

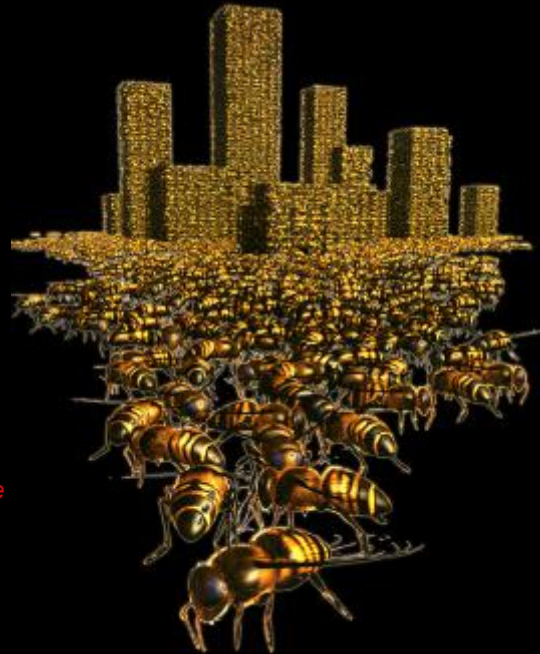
Complexité et auto-organisation chez les insectes sociaux

Guy Theraulaz

Centre de Recherches sur la Cognition Animale
CNRS, UMR 5169, Toulouse, France

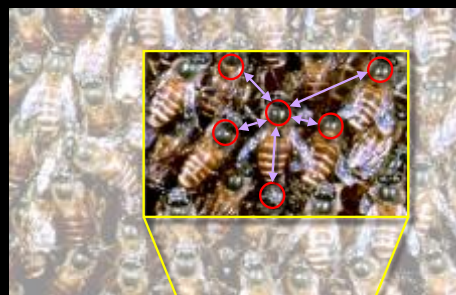


Marathon des Sciences
XXIII^{ème} Festival d'Astronomie, Fleurance
3 Août 2013



Complexité et auto-organisation chez les insectes sociaux

- Des systèmes permettant d'aborder le problème de la complexité en biologie
- Des systèmes dotés d'intelligence collective



Apis mellifera

Les Insectes sociaux



Fourmis (≈ 14000 espèces)
100 % des espèces
sont sociales



Abeilles (≈ 400 espèces)
2 % des espèces
sont sociales



Guêpes (≈ 800 espèces)
0.8 % des espèces
sont sociales



Termites (≈ 2000 espèces)
100 % des espèces
sont sociales

Hyménoptères

Isoptères

Les Insectes sociaux



- Tous les individus coopèrent à l'élevage des jeunes
- Il existe une division du travail : certains individus sont reproducteurs et d'autres stériles
- Il existe un chevauchement entre générations

“L’esprit de la ruche”



1901
*La vie des
abeilles*



Maurice Maeterlinck
(1862-1949)



2002
La proie

Michael Crichton
(1942-2008)

Constructions collectives

Des nids de taille gigantesque



Nasutitermes triodiae

Constructions collectives

Des architectures très élaborées

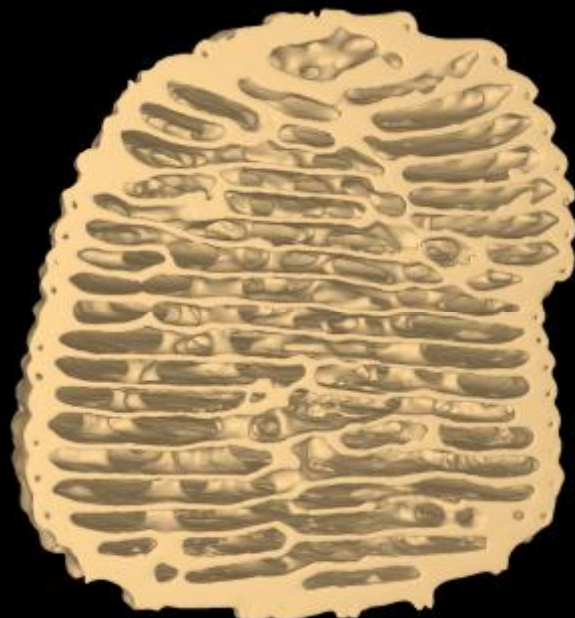
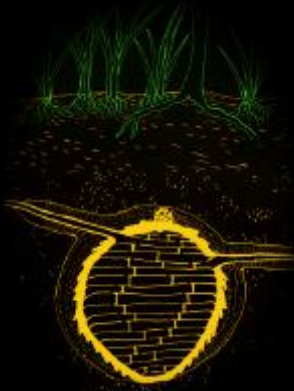


13 cm

Apicotermes lamani

Constructions collectives

Des architectures très élaborées

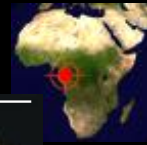


13 cm

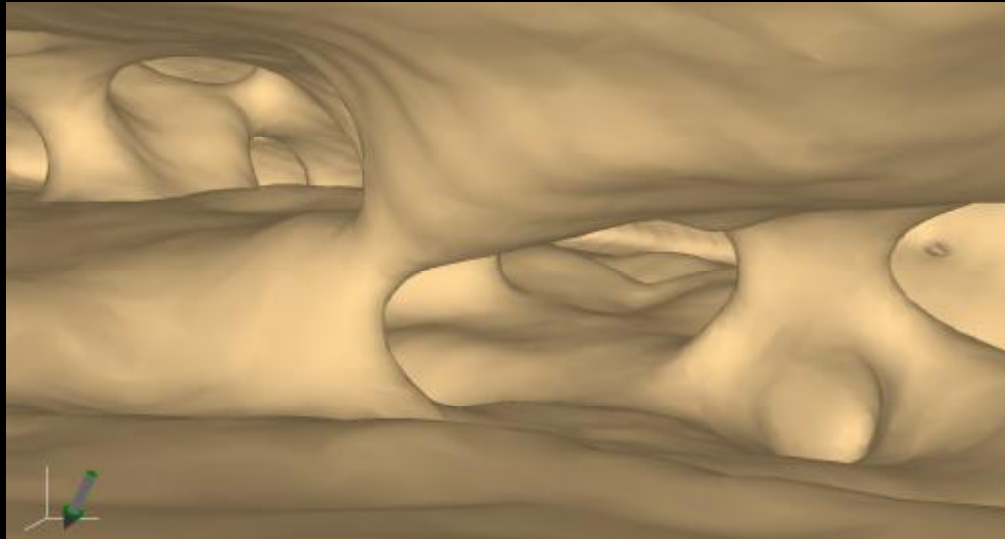
Apicotermes lamani

Constructions collectives

Des architectures très élaborées



1 mm
└───



Apicotermes lamani

Coopération dans l'exécution de tâches

Extraction et transport d'objets

Eciton burchelli



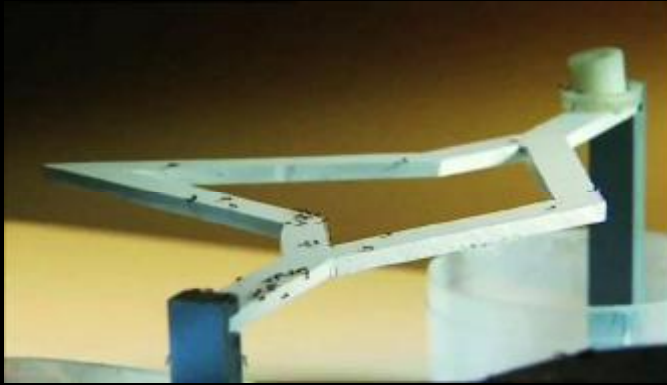
Messor sancta



Oecophylla longinoda

Décisions collectives

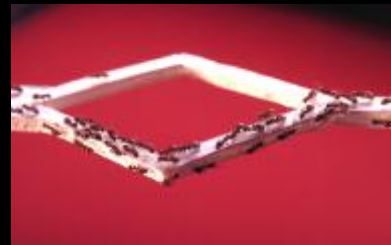
Choix d'un chemin ou d'une source de nourriture



