

# Intelligence Bio-Inspirée

Systemes multi-agents, intelligence collective et auto-organisation

Maxime Guériau  
04/01/2017

Support inspiré de  
Salima Hassas  
Gauthier Picard

# Introduction

- Objectifs du cours
- Exemples
- Concepts

# Introduction

## Objectifs

- Comprendre les concepts tels que :  
émergence, auto-organisation, stigmergie
- Saisir l'inspiration biologique
- Apprendre à modéliser ce type de  
comportements grâce aux SMA
- Découvrir des applications concrètes de  
ces concepts

# Introduction

## Exemples

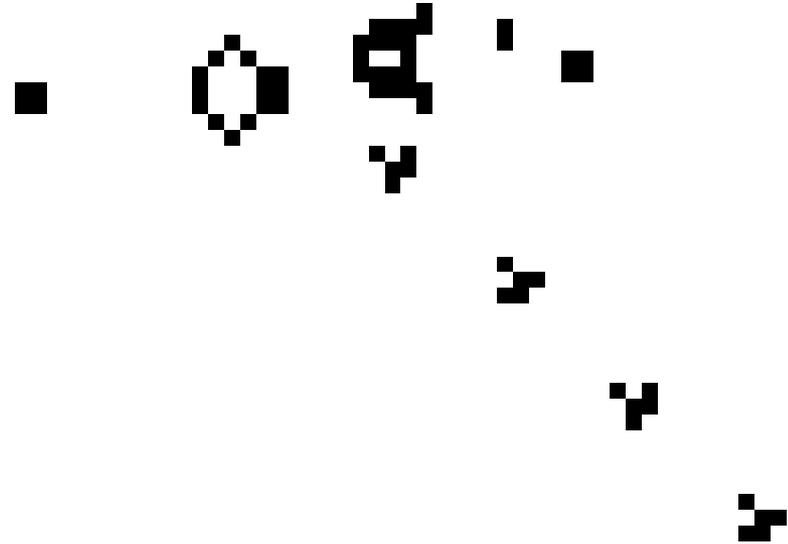
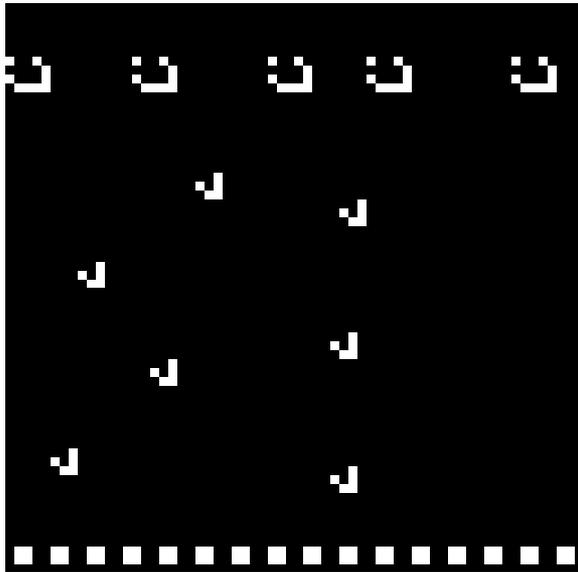
- Auto-organisation
  - Systèmes non-vivants



# Introduction

## Exemples

- Auto-organisation
  - Systèmes artificiels
    - « Jeu de la vie » [Conway1970]



# Introduction

## Exemples

- Auto-organisation
  - Systèmes sociaux



# Introduction

## Concepts

- Auto-organisation
  - Pour les systèmes naturels :
    - Processus dans lequel des motifs au niveau du système émergent uniquement des **nombreuses interactions** dans les composants de bas niveau du système [Camazine2002].
    - Les règles spécifiant les interactions entre les composants du système n'utilisent que des **informations locales** sans référence au motif global.
    - Le motif est une **propriété émergente** du système, et non pas une propriété imposée au système par une influence externe.

# Introduction

## Concepts

- Auto-organisation
  - Pour les systèmes artificiels :
    - Un ensemble de **mécanismes dynamiques** via lequel des **structures émergent** à un niveau **global** d'un système, à partir d'**interactions** entre ses composants de **plus bas niveau**. Les règles spécifiant ces interactions, sont exécutés sur la base **d'informations purement locales, sans aucune référence aux structures émergentes du niveau global**, qui sont considérées comme une propriété émergente du système **plutôt qu'une propriété imposée au système par une influence (ordonnée) externe** [Bonabeau1999].

# Introduction

## Concepts

- Auto-organisation
  - Pour les systèmes artificiels :
    - Un mécanisme ou processus permettant à un système de changer son organisation **sans contrôle externe explicite** durant son exécution [DiMarzoSerugendo2006].
    - L'auto-organisation est un processus selon lequel des structures collectives émergent à partir des multiples interactions entre les éléments d'un système **sans que ces structures collectives ne soient explicitement codées ni au niveau des éléments, ni au niveau collectif** [Palut2004].

# Introduction

## Concepts

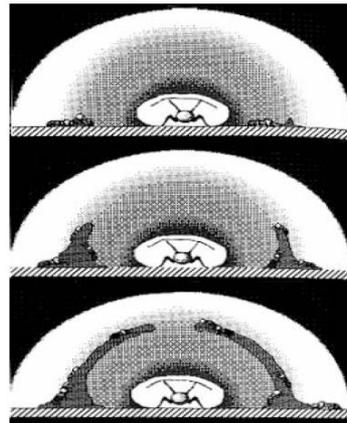
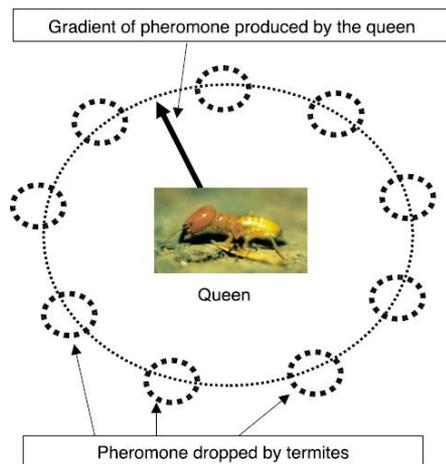
- Auto-organisation

- Forte :

- Systèmes où il n'existe aucune forme de contrôle central (ni interne, ni externe).

- Faible :

- Systèmes où d'un point de vue interne, la ré-organisation peut se faire sous l'influence d'un contrôle interne (centralisé).



