Des antibiotiques ;



Sauterelle piégée

Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Des comportements variés

- Pratiquent :
 - La guerre à outrance ;
 - L'esclavage ;
 - L'agriculture ;
 - ...
- Fabriquent :
 - Des édifices collectifs ;
 - Des pièges ;
 - Des antibiotiques ;

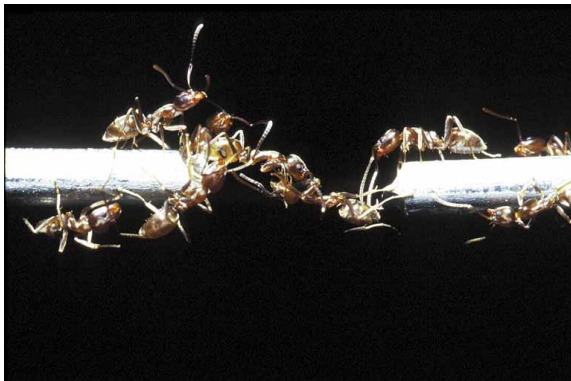


"Culture" d'antibiotique

Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Des comportements variés



Comportement collectif

Les grands mots

⇒ Intelligence Collective

Plan

- 1 Sociétés d'insectes
 - Communications
 - Comportements

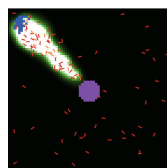
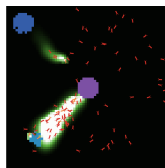
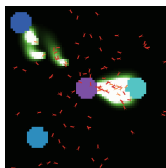
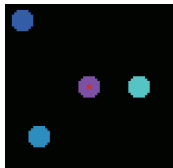
- 2 Émergence et auto-organisation
 - Simulation des comportements

- 3 En guise de conclusion

Le recrutement

Recherche de nourriture

- Un **grand nombre** de fourmis se déplacent, plus ou moins au **hasard** ;
- Elles déposent des **phéromones** ;
- Si elles découvrent une source elles retournent au nid en **déposant une trace** ;
- Cette trace **attire** les autres fourmis.



Que nous apprennent elles ?

- **Communications indirectes** par l'intermédiaire de l'environnement ;
- **Stigmergie** - stigma : piqûre, ergon : travail, œuvre = œuvre stimulante - ;
- **Interactions multiples** ;
- **Rétroaction positive** : L'environnement agit sur la fourmi qui suit la trace de phéromone et rétroagit sur celui en renforçant la trace ;
Création de structure, **morphogénèse**.
- **Rétroaction négative** : Les traces de phéromones s'évaporent assez rapidement, une fois que la nourriture sera épuisée, de moins en moins de fourmis auront tendance à suivre la trace qui va finir par disparaître ;
Stabilisation des structures, **morphostase**.
- **Amplifications des fluctuations** : , la fluctuation engendrée par la fourmi quittant la piste et découvrant une ressource riche est amplifiée par la boucle de rétroaction positive qui se met ensuite en place. L'aspect aléatoire permet de découvrir de nouvelle solution.
- Nécessité d'un nombre critique d'individus.

Que nous apprennent elles ?

- **Communications indirectes** par l'intermédiaire de l'environnement ;
- **Stigmergie** - stigma : piqûre, ergon : travail, œuvre = œuvre stimulante - ;
- **Interactions multiples** ;
- **Rétroaction positive** : L'environnement agit sur la fourmi qui suit la trace de phéromone et rétroagit sur celui en renforçant la trace ;
Création de structure, **morphogénèse**.
- **Rétroaction négative** : Les traces de phéromones s'évaporent assez rapidement, une fois que la nourriture sera épuisée, de moins en moins de fourmis auront tendance à suivre la trace qui va finir par disparaître ;
Stabilisation des structures, **morphostase**.
- **Amplifications des fluctuations** : , la fluctuation engendrée par la fourmi quittant la piste et découvrant une ressource riche est amplifiée par la boucle de rétroaction positive qui se met ensuite en place. L'aspect aléatoire permet de découvrir de nouvelle solution.
- Nécessité d'un nombre critique d'individus.

Que nous apprennent elles ?