Linepithema humile



Apis mellifera



Lasius niger

Division du travail et allocation des tâches

Castes physiques et comportementales

Colobopsis truncatus



Pheidole desertorum



© Alex Wild



© Alex Wild

Pheidole pubiventris



© Alex Wild

Pheidole xerophila

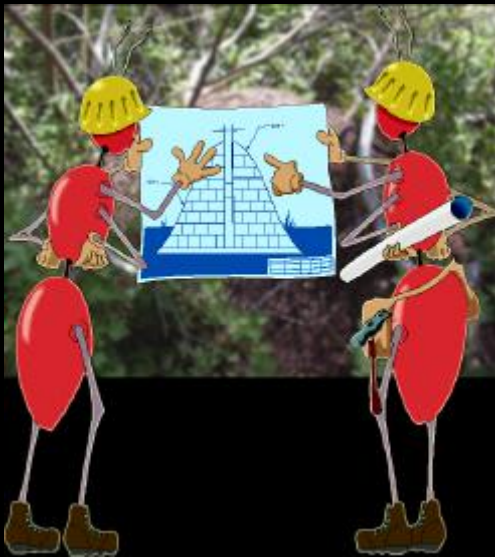
Des comportements individuels aléatoires et incohérents



Lasius niger

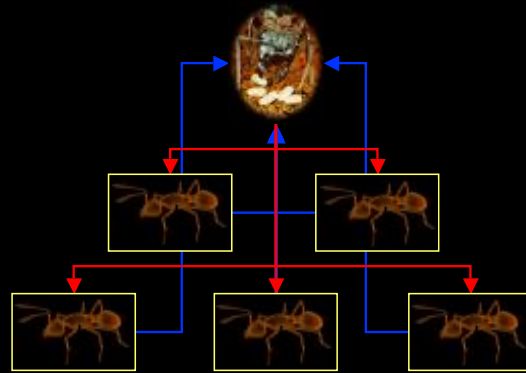
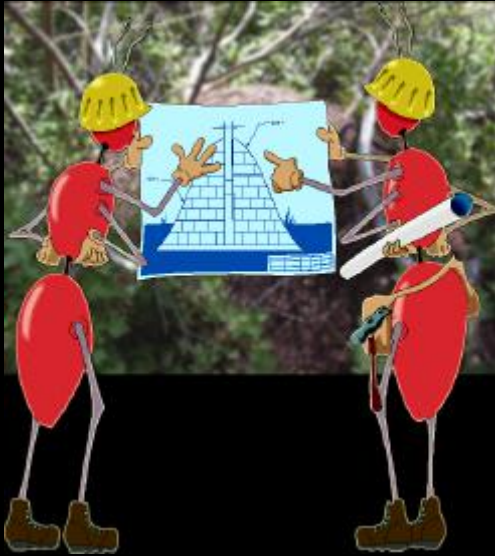
Durée réelle : 48 heures

Une organisation hiérarchique et centralisée ?

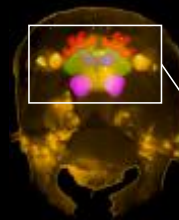


- Les performances collectives des insectes sociaux reposeraient sur la capacité des individus à centraliser l'information et à construire une représentation de leur univers

Une organisation hiérarchique et centralisée ?



Il n'y a pas de chef d'orchestre ...



~ 10 000 - 100 000 neurones
(100 milliards chez l'homme)

- Les insectes ne possèdent aucune représentation, ni aucun plan des nids qu'ils construisent
- Le système cognitif des insectes n'est pas suffisamment puissant pour permettre un contrôle centralisé

Une intelligence collective

- Une information partielle et locale



Une intelligence collective

- Une information partielle et locale
- Un ensemble de règles de comportement simples et peu nombreuses

Monomorium rothsteini

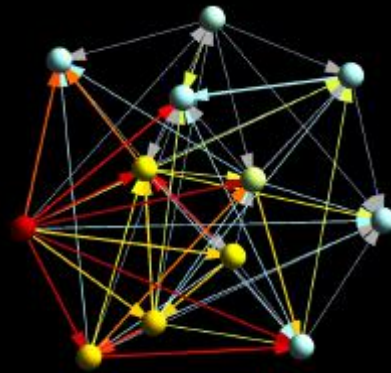


Procornitermes cumulans

Une intelligence collective

- Une information partielle et locale
- Un ensemble de règles de comportement simples et peu nombreuses
- Des réseaux complexes d'interactions permettent aux insectes d'échanger de l'information et de coordonner leurs activités

Odontomachus hastatus



La stigmergie

Pierre-Paul Grassé (1895-1985)

1959

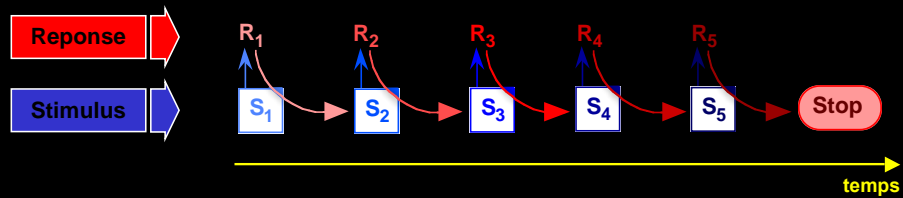


« L'insecte ne dirige pas son travail, mais il est guidé par lui »



La stigmergie

- La stigmergie : un mécanisme permettant aux insectes de coordonner et réguler leurs activités au moyen d'interactions indirectes



La construction du nid chez les guêpes sociales

Un exemple de processus stigmergique

- Les nids de guêpes sont construits à partir de fibres de bois
- On étudie le choix de sites de construction en utilisant du buvard coloré comme matériel de construction



La construction du nid chez les guêpes *Polistinae*

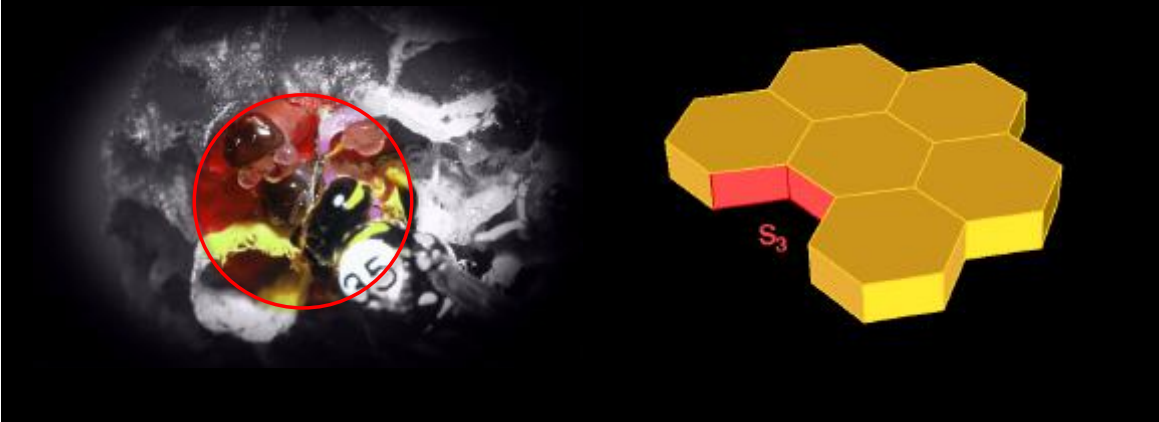
La construction du nid chez les guêpes sociales

Séquence de construction du nid chez *Polistes dominulus*



La construction du nid chez les guêpes sociales

Les sites potentiels de construction d'une nouvelle cellule



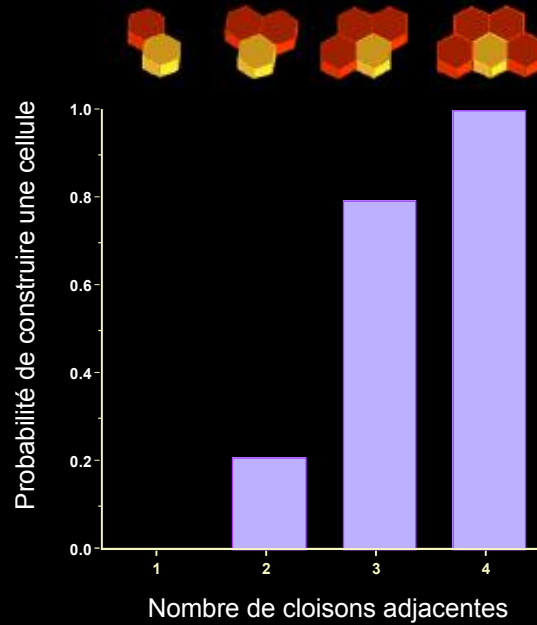
- Pour choisir l'emplacement d'une nouvelle cellule, les guêpes utilisent l'agencement local des cellules déjà construites