Exemple : colonies de termites

# Introduction

## Concepts

- Auto-organisation
  - Caractéristiques [Palut2004] :
    - La **coordination** entre les éléments est uniquement déterminée par les **contraintes** (flux d'énergie, de matière, d'information) qui agissent sur les **interactions** des éléments du système.
    - Les **structures collectives** produites résultent exclusivement du **couplage** entre les **individus** ou entre les individus et leur **environnement** (rétroactions positives et négatives)

# Introduction

## Concepts

- Auto-organisation
  - Ingrédients de base :
    - Interactions multiples
    - Feedback positif (Amplification/renforcement)
    - Feedback négatif (Atténuation/contrainte)
    - Amplification des fluctuations
  - Signatures caractéristiques :
    - Création de structures spatio-temporelles dans un milieu initialement homogène
    - Multi-stabilité: possibilité de plusieurs états stables atteignables
    - Existence de bifurcations paramétrables déterminées

# Introduction

## Concepts

- Auto-organisation
  - Equilibre : état constant (ou faible variation)
    - état **stable** (attracteur) : état dans lequel converge le système quelque soit les conditions de départ
    - état **instable** (répulseur) : état dans lequel le système ne peut se maintenir (sauf force externe)
  - Transition de phase :
    - Passage d'un **état stable à un autre état stable** sous la variation d'un paramètre de contrôle ou sous l'influence des fluctuations inhérentes au système

# Introduction

## Concepts

- Emergence :
  - Apparition d'une **propriété** (ou une caractéristique, ou un état) qui n'est pas considérée à l'origine comme une caractéristique fonctionnelle du système [Holland 1999] (généralement, la propriété apparaît à un **plus haut niveau**).
  - Exemples :
    - Propriétés
    - Phénomènes
    - Comportements
    - Fonctions
    - Etats

# Introduction

## Concepts

- Emergence :
  - Caractéristiques d'un système exhibant une/des propriété(s) émergente(s) :
    - Au moins deux niveaux d'observation (**micro/macro**)
    - Dynamicité
      - Une forme d'**équilibre** auto-entretenu
      - Une capacité de s'**auto-organiser** permettant le phénomène émergent [Goldstein1999]
    - Capacité d'**adaptation**, auto-organisation

# Introduction

## Concepts

- Emergence :
  - Critères permettant de dire qu'il y a émergence :
    - Le phénomène est **observable** à un certain niveau
    - Le phénomène est **nouveau** [VandeVijver1997]
    - Le phénomène est **interdépendant** entre les différents niveaux d'observation système [Langton1990]

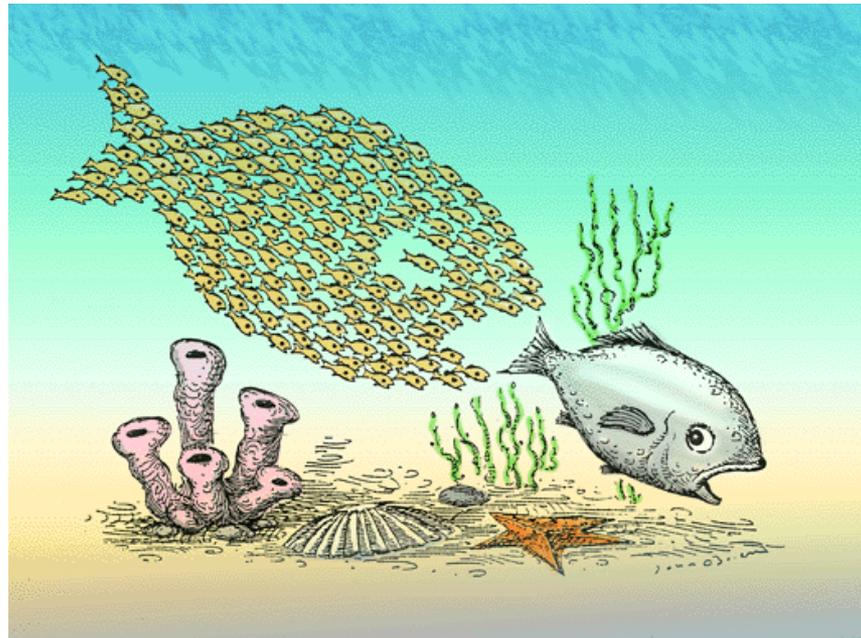


- Le phénomène est **non-linéaire**
- Le phénomène est observable **sans agir** sur le système

# Introduction

## Concepts

- Emergence vs. auto-organisation :
  - Emergence = **résultat** du collectif
  - Auto-organisation = **moyens** pour obtenir le phénomène émergent



# Plan

- Introduction
  - Objectifs du cours
  - Exemples
  - Concepts
- Vers l'IA collective
  - Objectifs
  - Intérêt des SMA
  - Problématiques
- Modélisation
  - Stigmergie
  - Flocking
  - Groupe de rats
  - Lucioles
- Simulation
- Conclusion

# IA collective

## Objectifs

- Problèmes visés :
  - Forte **complexité**
  - Difficiles à **observer/contrôler** dans l'ensemble
  - Spécifiés partiellement
  - **Systemes ouverts**
  - Systemes **adaptatifs**
- Intérêt de l'IA collective :
  - Conception simplifiée (**approche « bottom-up »**)
  - Inspiration **biologique**

# IA collective

## Objectifs

- Approche classique de résolution de problème :
  - Concepteur : définit le processus permettant d'obtenir la solution au problème
- Approche par IA collective :
  - Concepteur : définit les rôles, comportements et interactions des entités du système (et avec l'environnement)
  - L'**auto-organisation** du système **produit la solution**

# IA collective

## Intérêt des SMA

- Rappel Systèmes Multi-Agents :
  - Ensemble d'entités (**agents**) en **interaction** situées dans un **environnement** et devant réaliser **collectivement** une tâche
  - Deux niveaux de description
    - **Local** : comportement des agents
    - **Global**/collectif : tâche à réaliser/phénomène à produire
  - Contrôle décentralisé
    - Pas de « chef d'orchestre »
    - **Autonomie** du processus de décision

# IA collective

## Intérêt des SMA

- Où se situe l'intelligence dans les SMA [Parunak1999] ?
  - Système (d'agents intelligents)
    - L'intelligence est dans les individus
    - Modèles cognitifs
    - On se concentre sur les capacités de l'agent
  - (Système intelligent) d'agents
    - L'intelligence est une **propriété** (émergente !) **du système**
    - Modèles **réactifs** : comportements d'agents simples
    - On se concentre sur la **dynamique collective** et les **interactions**
    - Le rôle de l'**environnement** est plus important

# IA collective

## Intérêt des SMA

- Avantages de l'approche réactive :
  - Propriétés dynamiques (auto-\*) :
    - Résistance aux perturbation
    - Apparition de nouveaux motifs
    - Ajout/suppression d'agents
    - Modification de paramètres

= adaptabilité, robustesse
  - Efficaces pour traiter les problèmes complexes :
    - Simulation de phénomènes collectifs
    - Résolution de problèmes

# IA collective

## Problématiques

- Freins aux approches à base d'IA collective :
  - Comportement **collectif** difficile à **comprendre** ou **prédire** en étudiant les comportements individuels
  - De faibles **modifications individuelles** peuvent **altérer** profondément le **comportement collectif**
  - Comportement du **système difficile à contrôler, valider**
  - Réglage des **paramètres** pour obtenir le comportement collectif satisfaisant :
    - Au niveau individuel
    - Au niveau de l'environnement (sensibilité aux conditions initiales)

# Modélisation

## Stigmergie

- Inspiration : les insectes sociaux
  - « L'ouvrier ne dirige pas son travail, il est guidé par lui » [Grassé1959]
  - Les interactions directes ne sont pas nécessaires pour **coordonner** un groupe
  - Les **interactions indirectes** suffisent
  - La **communication** peut se faire indirectement **par** l'intermédiaire de **l'environnement**
- Exemples de tâches collectives par stigmergie (termites, fourmis, abeilles, guêpes, araignées, ...) :
  - Comportement de construction
  - Recrutement
  - Séparation du travail
  - Transport de nourriture ...