- **Communications indirectes** par l'intermédiaire de l'environnement ;
- **Stigmergie** - stigma : piqûre, ergon : travail, œuvre = œuvre stimulante - ;
- **Interactions multiples** ;
- **Rétroaction positive** : L'environnement agit sur la fourmi qui suit la trace de phéromone et rétroagit sur celui en renforçant la trace ;
Création de structure, **morphogénèse**.
- **Rétroaction négative** : Les traces de phéromones s'évaporent assez rapidement, une fois que la nourriture sera épuisée, de moins en moins de fourmis auront tendance à suivre la trace qui va finir par disparaître ;
Stabilisation des structures, **morphostase**.
- **Amplifications des fluctuations** : , la fluctuation engendrée par la fourmi quittant la piste et découvrant une ressource riche est amplifiée par la boucle de rétroaction positive qui se met ensuite en place. L'aspect aléatoire permet de découvrir de nouvelle solution.
- Nécessité d'un nombre critique d'individus.

Que nous apprennent elles ?

- **Communications indirectes** par l'intermédiaire de l'environnement ;
- **Stigmergie** - stigma : piqûre, ergon : travail, œuvre = œuvre stimulante - ;
- **Interactions multiples** ;
- **Rétroaction positive** : L'environnement agit sur la fourmi qui suit la trace de phéromone et rétroagit sur celui en renforçant la trace ;
Création de structure, **morphogénèse**.
- **Rétroaction négative** : Les traces de phéromones s'évaporent assez rapidement, une fois que la nourriture sera épuisée, de moins en moins de fourmis auront tendance à suivre la trace qui va finir par disparaître ;
Stabilisation des structures, **morphostase**.
- **Amplifications des fluctuations** : , la fluctuation engendrée par la fourmi quittant la piste et découvrant une ressource riche est amplifiée par la boucle de rétroaction positive qui se met ensuite en place. L'aspect aléatoire permet de découvrir de nouvelle solution.
- Nécessité d'un nombre critique d'individus.

Que nous apprennent elles ?

- **Communications indirectes** par l'intermédiaire de l'environnement ;
- **Stigmergie** - stigma : piqûre, ergon : travail, œuvre = œuvre stimulante - ;
- **Interactions multiples** ;
- **Rétroaction positive** : L'environnement agit sur la fourmi qui suit la trace de phéromone et rétroagit sur celui en renforçant la trace ;
Création de structure, **morphogénèse**.
- **Rétroaction négative** : Les traces de phéromones s'évaporent assez rapidement, une fois que la nourriture sera épuisée, de moins en moins de fourmis auront tendance à suivre la trace qui va finir par disparaître ;
Stabilisation des structures, **morphostase**.
- **Amplifications des fluctuations** : , la fluctuation engendrée par la fourmi quittant la piste et découvrant une ressource riche est amplifiée par la boucle de rétroaction positive qui se met ensuite en place. L'aspect aléatoire permet de découvrir de nouvelle solution.
- Nécessité d'un nombre critique d'individus.

Que nous apprennent elles ?

- **Communications indirectes** par l'intermédiaire de l'environnement ;
- **Stigmergie** - stigma : piqûre, ergon : travail, œuvre = œuvre stimulante - ;
- **Interactions multiples** ;
- **Rétroaction positive** : L'environnement agit sur la fourmi qui suit la trace de phéromone et rétroagit sur celui en renforçant la trace ;
Création de structure, **morphogénèse**.
- **Rétroaction négative** : Les traces de phéromones s'évaporent assez rapidement, une fois que la nourriture sera épuisée, de moins en moins de fourmis auront tendance à suivre la trace qui va finir par disparaître ;
Stabilisation des structures, **morphostase**.
- **Amplifications des fluctuations** : , la fluctuation engendrée par la fourmi quittant la piste et découvrant une ressource riche est amplifiée par la boucle de rétroaction positive qui se met ensuite en place. L'aspect aléatoire permet de découvrir de nouvelle solution.
- Nécessité d'un nombre critique d'individus.

Que nous apprennent elles ?