La construction du nid chez les guêpes sociales

Probabilité de construire une nouvelle cellule



- Plus le nombre de cloisons adjacentes est important, plus la probabilité de construire une nouvelle cellule au niveau du site est importante

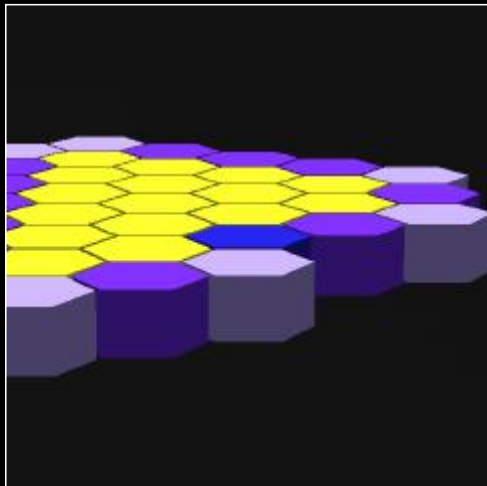


Modélisation de la construction d'un nid

Comportement des « guêpes virtuelles »



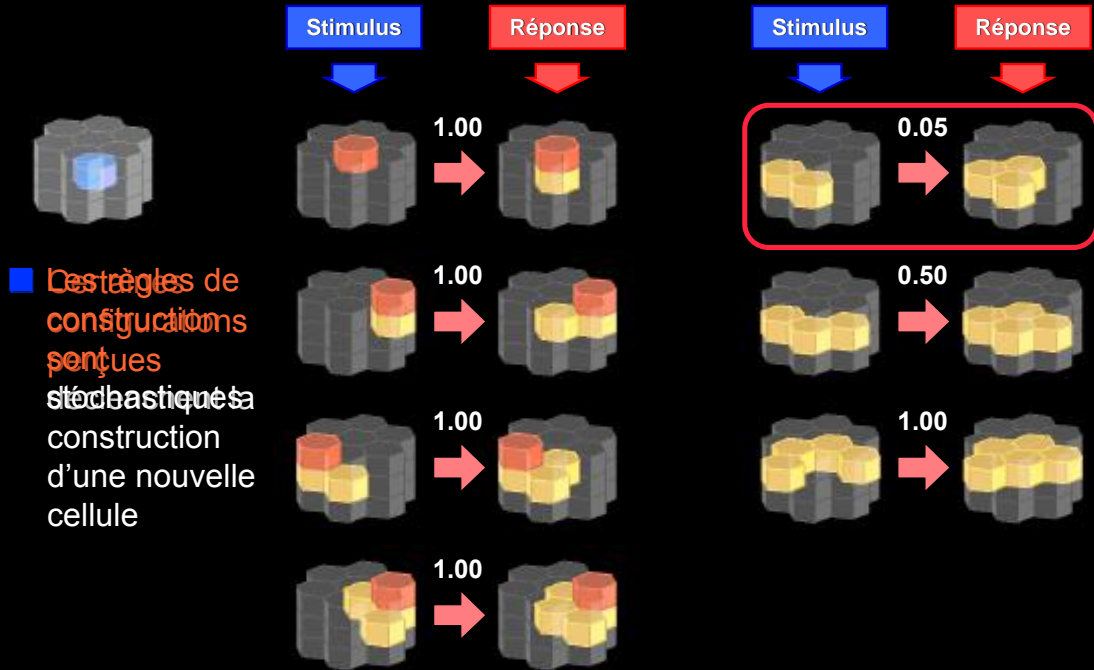
Voisinage perçu par la guêpe virtuelle



- Dans le modèle les guêpes sont représentées par des agents
- Le comportement de ces agents est calqué sur celui des guêpes
- Les « guêpes virtuelles » ont une perception locale de l'environnement
- Les « guêpes virtuelles » n'ont aucune représentation globale du nid qu'elles construisent

Modélisation de la construction d'un nid

Règles locales de construction des « guêpes virtuelles »

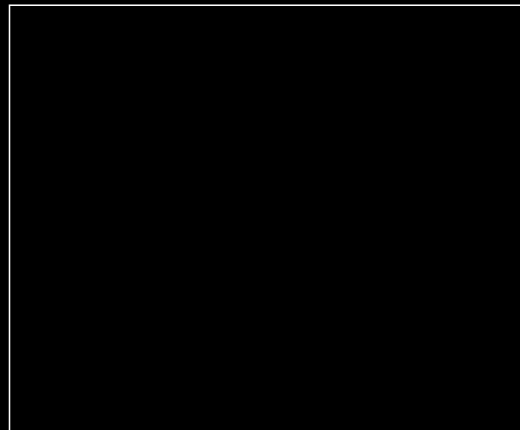


Modélisation de la construction d'un nid

Exemples d'architectures obtenues par simulation

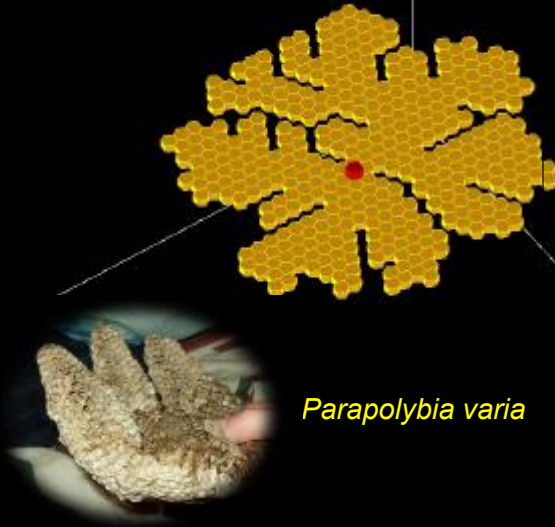
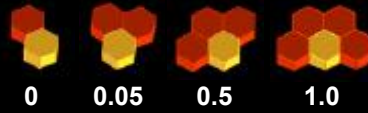
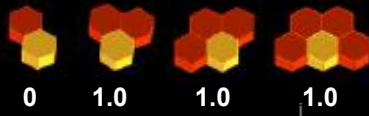


Polistes dominulus



Modélisation de la construction d'un nid

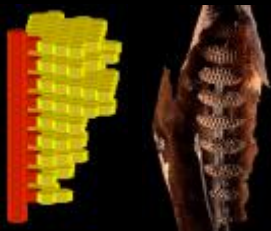
Exemples d'architectures obtenues par simulation



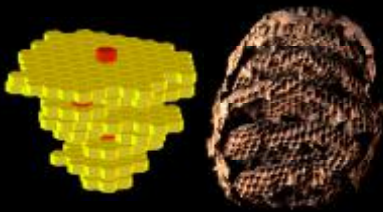
■ Economie de codage grâce au changement des probabilités d'exécution des règles de construction

Modélisation de la construction d'un nid

Exemples d'architectures obtenues par simulation



Parachartergus fraternus



Vespa crabro

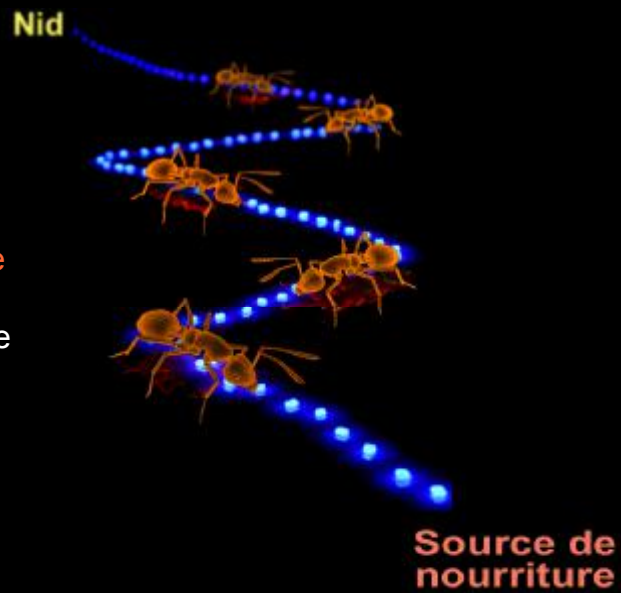


Chartergus chartarius

De la stigmergie à l'auto-organisation

Le recrutement par piste chez les fourmis

- Pour coordonner la récolte de nourriture les fourmis utilisent un signal chimique