# Modélisation

## Stigmergie

- Définitions :
  - La stigmergie est un concept décrivant l'**influence des effets persistants dans l'environnement des comportements passés** sur les comportements futurs [Holland1999]
  - Stigmergie **active** (action sur l'agent) :
    - Effet qualitatif **sur le choix** de l'action
    - Effet quantitatif **sur les paramètres** de l'action (intensité)
  - Stigmergie **passive** (action sur l'environnement) :
    - Effet qualitatif et/ou quantitatif **sur le résultat** de l'action
    - Notion d'effet de bord

# Modélisation

## Stigmergie

- Relation avec l'auto-organisation :
  - La stigmergie est un mécanisme qui permet à l'environnement de s'**auto-structurer** à travers l'activité des agents au sein de ce même environnement : son état et la répartition courante des agents dans l'environnement, détermine leurs évolutions respectives futures.
  - Toute structure émergente de ces interactions répétées, est développé par un processus d'**auto-organisation** [Bonabeau1999].

# Modélisation Stigmergie

- Conditions nécessaires :
  - Mise en place de la stigmergie :
    - Environnement
      - Rôle central
      - Dynamicité (phénomènes persistants)
    - Interactions entre agents
      - Capacités de se mouvoir, percevoir et agir dans l'environnement
      - Actions impliquant une modification de l'environnement
  - Modélisation de la stigmergie :
    - Définition de l'environnement
      - Perception des agents
      - Modification possibles par les agents
      - Persistance des modifications
    - Définition des agents
      - Mouvement des agents
      - Actions possibles dans l'environnement
      - Etats et seuils déclenchant/modifiant les actions

# Modélisation

## Stigmergie

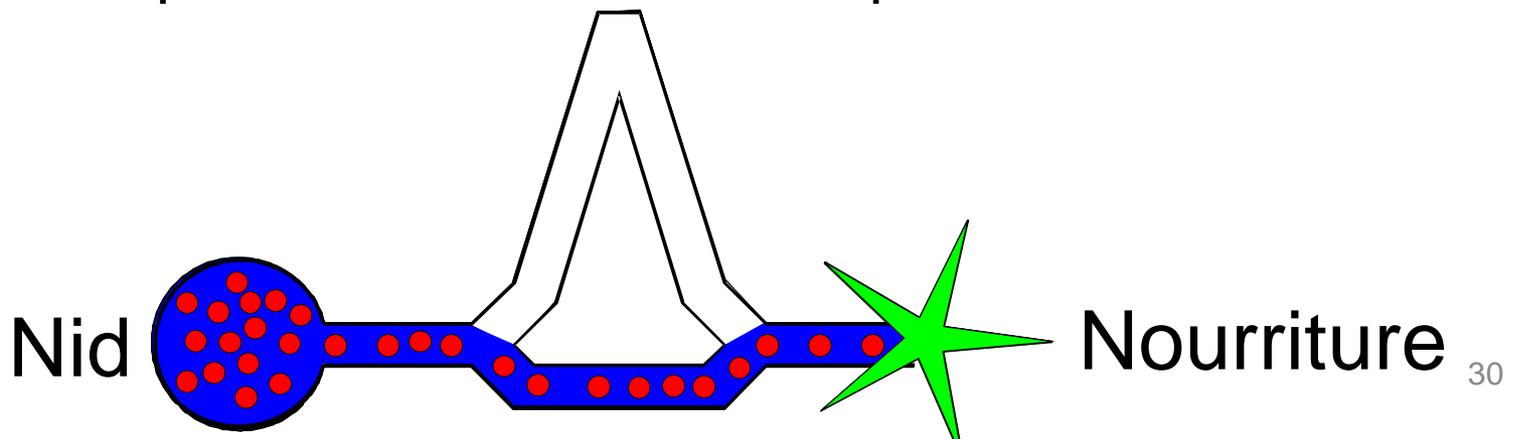
- Exemple : Colonies de fourmis [Dorigo1996]



# Modélisation

## Stigmergie

- Exemple : Colonies de fourmis [Dorigo1996]
  - Technique probabiliste (méta-heuristique) :
    - Résolution de problèmes combinatoires
    - Résolution de problèmes de plus court chemins
  - Mécanisme de stigmergie : **phéromones**
    - Dépôt lorsque de la nourriture est trouvée
    - Attire les fourmis (suivant une probabilité)
    - Evaporation au cours du temps



# Modélisation

## Stigmergie

- Algorithme : Ant Colony Optimization (ACO)

### Arc Selection

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

### Pheromone Deposited

$$\Delta_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)} & \text{if } (i,j) \in T^k(t) \\ 0 & \text{if } (i,j) \notin T^k(t) \end{cases}$$

### Pheromone Update

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

where:

- ▶  $J_i^k$ , possible moves from  $i$
- ▶  $\eta_{ij}$ , visibility (=  $1/d_{ij}$ )
- ▶  $\tau_{ij}(t)$ , amount of pheromone on arc  $i,j$
- ▶  $\alpha$  and  $\beta$ , parameters
- ▶  $T^k(t)$ , visited arcs at time  $t$
- ▶  $L^k(t)$ , length of  $T^k(t)$
- ▶  $Q$ , parameter
- ▶  $m$ , number of ants
- ▶  $\rho$ , parameter

# Modélisation

## Stigmergie

- Applications de ACO :
  - Problème du voyageur de commerce (TSP) [Dorigo1999]
  - Fourragement [Foukia2003]
  - Fouille de données (data mining)
  - Répartition de processus sur un réseau d'ordinateurs
  - ...

# Modélisation

## Stigmergie

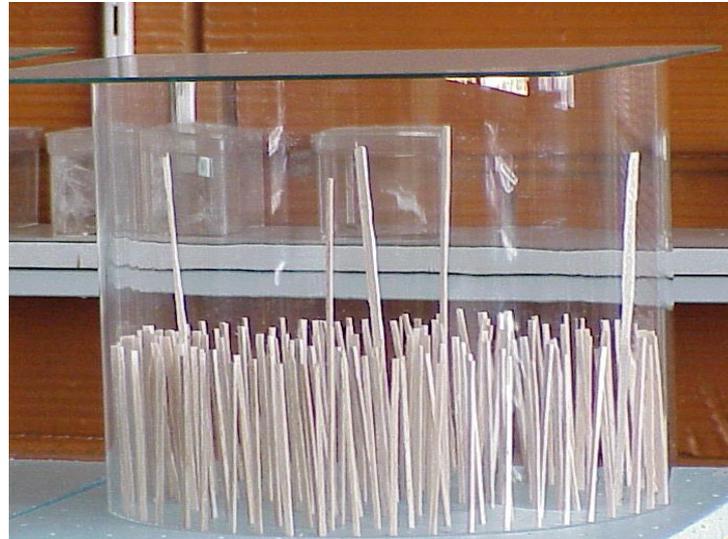
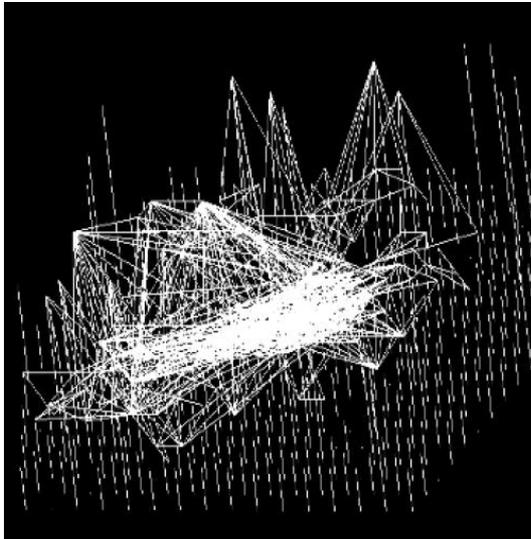
- Exemple 2 : Araignées sociales  
[Bourgeot2003] (*Anelosimus Eximius*)
  - Les araignées sont attirées par la soie produite par leur congénères
  - La construction de la toile est collective