- **Communications indirectes** par l'intermédiaire de l'environnement ;
- **Stigmergie** - stigma : piqûre, ergon : travail, œuvre = œuvre stimulante - ;
- **Interactions multiples** ;
- **Rétroaction positive** : L'environnement agit sur la fourmi qui suit la trace de phéromone et rétroagit sur celui en renforçant la trace ;
Création de structure, **morphogénèse**.
- **Rétroaction négative** : Les traces de phéromones s'évaporent assez rapidement, une fois que la nourriture sera épuisée, de moins en moins de fourmis auront tendance à suivre la trace qui va finir par disparaître ;
Stabilisation des structures, **morphostase**.
- **Amplifications des fluctuations** : , la fluctuation engendrée par la fourmi quittant la piste et découvrant une ressource riche est amplifiée par la boucle de rétroaction positive qui se met ensuite en place. L'aspect aléatoire permet de découvrir de nouvelle solution.
- Nécessité d'un nombre critique d'individus.

Caractéristiques d'un phénomène auto-organisé établi

- Création de structures d'organisations spatio-temporelles ;
- Existence de bifurcation ;
- Coexistence possible de plusieurs états stables.

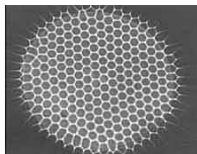
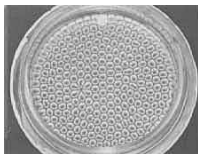
Émergence

Définition

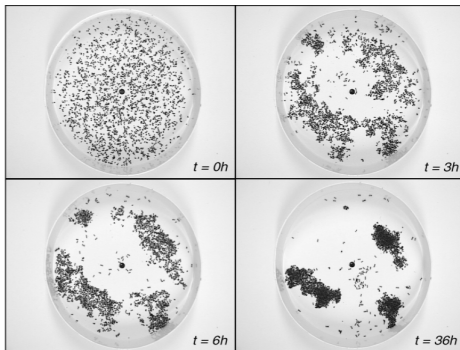
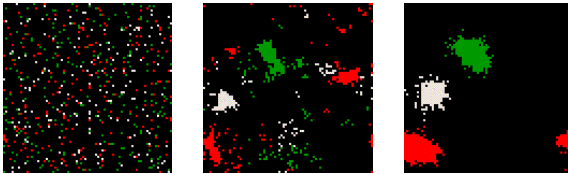
Idée : Une propriété est émergente dans un système quand elle est le résultat des interactions entre les entités du système et qu'elle ne peut pas être décrite au niveau des entités.

"Le tout est plus que la somme des parties"

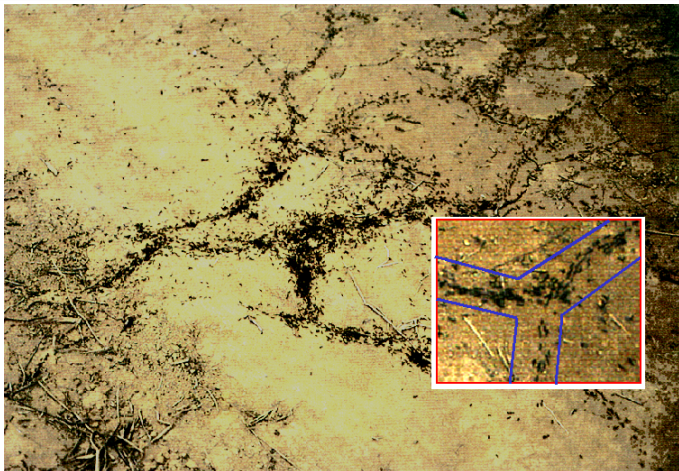
Exemple : Thermodynamique (Boltzmann, Prigogine ...)



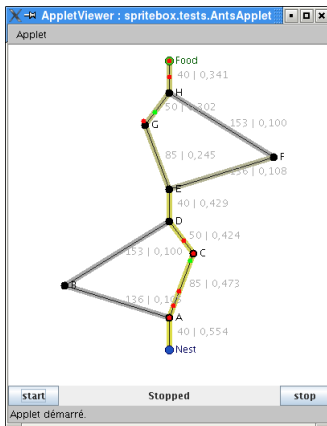
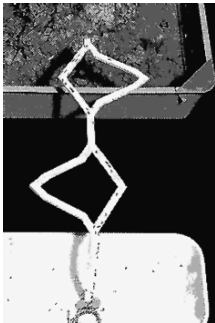
Tri du couvain



Fourragement et recrutement



Expérience de Deneubourg



Que constatons nous ?