De la stigmergie à l'auto-organisation

Le recrutement de masse chez les fourmis



De la stigmergie à l'auto-organisation

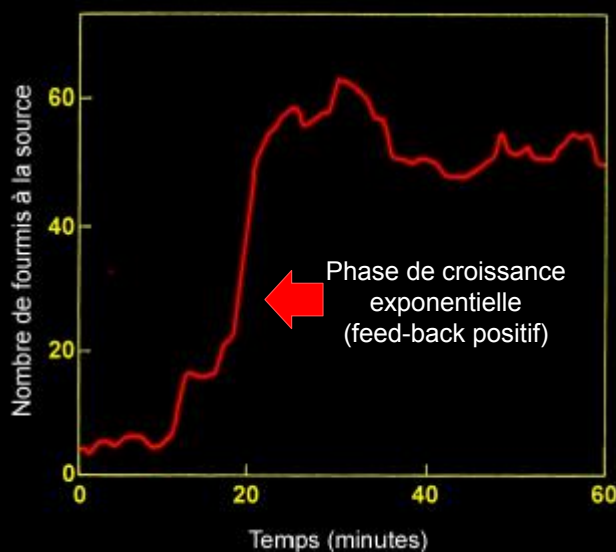
La formation des pistes de recrutement



- La piste de phéromone stimule les autres ouvrières à sortir du nid et les guide jusqu'à la source
- Les fourmis recrutées rentrent au nid en renforçant la piste
- La piste résulte d'un feed-back positif et permet d'amplifier l'information

De la stigmergie à l'auto-organisation

Le rôle amplificateur des pistes de phéromone



- Un feed-back négatif résultant de l'évaporation de la phéromone entraîne la disparition de la piste lorsque celle-ci n'est pas renforcée

Les processus d'auto-organisation

Constituants de base

- Des feed-back positifs grâce auxquels une structure va pouvoir émerger
- Des feed-back négatifs permettant de stabiliser la structure
- Les processus d'auto-organisation permettent aux insectes sociaux de développer une forme d'intelligence collective

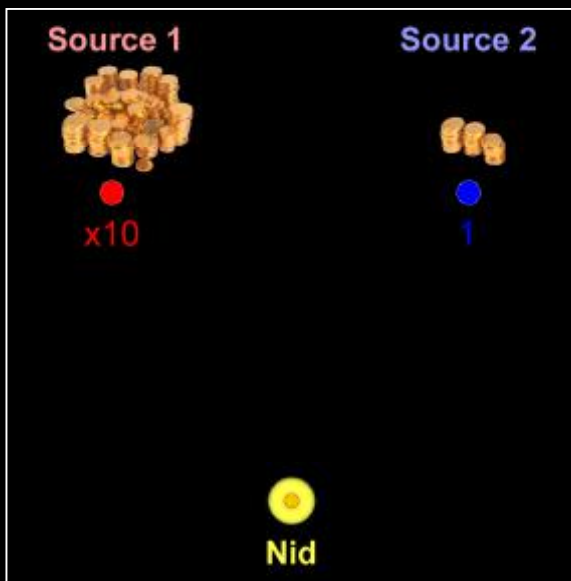
La formation d'un réseau de pistes d'exploration chez les fourmis d'Argentine



Linepithema humile

Décisions collectives

Le choix de la source de nourriture la plus riche

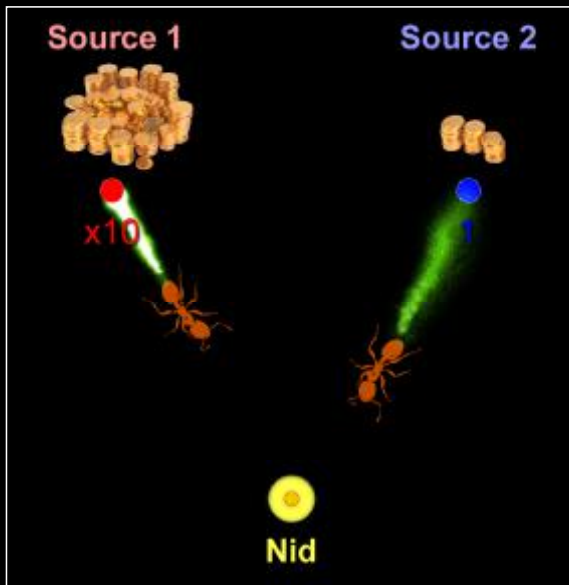


Lasius niger

- Pour sélectionner la source la plus riche les fourmis ne comparent pas les sources

Décisions collectives

Le choix de la source de nourriture la plus riche

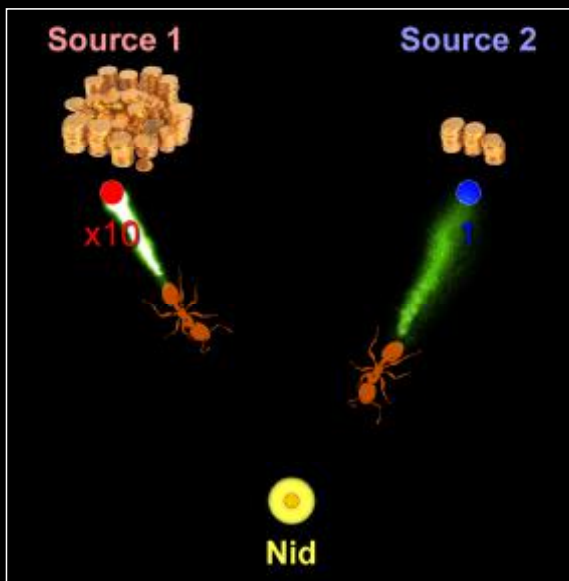


- Les fourmis modulent la fréquence avec laquelle elles déposent de la phéromone
- La fréquence de marquage varie selon la qualité de la source de nourriture



Décisions collectives

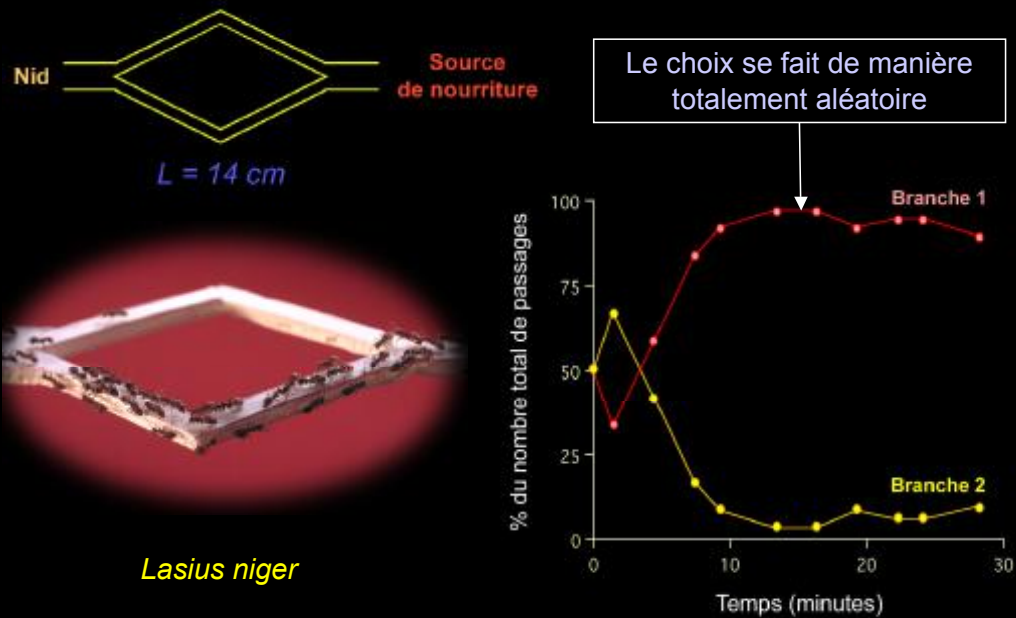
Le choix de la source de nourriture la plus riche