# Modélisation

## Stigmergie

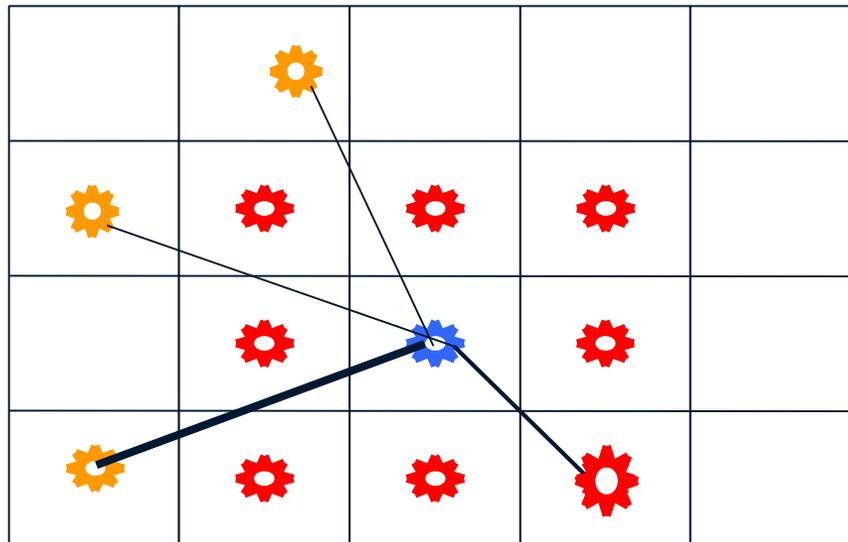
- Araignées sociales : modélisation
  - Environnement :
    - Grille carrée composée de piquets de différentes hauteurs
    - Initialement sans fil
    - Ajout dynamique des fils tissés



# Modélisation

## Stigmergie

- Araignées sociales : modélisation
  - Comportements :
    - Déplacement de piquet en piquet
    - Pose de soie au sommet d'un piquet



# Modélisation

## Stigmergie

- Araignées sociales : modélisation
  - Etapes du modèle :
    - Modèle 0 : Aléatoire et insensible au contexte
    - Modèle 1 : Choix préférentiel (probabiliste) d'un type de mouvement
      - vers un piquet adjacent
      - ou suivre un fil
    - Modèle 2 : Choix contextuel (probabiliste) d'un mouvement donné (prise en compte du nombre de fils)
  - Paramètre du modèle :  
« attraction pour la soie »

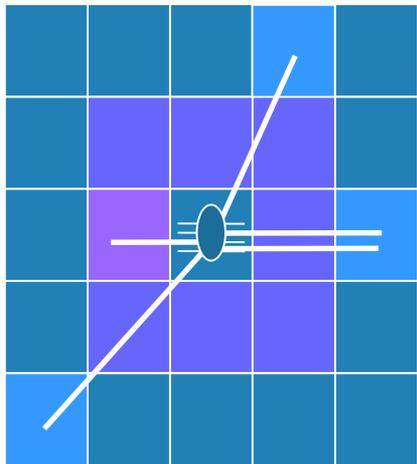
# Modélisation

## Stigmergie

- Araignées sociales : modélisation

- Principe :

- Calculer une distribution de probabilités sur les piquets accessibles
- Implantation de la stigmergie: Pdragline (facteur d'attraction pour la soie)



1) Se déplacer dans le voisinage (rayon de perception) :

$$P(s) = (1 - P_{dragline}) / \#StakesInNeighborhood$$

2) Suivre un fil

$$P(s) = \frac{P_{dragline} * \#Dragline}{\#DraglineOnCurrentPosition}$$

3) Combinaison : Suivre un fil + voisinage

$$P(s) = \text{■} + \text{■}$$

# Modélisation

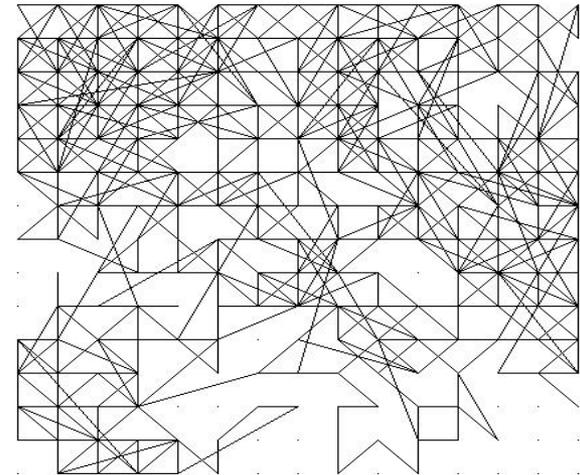
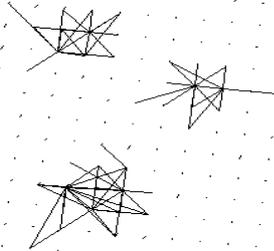
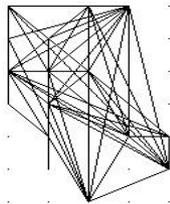
## Stigmergie

- Araignées sociales : modélisation
  - Dynamique du système :
    - Coordination par stigmergie
      - Modélisée implicitement dans le comportement
        - » Déplacement influencé par la soie
        - » Plus il y a de soie vers une position, plus celle-ci a de chance d'être choisie.
    - Pas de centralisation, pas de référence sociale
      - Dynamique valide pour les cas solitaire et social

# Modélisation

## Stigmergie

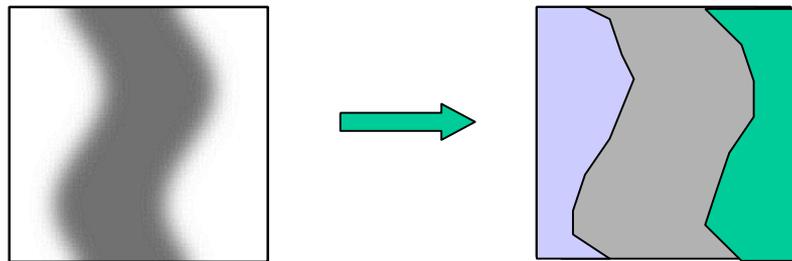
- Araignées sociales : modélisation
  - Résultats :



# Modélisation

## Stigmergie

- Araignées sociales : application
  - Problème :
    - Détection de région dans des images à niveau de gris
      - Segmentation d'une image : partitionner une image en sous-ensemble d'objets séparés
      - Déterminer des ensembles de pixels connectés  $R_i$  (régions)