- Les fourmis déposent des phéromones lors de leur trajet de retour.
- Elles reviennent plus vite vers le nid si leur chemin est plus court.
- Au bout d'un certain temps, presque toutes les fourmis choisiront le plus court chemin en suivant les traces déposées.
- Les fourmis peuvent déposer + ou - de phéromones en fonction de la qualité de la nourriture trouvée.

Plan

- 1 Sociétés d'insectes
 - Communications
 - Comportements
- 2 Émergence et auto-organisation
 - Simulation des comportements
- 3 En guise de conclusion

Intérêt du modèle biologique

- Non centralisé :
 - Pas de contrôle central ;
 - Approche distribuée ;
 - Economie cognitive (Agents réactifs plus que cognitifs).
- Fiabilité ;
- Flexibilité ;
- Robustesse ;
- Permet de résoudre des problèmes dans un environnement évolutif et dynamique ;
- Approche heuristique.

Plan

- 4 Optimisation discrète
 - Voyageur de commerce

- 5 Répartition du travail et allocation de tâches

Le problème du voyageur de commerce

- Il s'agit de trouver le chemin le plus court entre n villes, qui passe une seule fois par chaque ville. Cycle hamiltonien minimal dans un graphe pondéré.
- Problème simple ! il n'y a qu'à analyser toutes les solutions.
- Erreur le temps de calcul croit de manière exponentielle. A partir de 30 villes cela prendrait ... plusieurs milliards d'années !
- Le nombre de possibilités (nombre de trajets possibles) est de $\frac{(n-1)!}{2}$.
- Problème NP complet.

Nbre de villes	Nbre de possibilités	temps (1 trajet = 1 μ s)
5	12	12 μ s
10	181 440	0,18 s
15	43 milliards	12 h
20	60 E+15	1928 ans
25	310 E+21	9,8.10 ⁹ ans

Le problème du voyageur de commerce

- Il s'agit de trouver le chemin le plus court entre n villes, qui passe une seule fois par chaque ville. Cycle hamiltonien minimal dans un graphe pondéré.
- Problème simple ! il n'y a qu'à analyser toutes les solutions.
- Erreur le temps de calcul croit de manière exponentielle. A partir de 30 villes cela prendrait ... plusieurs milliards d'années !
- Le nombre de possibilités (nombre de trajets possibles) est de $\frac{(n-1)!}{2}$.
- Problème NP complet.

Nbre de villes	Nbre de possibilités	temps (1 trajet = 1 μ s)
5	12	12 μ s
10	181 440	0,18 s
15	43 milliards	12 h
20	60 E+15	1928 ans
25	310 E+21	9,8.10 ⁹ ans

Le problème du voyageur de commerce

- Il s'agit de trouver le chemin le plus court entre n villes, qui passe une seule fois par chaque ville. Cycle hamiltonien minimal dans un graphe pondéré.
- Problème simple ! il n'y a qu'à analyser toutes les solutions.
- Erreur le temps de calcul croit de manière exponentielle. A partir de 30 villes cela prendrait ... plusieurs milliards d'années !
- Le nombre de possibilités (nombre de trajets possibles) est de $\frac{(n-1)!}{2}$.
- Problème NP complet.

Nbre de villes	Nbre de possibilités	temps (1 trajet = 1 μ s)
5	12	12 μ s
10	181 440	0,18 s
15	43 milliards	12 h
20	60 E+15	1928 ans
25	310 E+21	9,8.10 ⁹ ans

Le problème du voyageur de commerce

- Il s'agit de trouver le chemin le plus court entre n villes, qui passe une seule fois par chaque ville. Cycle hamiltonien minimal dans un graphe pondéré.
- Problème simple ! il n'y a qu'à analyser toutes les solutions.
- Erreur le temps de calcul croit de manière exponentielle. A partir de 30 villes cela prendrait ... plusieurs milliards d'années !
- Le nombre de possibilités (nombre de trajets possibles) est de $\frac{(n-1)!}{2}$.
- Problème NP complet.