- Les fourmis modulent la fréquence avec laquelle elles déposent de la phéromone
- La fréquence de marquage varie selon la qualité de la source de nourriture
- Le recrutement par piste permet à une colonie de réaliser des choix collectifs efficaces

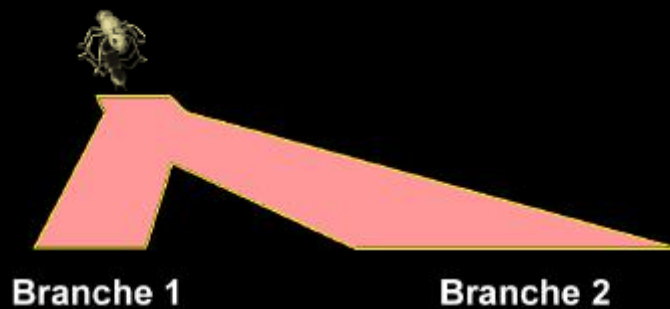
Décisions collectives

Le choix d'un chemin conduisant à une source de nourriture



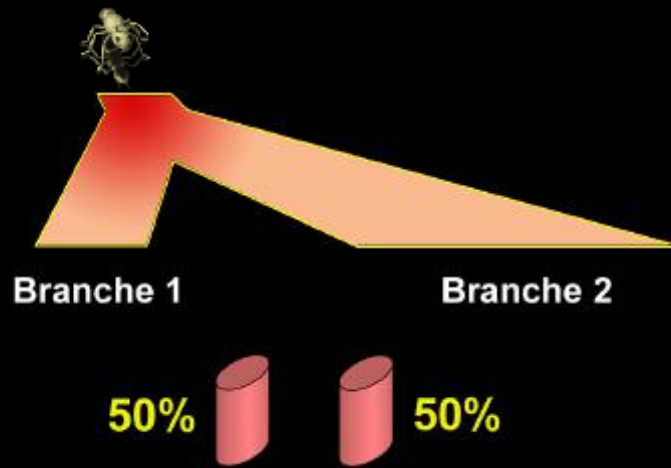
Décisions collectives

Le choix d'un chemin conduisant à une source de nourriture



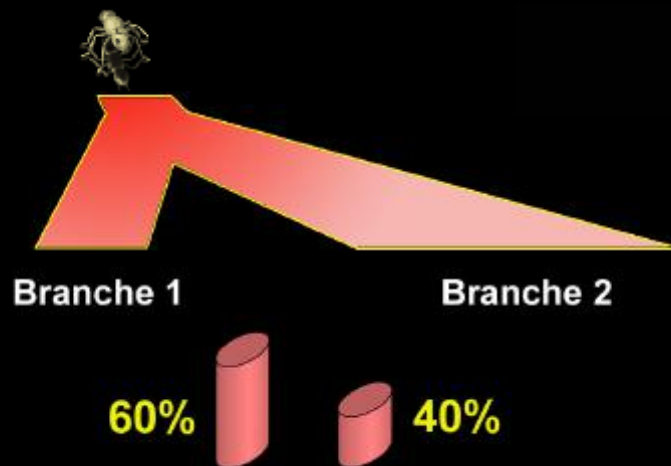
Décisions collectives

Le choix d'un chemin conduisant à une source de nourriture



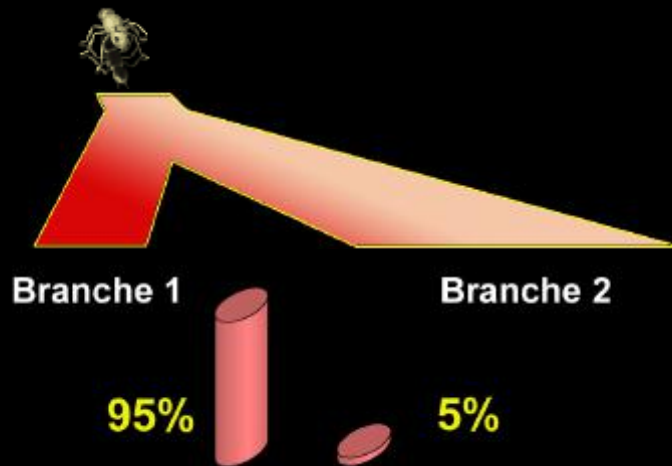
Décisions collectives

Le choix d'un chemin conduisant à une source de nourriture



Décisions collectives

Le choix d'un chemin conduisant à une source de nourriture



Décisions collectives

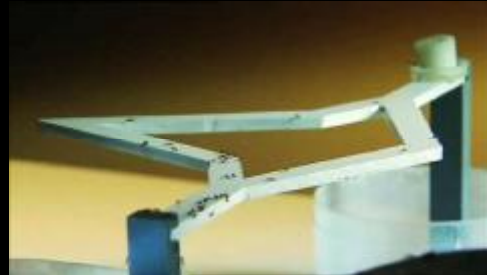
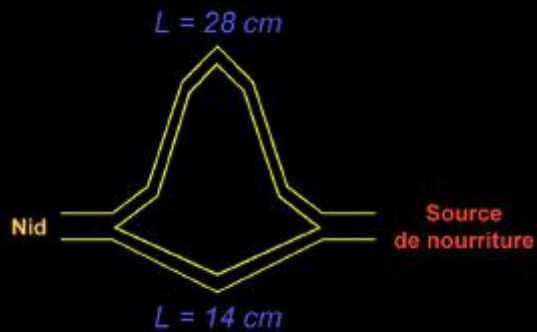
Le choix d'un chemin conduisant à une source de nourriture



- Les décisions collectives correspondent à une forme de sélection naturelle de l'information
- C'est l'information qui est amplifiée le plus rapidement qui l'emporte
- La vitesse de croissance de l'information est conditionnée par des contraintes physiques

Décisions collectives

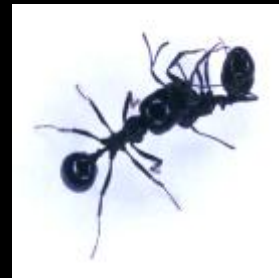
Le choix du chemin le plus court



- Les fourmis qui empruntent le chemin le plus court reviennent au nid beaucoup plus rapidement
- Les pistes de recrutement grandissent à des vitesses différentes sur les deux branches

Les cimetières auto-organisés des fourmis

L'agrégation des cadavres

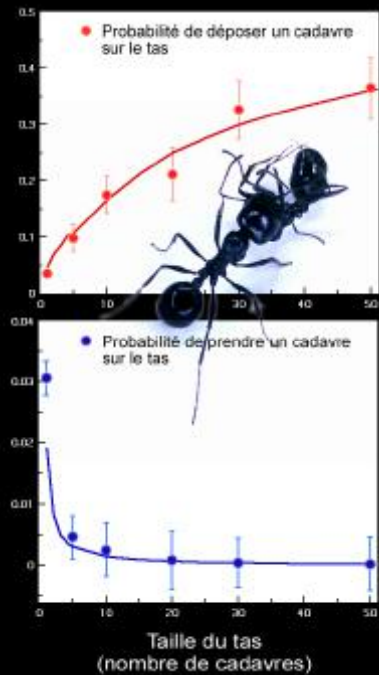


Durée réelle : 36 heures

Messor sancta

L'agrégation des cadavres chez les fourmis

Prises et dépôts de cadavres sur un agrégat



- La probabilité de déposer un cadavre sur un tas augmente avec la taille du tas
 - La probabilité de prendre un cadavre sur un tas diminue lorsque la taille du tas augmente
 - Le nombre total de cadavres disponibles sur un tas limite le nombre total de tas créés
- Feed-back positif**
- Feed-back négatif**