- Similarités avec la construction collective de toile :
  - Exploration d'un espace
  - Restreint à un ensemble d'éléments (une toile ou une région)
- Possibilité d'évaluation visuelle

# Modélisation

## Stigmergie

- Araignées sociales : application
  - Transposition :
    - Vue intuitive de l'algorithme :
      - Les araignées ont à détecter une région donnée (pixels avec le "même" niveau de gris +/- tolérance)
      - Elles explorent l'image et fixent de la soie sur les pixels pertinents
    - L'environnement correspond au problème et à sa solution :
      - Image (pixels, niveau de gris)
      - Les régions sont déterminées à partir des toiles
    - Les agents sont adaptés au problème :
      - La pose de fils dépendante du contexte
      - Ajout d'un item comportemental : « homing »
    - La dynamique reste inchangée : Stigmergie

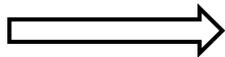
# Modélisation

## Stigmergie

- Araignées sociales : application
  - Transposition :

### Végétation

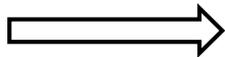
- Grille carrée
  - Piquets de différentes hauteurs



### Image en niveaux de gris

- Tableau de pixels
  - Pixel avec son niveau de gris

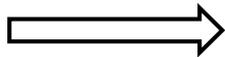
- Fils de soie



- Fils de soie entre pixels

### A la fin

- Toile



- Région: ensemble de pixels
  - Toile interprétée comme une région

# Modélisation

## Stigmergie

- Araignées sociales : application
  - Transposition :

- Items comportementaux

1. Mouvement  
selon l'attraction pour la soie et le nombre de fils
2. Fixer la soie  
probabilité constante
3. Homing  
(pas implanté)  
retour périodique au nid

inchangé

contextuel

nouveau

1. **Mouvement**  
selon l'attraction pour la soie et le nombre de fils
2. **Fixer la soie**  
selon le niveau de gris
3. **Retour sur la toile**  
probabilité constante  
heuristique pour restreindre l'exploration aux pixels connectés

- Paramètres

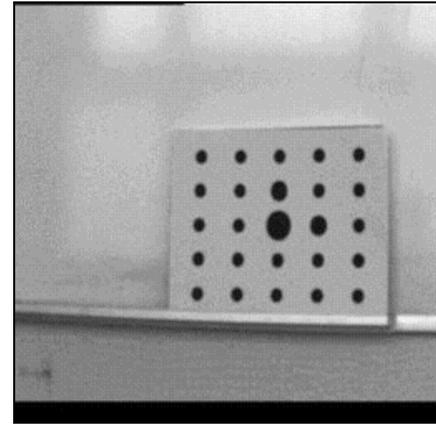
1. Pdragline (Attraction pour la soie)

- Paramètres

1. Pdragline (Attraction pour la soie)
2. Level of reference  
Selectivity
3. BackProbability

# Modélisation

## Stigmergie

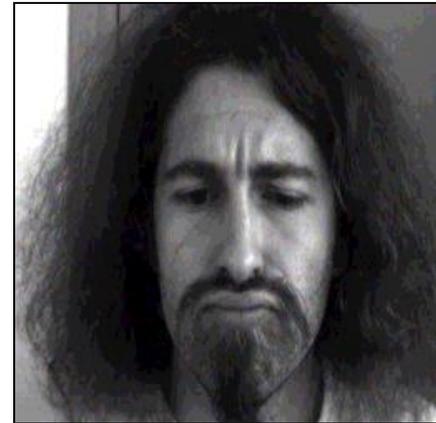


- Araignées sociales : application

- Résultats :

- Buts: évaluer l'approche sur des images réelles sans prétraitement

- Capacité ou non à détecter UNE région
- Influence des paramètres sur le processus
  - » Mouvement: Pdragline et BackProbability
  - » Fixer la soie: Selectivity



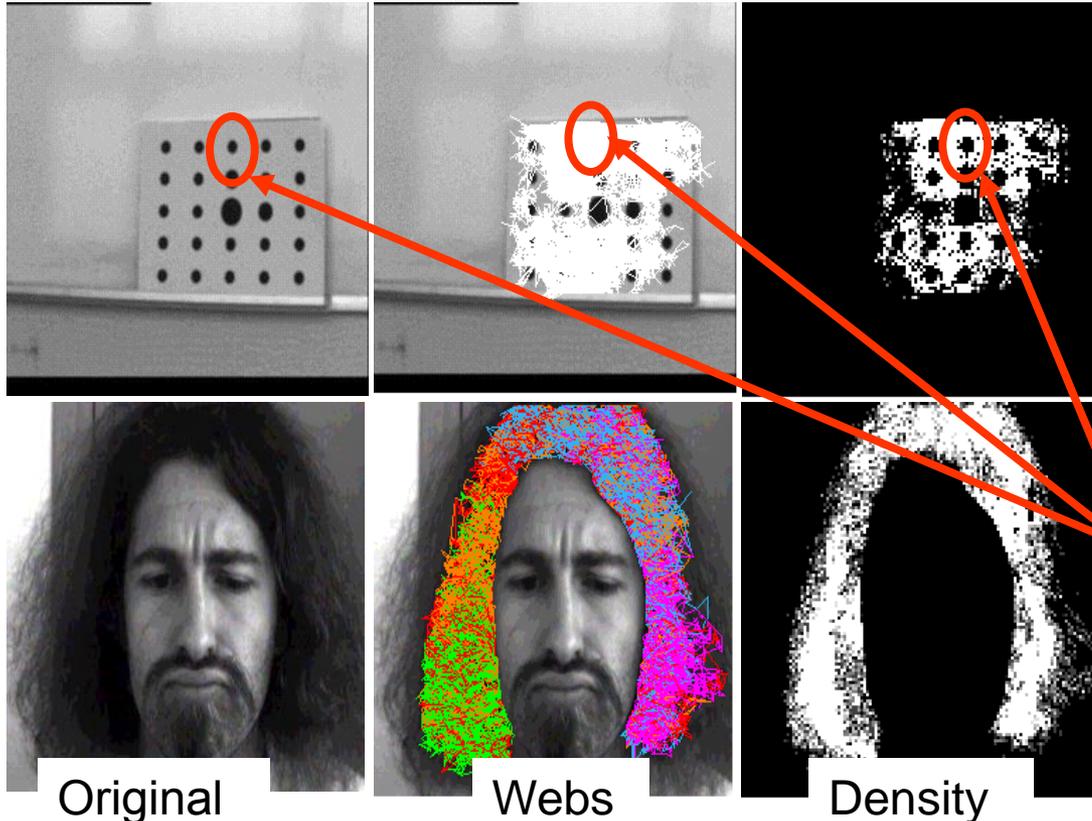
- Paramétrage des expérimentations

- Tous les agents ont les mêmes paramètres (sauf position initiale)
- On pose (manuellement) les araignées dans l'environnement
  - » Niveau de gris du pixel : niveau de référence
- Exécution pendant un nombre prédéterminé de cycles
- Evaluation visuelle

# Modélisation

## Stigmergie

- Araignées sociales : application
  - Résultats :