Nbre de villes	Nbre de possibilités	temps (1 trajet = 1 μ s)
5	12	12 μ s
10	181 440	0,18 s
15	43 milliards	12 h
20	60 E+15	1928 ans
25	310 E+21	9,8.10 ⁹ ans

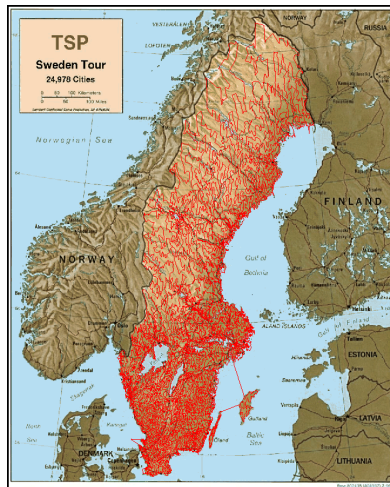
Le problème du voyageur de commerce

- Il s'agit de trouver le chemin le plus court entre n villes, qui passe une seule fois par chaque ville. Cycle hamiltonien minimal dans un graphe pondéré.
- Problème simple ! il n'y a qu'à analyser toutes les solutions.
- Erreur le temps de calcul croit de manière exponentielle. A partir de 30 villes cela prendrait ... plusieurs milliards d'années !
- Le nombre de possibilités (nombre de trajets possibles) est de $\frac{(n-1)!}{2}$.
- Problème NP complet.

Nbre de villes	Nbre de possibilités	temps (1 trajet = 1 μ s)
5	12	12 μ s
10	181 440	0,18 s
15	43 milliards	12 h
20	60 E+15	1928 ans
25	310 E+21	9,8.10 ⁹ ans

En utilisant des heuristiques

Le record (2004)



Un modèle général à base d'agents réactifs

Composé de :

- Un environnement invariant E_I , complexe par nature, non homogène et constitué d'un nombre fini de composantes $E_I = E_1, E_2, \dots, E_p$.
- Un environnement modifiable E_M , ensemble de fonctions définies sur des composantes de E_I dont les valeurs sont modifiables par des agents.

Les agents

- Un ensemble X d'agents dont les caractéristiques correspondent au schéma "stimulus-réponse"
 - Fonctions de perception : renseignements pris dans un voisinage de l'agent (V partie de E_I et restrictions de E_M à V), sur l'environnement et la société d'agents, ce qui inclus l'état propre de l'agent.
 - Fonctions d'action : permet à l'agent de modifier l'environnement qui inclut ses propres caractéristiques et celles d'autres agents.

Espace temps T discret : $\forall t \in T$, il \exists 1 état de E_M et de X déterminé pour des valeurs en t de leurs fonctions.

Modélisation du problème

Dans Ant System, des agents (fourmis virtuelles) construisent les solutions en parallèle, en visitant les villes du graphe.

- Environnement invariant
 - $G = (V, E)$ graphe complet ;
 - V ensemble des sommets = villes ;
 - E ensemble des arcs valués = distance entre 2 villes ;
 - $c_i, c_j \in V$ et $d_{ij} = d(c_i, c_j) \in E$.

Modélisation du problème

- Environnement modifiable
 - Nombre d'agents sur chaque sommet
 - $\tau_{ij}(t)$: quantité de phéromones artificielles déposées par les agents fourmis sur chaque arête (i,j) .
- Perceptions d'un agent
 - Mémorisation par l'agent k des sommets-villes déjà visités dans une tableau liste $tabu_k(.)$.
 - Voisinage du sommet i dans le graphe, ainsi que les valeurs de $\tau_{ij}(t)$ correspondantes.

Modélisation du problème

Action d'une fourmi

- Avancer du sommet i vers le sommet j . On utilise des lois de transition aléatoires :
 - $p_{ij}^k(t)$: proba que la fourmi k , située à la ville i , à l'instant t , se déplace vers la ville j .
 - $J_k(i)$: ensemble des villes qu'il reste à visiter par la fourmi k , située à la ville i .
 - η_{ij} : souhait d'ajouter l'arc (i,j) à la solution trouvée. Pour le problème du voyageur de commerce, on peut prendre

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}.$$

Modélisation du problème

Action d'une fourmi

Probabilité de choisir un arc

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{l \in J_k(i)} (\tau_{il}(t))^\alpha (\eta_{il})^\beta} & \text{si } j \in J_k(i) \\ 0 & \text{si } j \notin J_k(i) \end{cases} \quad (1)$$

avec α et β deux paramètres qui contrôlent l'importance relative donnée aux traces de phéromones par rapport à l'heuristique.