Des architectures sans architectes

La construction du nid chez les fourmis



1 cm

Durée réelle : 36 heures

Lasius niger

La construction du nid chez les fourmis

Comportements de prise et de dépôt

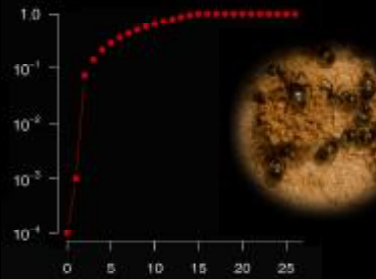


Pheromone



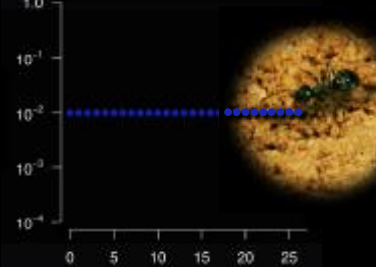
1 cm

Probabilité de dépôt



Nombre de boulettes déposées

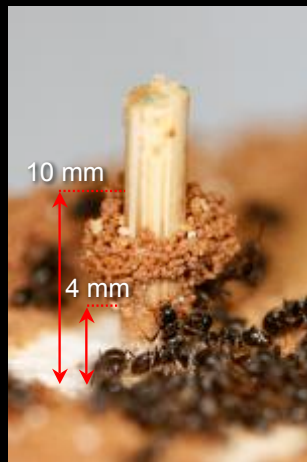
Probabilité de prise



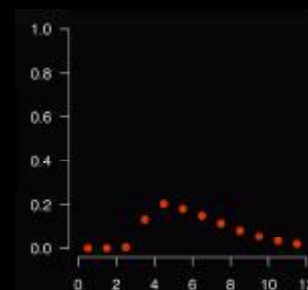
Nombre de boulettes déposées

La construction du nid chez les fourmis

La construction des chapiteaux



Probabilité de déposer une boulette sur les faces latérales d'un pilier

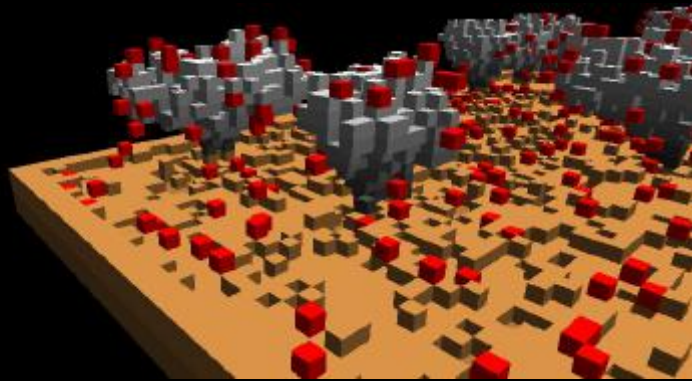


Hauteur du pilier (mm)

- Les fourmis construisent des extensions latérales lorsque les piliers atteignent une hauteur correspondant à la longueur de leur corps