+ capacité à détecter une région  
- Couverture incomplète

Densité plus appropriée que la toile pour déterminer une région

# Modélisation

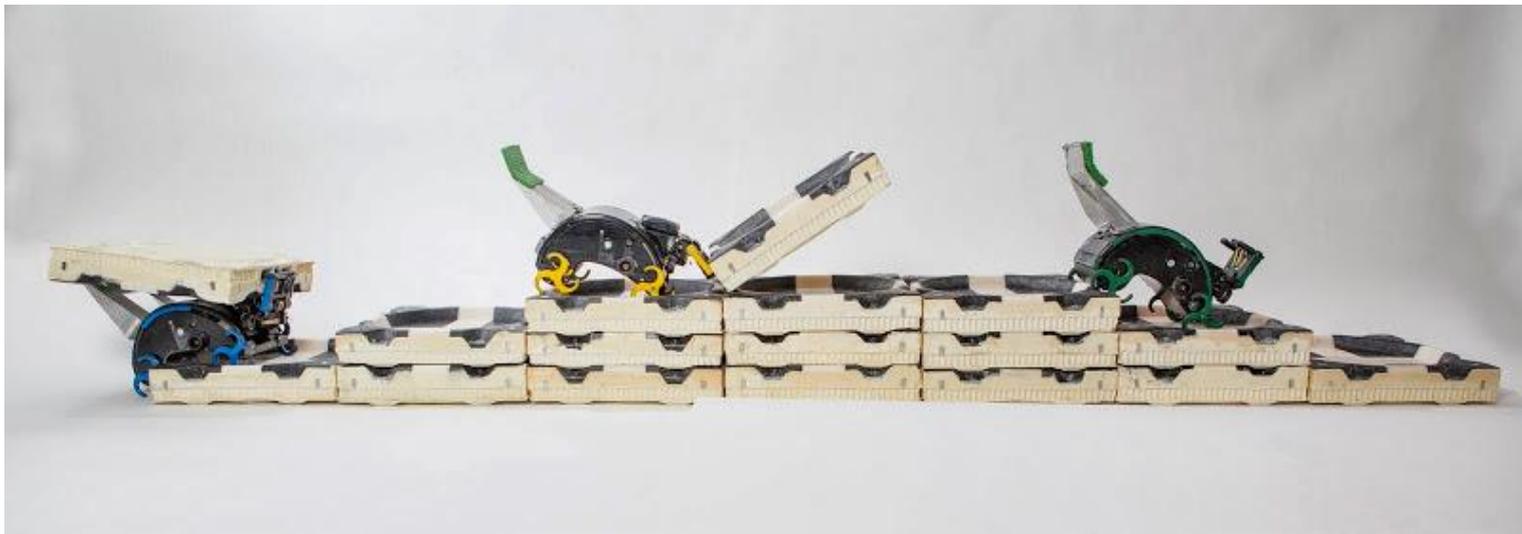
## Stigmergie

- Araignées sociales : application
  - Résultats :
    - Capacité à fournir les régions
    - Avec quelques adaptations du modèle biologique
  - Mais
    - le réglage des paramètres se fait à la main
    - Difficulté à extraire toutes les régions
  - Différentes extensions:
    - « évaporation » des fils
    - Dynamique de populations

# Modélisation

## Stigmergie

- Exemple 3 : Construction collective [Werfel2014]
  - Exemple de stigmergie passive
  - Application des SMA à la robotique



# Modélisation

## Stigmergie

- Exemple 3 : Construction collective  
[Werfel2014]

HARVARD  
UNIVERSITY



# Modélisation

## Flocking

- Boids de [Reynolds1987]
  - Reproduction des comportements collectifs d'agrégation :
    - Nuées d'oiseau
    - Essaims
    - Bancs de poissons
    - Hordes d'animaux



# Modélisation

## Flocking

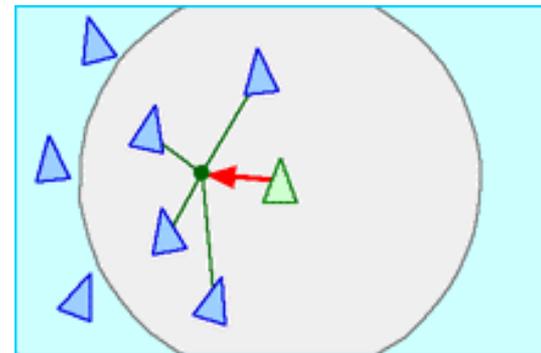
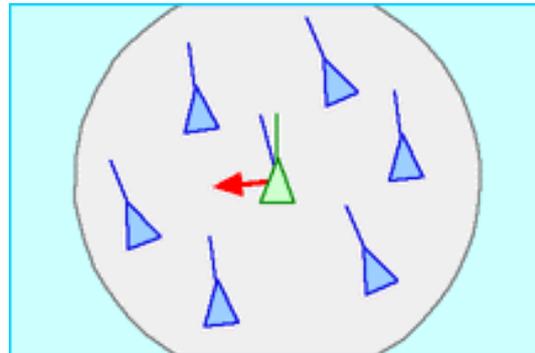
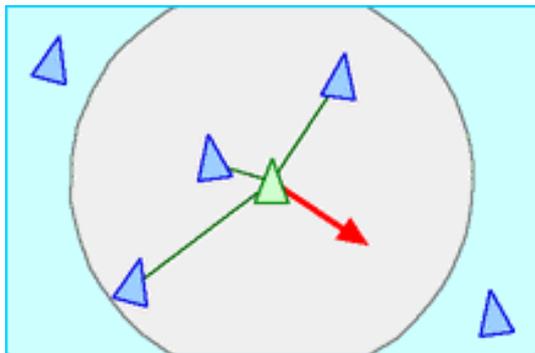
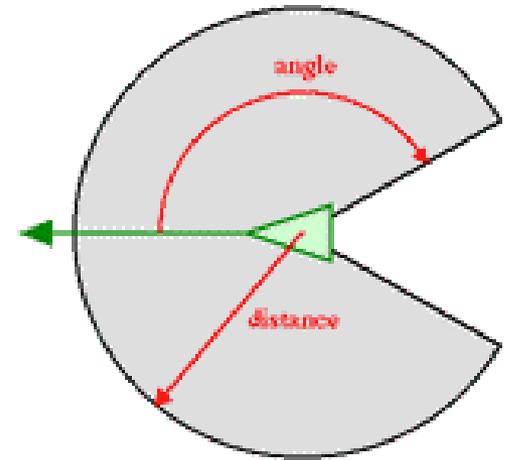
- Boids de [Reynolds1987]
  - Simulation