Modélisation du problème

Action d'une fourmi

- Déposer des phéromones en fin de parcours d'un cycle :
 - Lorsque la fourmi k a fini un parcours $T_k(t)$ de longueur L_k , elle met à jour les valeurs de $\tau_{ij}(t)$ en ajoutant une quantité de phéromone proportionnelle à la valeur du parcours :
 $\Delta\tau_{ij}^k(t)$

Quantité de phéromones

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{si } (i,j) \in T_k(t) \\ 0 & \text{si } (i,j) \notin T_k(t) \end{cases} \quad (2)$$

où Q est un paramètre à ajuster.

Modélisation du problème

Action d'une fourmi

- Mécanisme d'évaporation
 - Utile pour éliminer les solutions non satisfaisantes provenant de la partie aléatoire, en particulier au début.

Persistence des phéromones

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (3)$$

$\rho \in [0..1]$ coefficient d'évaporation, m nombre de fourmis.

Modélisation du problème

Algorithme

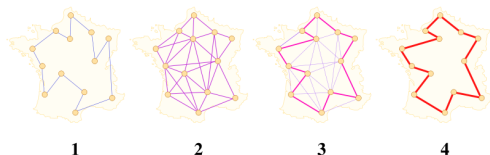
```
for  $t = 1..t_{max}$  do  
  for all fourmi  $k = 1..m$  do  
    Choisir une ville au hasard  
    for all ville non visitée  $i$  do  
      Choisir une ville  $j$ , dans la liste  $J_i^k$  des villes restantes  
      selon la formule (1)  
    end for  
    Déposer une piste  $\Delta\tau_{ij}^k(t)$  sur le trajet  $T^k(t)$  selon la  
    formule (2)  
  end for  
  Évaporer les pistes selon la formule (3)  
end for
```

Modélisation du problème

Ajustement des paramètres

- Il faut un nombre suffisant de fourmis mais s'il y en a trop l'algorithme est peu efficace ;
- Dorigo suggère les valeurs suivantes :
 - $\tau_0 = \frac{1}{nL_{nn}}$ avec L_{nn} longueur d'un chemin trouvé par la méthode du plus proche voisin ;
 - $m = n$ (nb agents = nb villes) ;
 - $\alpha = 1$ et $\beta = 5$;
 - $\rho = 0.5$ et $Q = 100$.

Résultat



Les sommets représentent les villes et l'épaisseur des arêtes la quantité de phéromone déposée.

- 1 Exemple de trajet construit par une fourmi ;
- 2 Au début du calcul, l'ensemble des fourmis va parcourir un certain nombre de trajets, chaque fourmi déposant une quantité de phéromone proportionnelle à la qualité du parcours ;
- 3 Chaque arête du meilleur chemin est plus renforcée que les autres ;
- 4 L'évaporation fait disparaître les mauvaises solutions.

Variantes

- Mises à jour locales à chaque déplacement, sans attendre la fin d'un cycle ;
- Mises à jour centralisée des phéromones : on ne marque sur le plus petit cycle trouvé par une colonie (Ant Colony System) ;

Variantes

Max-Min Ant System

- Seule la meilleure fourmi met à jour une piste de phéromone ;
- Les valeurs des pistes sont bornées par τ_{min} et τ_{max} ;
- Les pistes sont initialisées à la valeur maximum τ_{max} ;
- La mise à jour des pistes se fait de façon proportionnelle, les pistes les plus fortes sont moins renforcées que les plus faibles ;
- Une réinitialisation des pistes peut-être effectuée.

Les meilleurs résultats sont obtenus en mettant à jour la meilleure solution avec une fréquence de plus en plus forte au cours de l'exécution.

Plan

- 4 Optimisation discrète
 - Voyageur de commerce

- 5 Répartition du travail et allocation de tâches

Allocation de tâches

- Constitution de castes d'insectes spécialisés pour des tâches spécifiques, basées sur les tranches d'âges, les similarités morphologiques ou encore simplement des castes comportementales.
- Caractère adaptatif de la répartition du travail permettant le "reclassement" de certains individus et ceci de manière non centralisée.

Modèles des seuils de réponses

- Une tâche est associée à un stimulus (phéromone) incitant les individus à la réaliser ;
- Un individu possède un seuil de réponse vis à vis d'une tâche, et ceci en fonction de sa classe d'appartenance ;
- Si il y a disparition d'individus spécialisés dans une tâche, alors les stimuli associés à cette tâche doivent augmenter de façon à ce qu'elle puisse être prise en compte par d'autres individus.