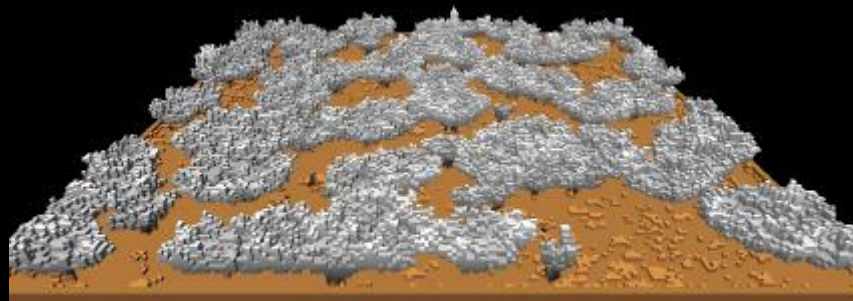
La construction du nid chez les fourmis

Modélisation de la construction



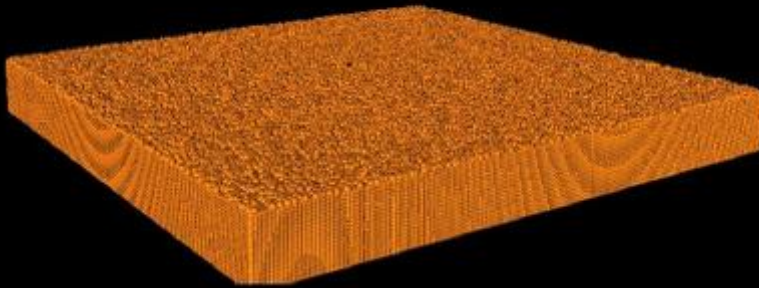
La construction du nid chez les fourmis

Modélisation de la construction



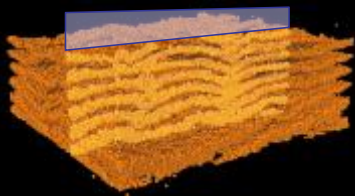
La construction du nid chez les fourmis

Croissance et remodelage du nid



La construction du nid chez les fourmis

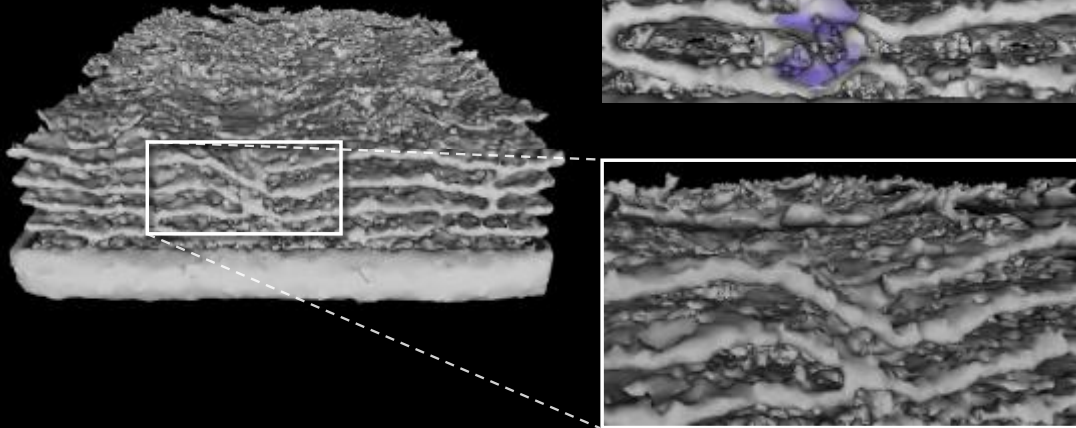
Croissance et remodelage du nid



Durée réelle : 48 heures

La construction du nid chez les fourmis

Des rampes spirales entre les étages

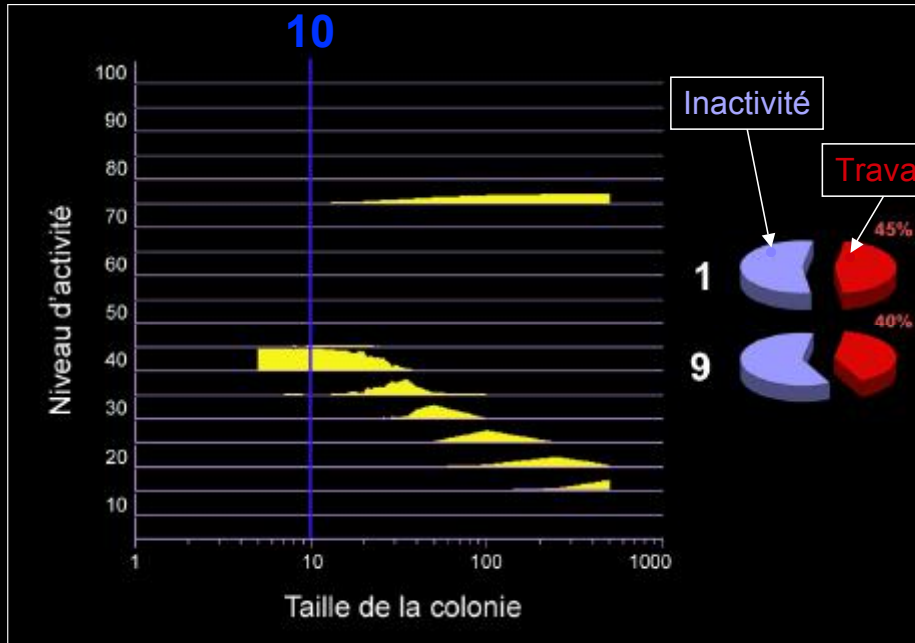


La division du travail et l'assignation des tâches

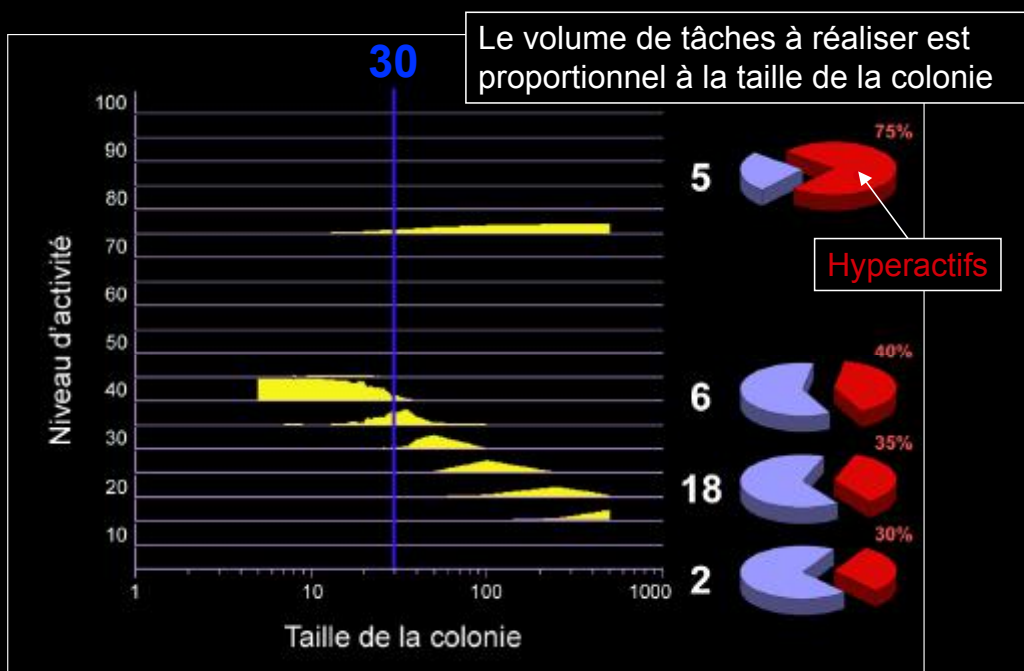


Polistes dominulus

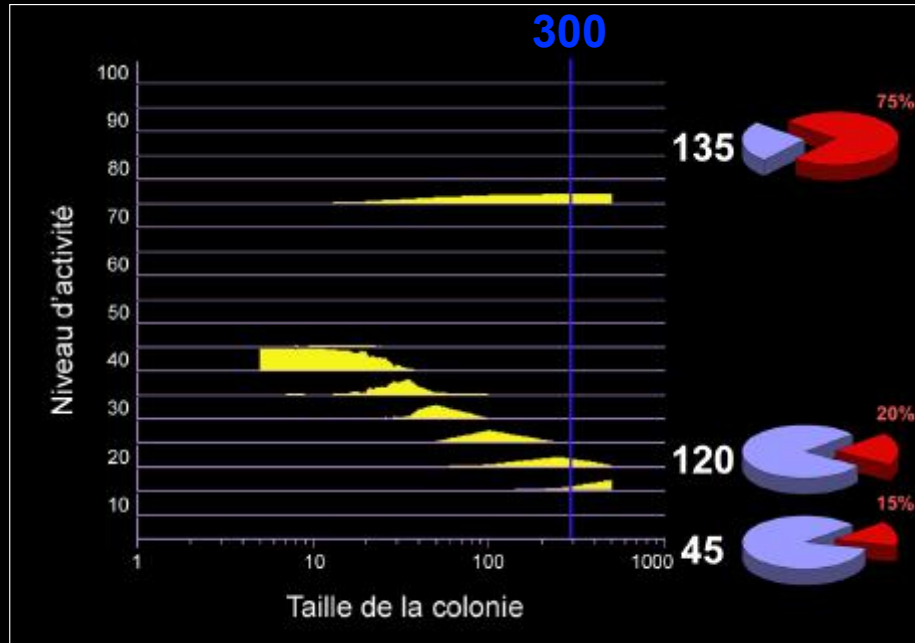
Répartition des niveaux d'activité des individus selon la taille de la colonie