COURSE: 07  
COURSE ORGANIZER: DEMETRI TERZOPOULOS  
  
"BOIDS DEMOS"  
CRAIG REYNOLDS  
SILICON STUDIOS, MS 3L-980  
2011 NORTH SHORELINE BLVD.  
MOUNTAIN VIEW, CA 94039-7311

# Modélisation

## Flocking

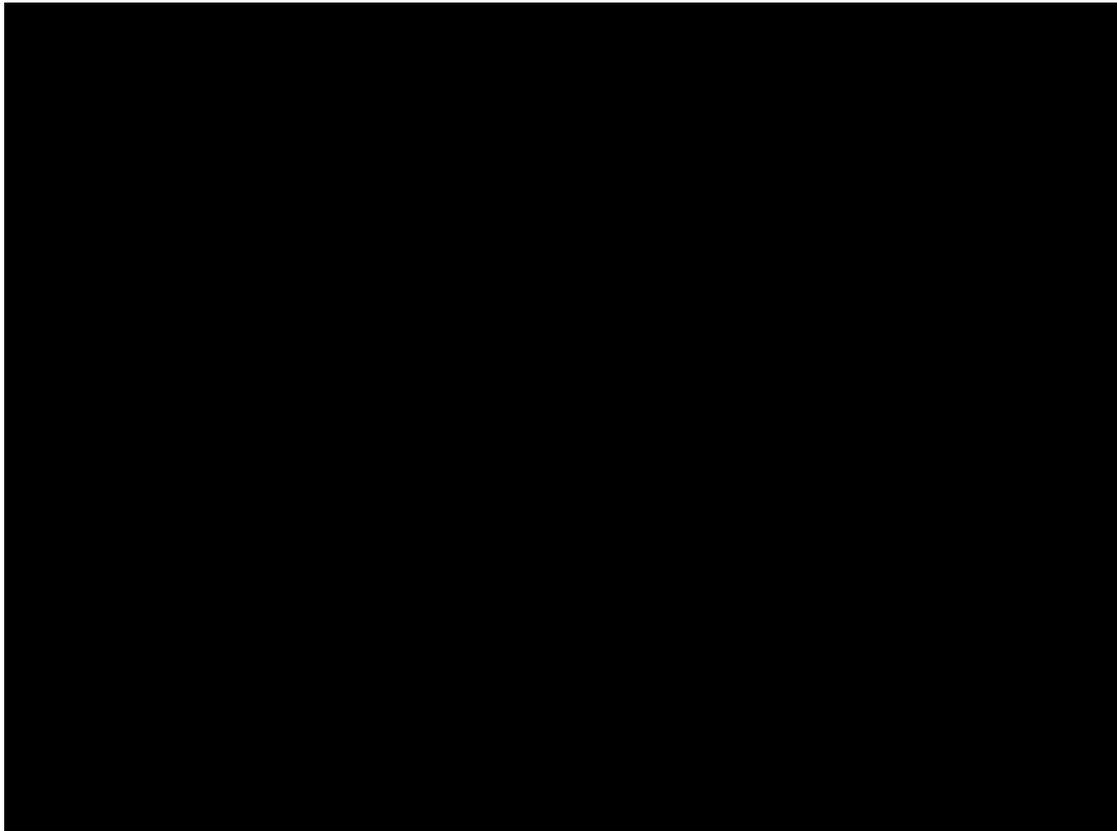
- Boids de [Reynolds1987]
  - Modélisation
    - Comportement de chaque agent « boid »
  - 3 comportements individuels :
    - Séparation : éviter les voisins
    - Alignement : s'orienter vers la direction moyenne des voisins
    - Cohésion : rejoindre le centre de gravité des voisins



# Modélisation

## Flocking

- Boids de [Reynolds1987]
  - Applications



# Modélisation

## Groupe de rats

- Dispositif expérimental
  - 6 rats dans une cage
  - Accès à la nourriture par un couloir submersible
  - Initialement
    - Pas d'eau dans couloir
    - tous se ravitaillent
  - Montée progressive de l'eau (anxiété face à l'eau)
    - Certains plongent, d'autres volent (la nourriture aux autres !!)