Modèles des seuils de réponses

s : quantité de stimuli rattachée à une tâche donnée

Θ : seuil de réponse à une tâche pour un individu donné

- si $s \ll \Theta$ alors la proba de réponse est faible ;
- si $s \gg \Theta$ alors la proba de réponse est élevée ;

La proba de réalisation de la tâche correspond à :

$$T_{\Theta}(s) = \frac{s^n}{s^n + \Theta^n}$$

où $n > 1$ est le degré de seuil ($n = 2$, dans la suite)

Modèles des seuils de réponses

Modèle à 1 tâche

- On suppose que l'on a 1 tâche à réaliser. Un stimulus d'intensité s est associé à cette tâche et augmente si elle n'est pas réalisée.
- X_i état d'activité d'un individu i (1 il réalise la tâche 0 sinon).
- Θ_i correspond au seuil de réponse à la tâche de l'individu i .

Modèles des seuils de réponses

Modèle à 1 tâche

- Proba de passage de l'état inactif vers l'état de réalisation de la tâche :

$$P(X_i = 0 \rightarrow X_i = 1) = T_{\Theta_i}(s) = \frac{s^2}{s^2 + \Theta_i^2}$$

avec un degré de seuil = 2.

- On pose que la proba de passage de l'état actif à l'état inactif $P(X_i = 1 \rightarrow X_i = 0)$ vaut p , constant et identique pour chaque individu. $1/p$ est alors le temps moyen de la réalisation d'une tâche.

Modèles des seuils de réponses

Modèle à 1 tâche

- On fait varier l'intensité du stimulus en fonction de l'importance de l'ensemble des réalisations de tâches :

$$s(t+1) = s(t) + \delta - \alpha \eta_{act}$$

- δ est une constante d'augmentation de l'intensité par unité de temps ;
- α est une constante de diminution de l'intensité due à l'activité d'un individu ;
- η_{act} est le nombre d'individus actifs réalisant la tâche.

Si on a 2 populations : l'une avec un seuil de réponse bas et l'autre avec un seuil de réponse élevé et que la première population disparaît alors la deuxième va finir par prendre en charge la tâche dont elle n'avait pas à l'origine la spécialité. On peut étendre le modèle pour gérer l'exécution concurrente de tâches multiples.

Modèles des seuils de réponses

Limitation

Les seuils de réponse constants et fixés initialement ne permettent pas la prise en compte de tâches nouvelles.

Extension

On étend alors le modèle pour autoriser une variation du seuil :

- Il augmente lorsque la tâche est réalisée ;
- Il diminue sinon.

Le problème des postiers

Un système auto-adaptatif

Le problème

Récupération adaptative de courriers par une compagnie de postiers, les courriers devant attendre le moins longtemps possible.

- Probabilité qu'un individu i situé dans la zone $z(i)$ réponde à la demande S_j en zone j :

$$P_{ij} = \frac{S_j^2}{S_j^2 + \alpha \theta_{i,j}^2 + \beta d_{z(i),j}^2} \quad (4)$$

- $\theta_{i,j} \in [\theta_{min}, \theta_{max}]$ seuil de réponse de l'agent i à la demande provenant de la zone j ;
- $d_{z(i),j}$ distance entre $z(i)$ et j ;
- α, β équilibrent l'influence de l'attraction de la tâche et la distance.

Le problème des postiers

Variation de seuil

Mise à jour des seuils

- Chaque fois qu'un postier se déplace vers la zone j pour récupérer du courrier, les seuils sont mis à jour :
 - $\theta_{i,j} \leftarrow \theta_{i,j} - \xi_0$;
 - $\theta_{i,n(j)} \leftarrow \theta_{i,n(j)} - \xi_1, \forall n(j)$ avec $\{n(j)\}$ zones entourant j ;
 - $\theta_{i,k} \leftarrow \theta_{i,k} + \varphi$ pour $k \neq j, k \notin \{n(j)\}$.
- ξ_0, ξ_1 sont deux coefficients d'apprentissage, $\xi_0 > \xi_1$;
- φ est un facteur d'oubli.