Répartition des niveaux d'activité des individus selon la taille de la colonie

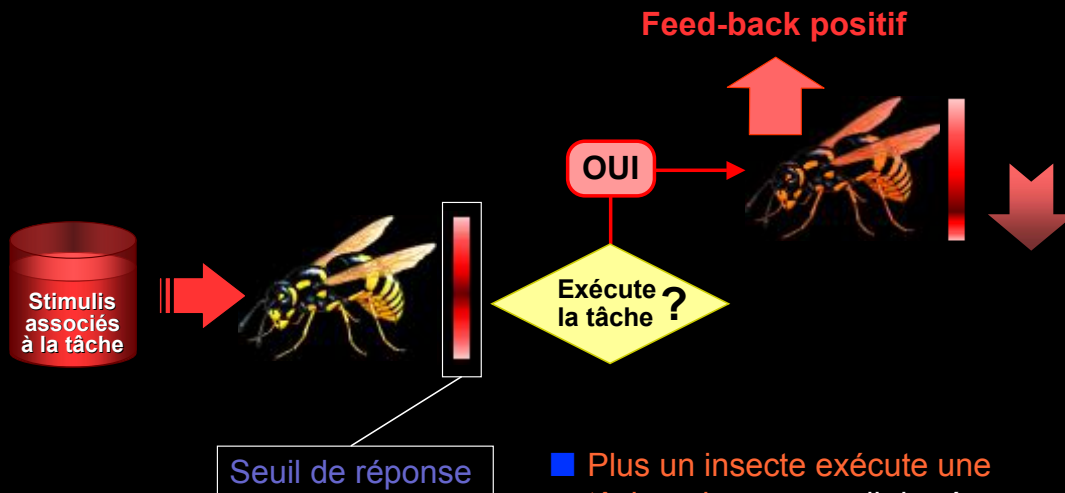


Répartition des niveaux d'activité des individus selon la taille de la colonie



La division du travail et l'assignation des tâches

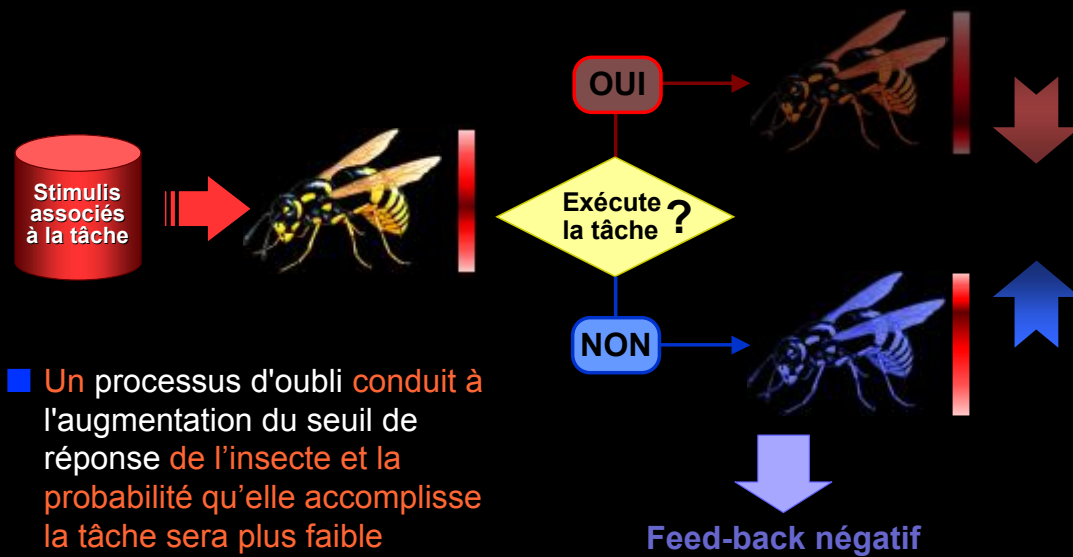
Apprentissage par renforcement



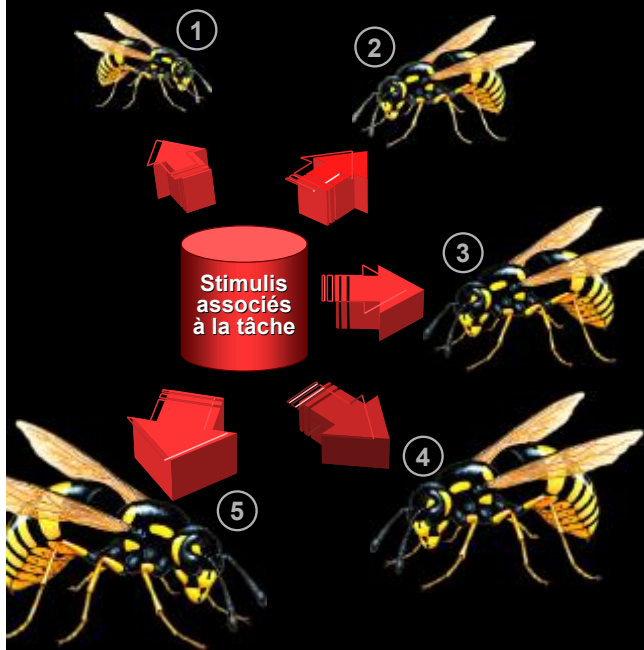
- Plus un insecte exécute une tâche, plus son seuil de réponse aux stimuli associés à cette tâche diminue et plus il se spécialise dans l'exécution de la tâche

La division du travail et l'assignation des tâches

Apprentissage par renforcement

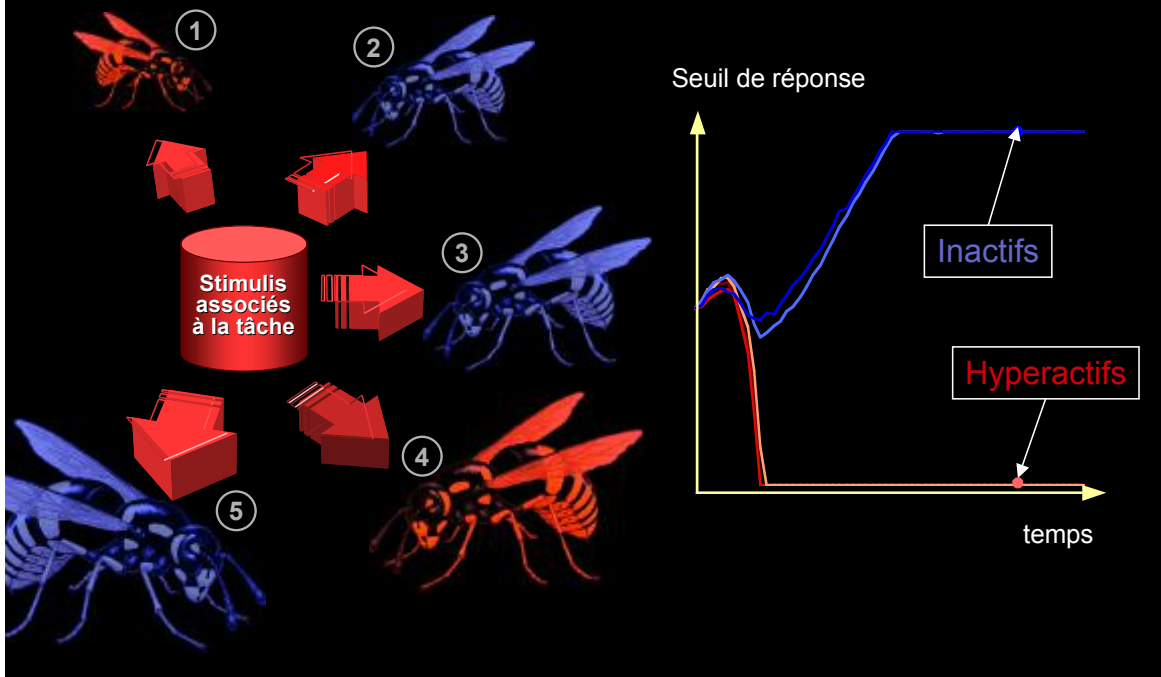


La division du travail et l'assignation des tâches

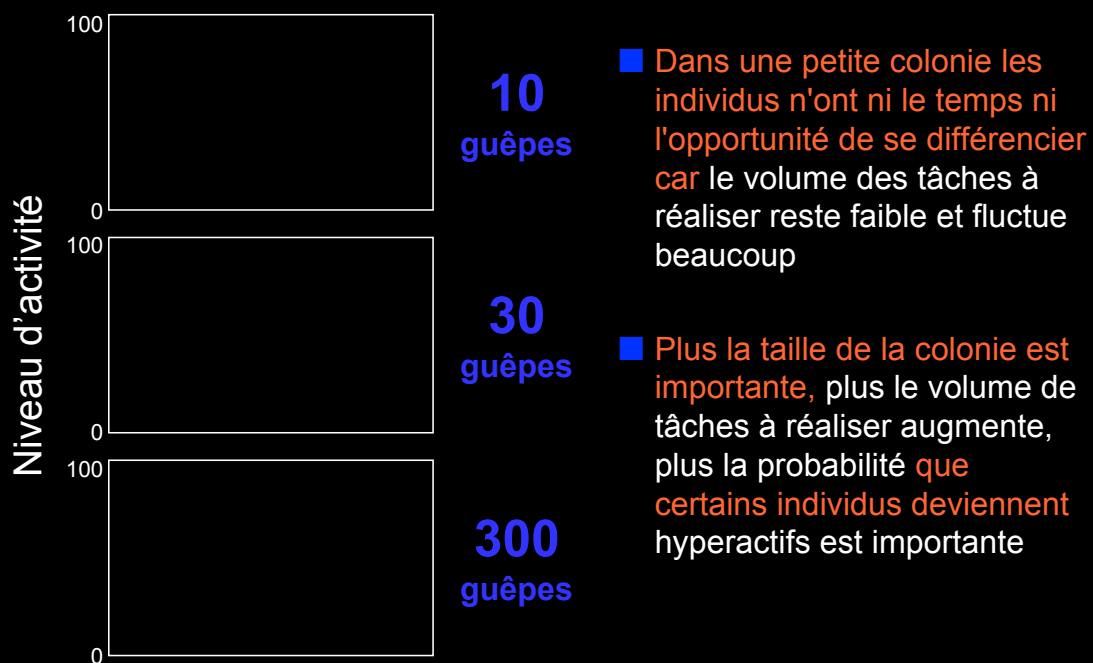


- Plusieurs insectes sont en compétition pour exécuter une tâche
- L'apprentissage individuel et la compétition pour exécuter des tâches conduisent à l'émergence d'un groupe d'individus spécialisés

La division du travail et l'assignation des tâches



La division du travail et l'assignation des tâches



L'auto-organisation de la division du travail

- Les processus d'auto-organisation permettent d'adapter et d'optimiser l'organisation de la division du travail aux variations de taille de la colonie
- Une grande société (demande forte) produit des spécialistes, une petite colonie (demande faible) conserve des généralistes



Complexité et auto-organisation chez les insectes sociaux

- La complexité des structures réalisées par les sociétés d'insectes résulte des interactions entre les individus
- Les informations échangées entre les individus permettent au groupe de réaliser des performances bien supérieures à celles que peut réaliser un seul individu
- Les signaux échangés entre les insectes sont inhibiteurs ou activateurs et permettent d'amplifier certaines informations



Complexité et auto-organisation chez les insectes sociaux

- Les processus d'auto-organisation permettent une économie de codage des mécanismes permettant l'émergence des propriétés observées à l'échelle de la colonie

*Simplicité
des règles*

Niveau individuel



Niveau collectif

*Complexité
des structures*



Complexité et auto-organisation chez les insectes sociaux