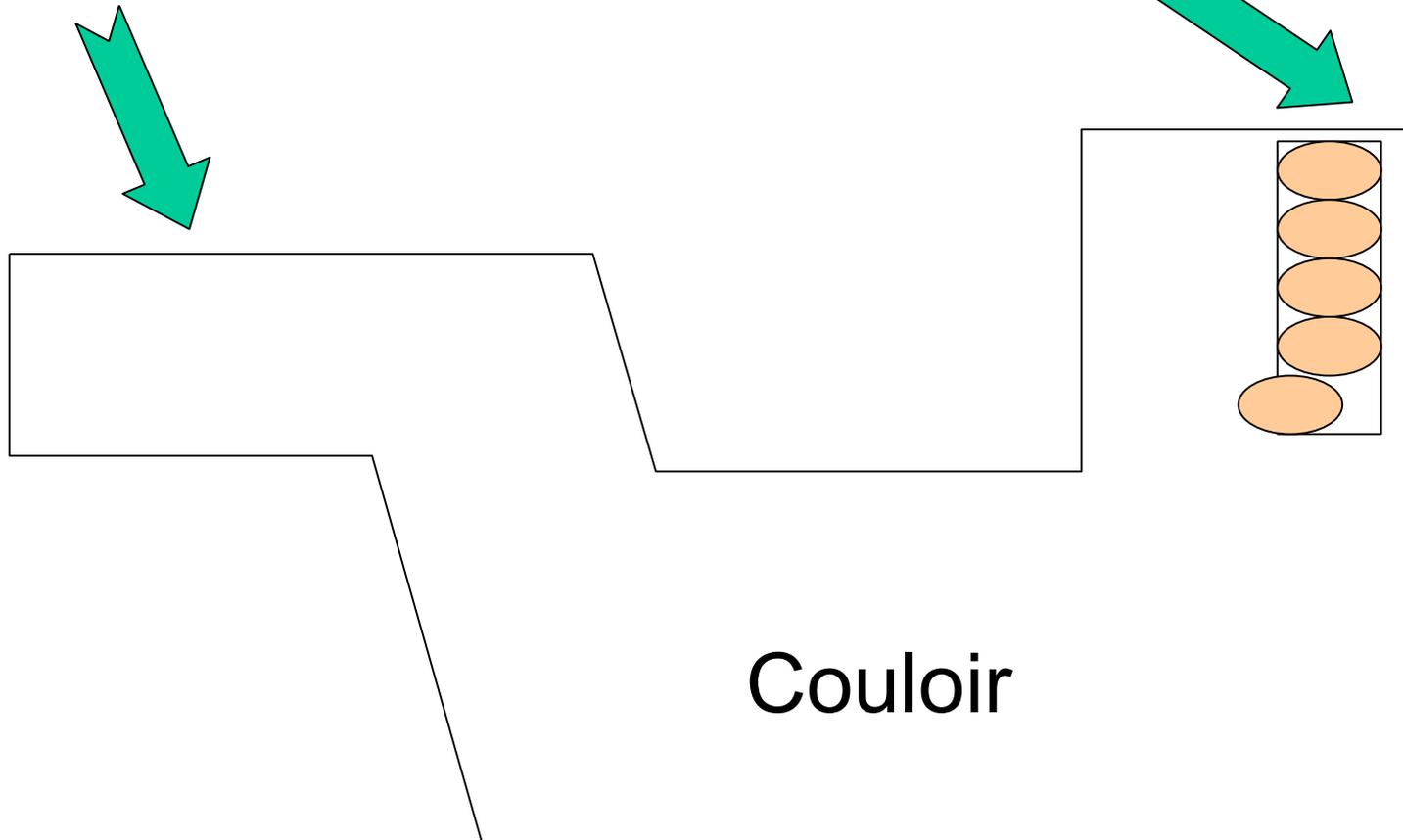
# Modélisation

## Groupe de rats

- Dispositif expérimental

Cage

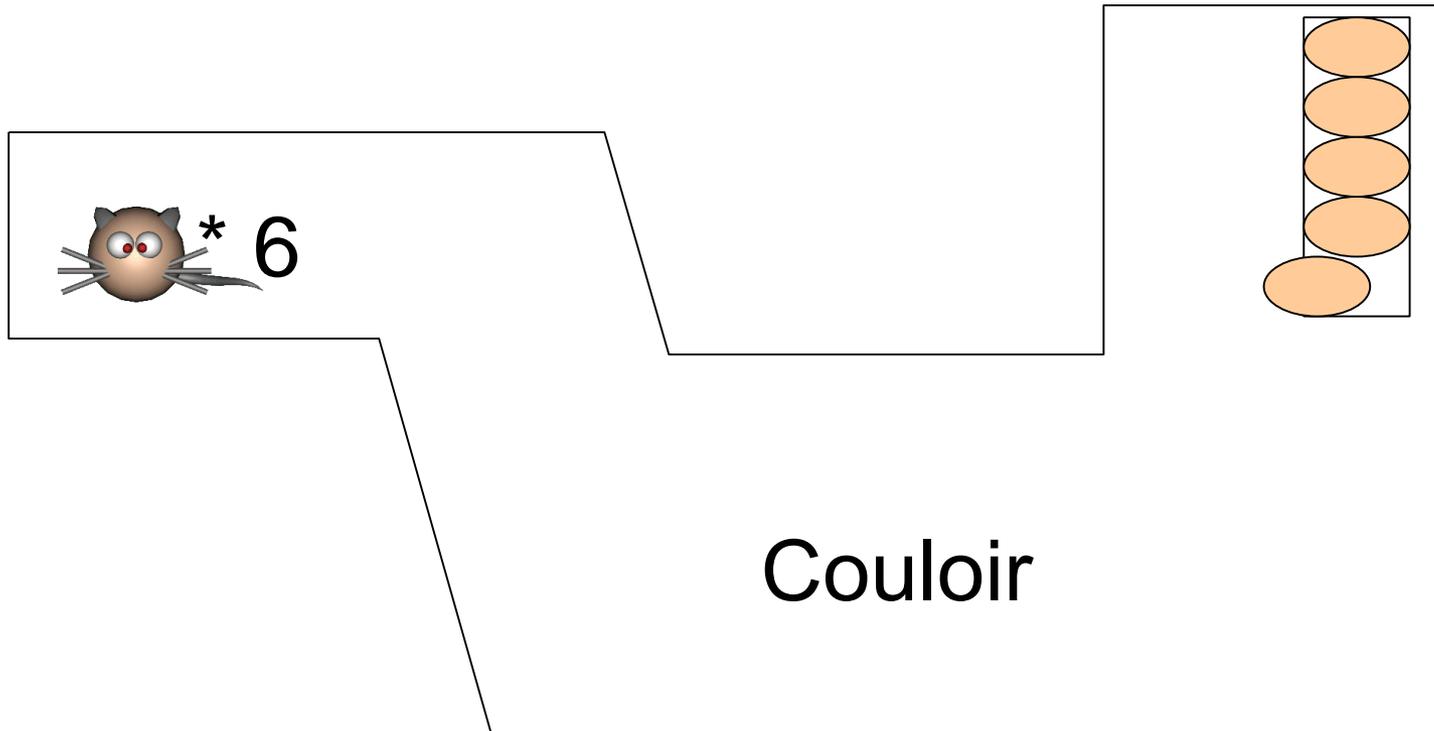
Croquettes



# Modélisation

## Groupe de rats

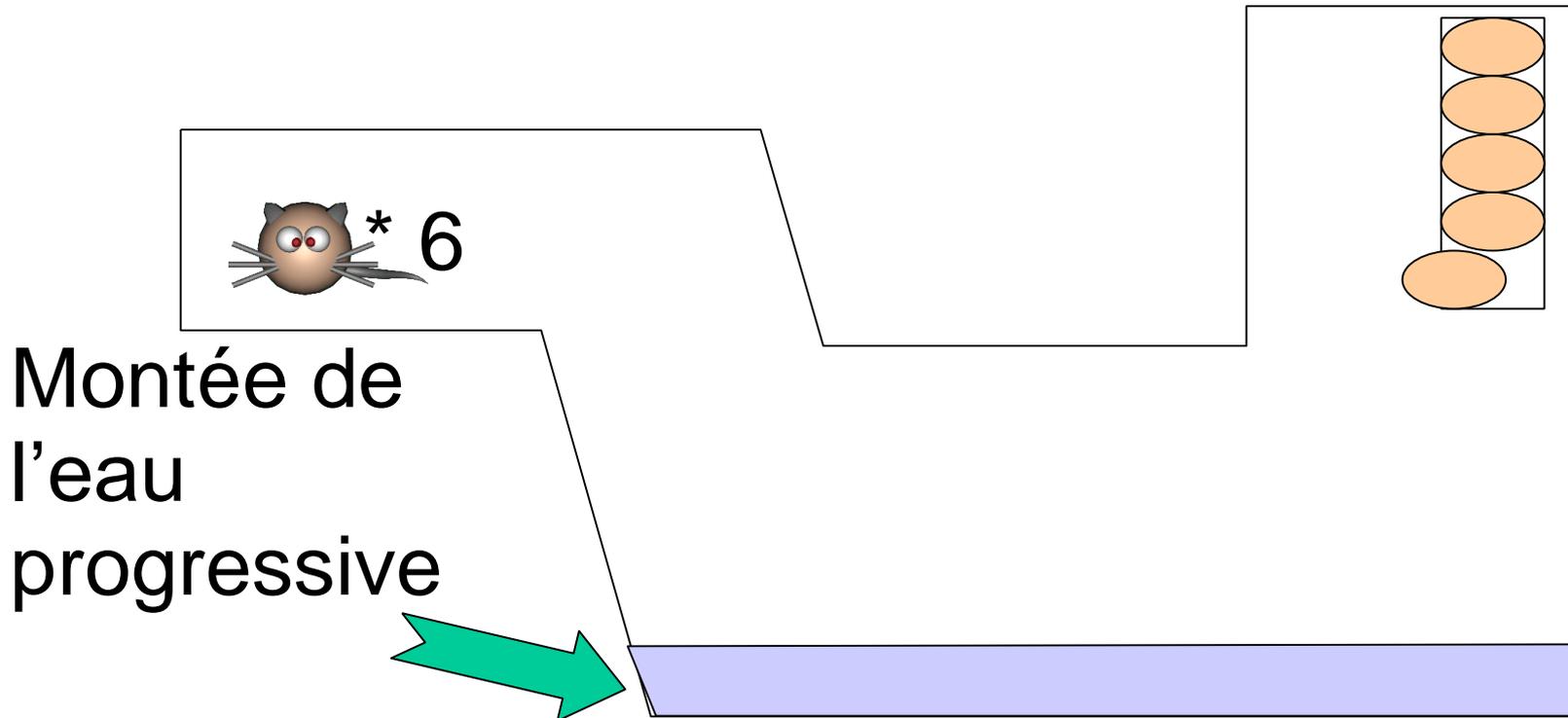
- Dispositif expérimental
  - Initialement:
    - 6 rats dans le dispositif
    - tous les rats se nourrissent



# Modélisation

## Groupe de rats

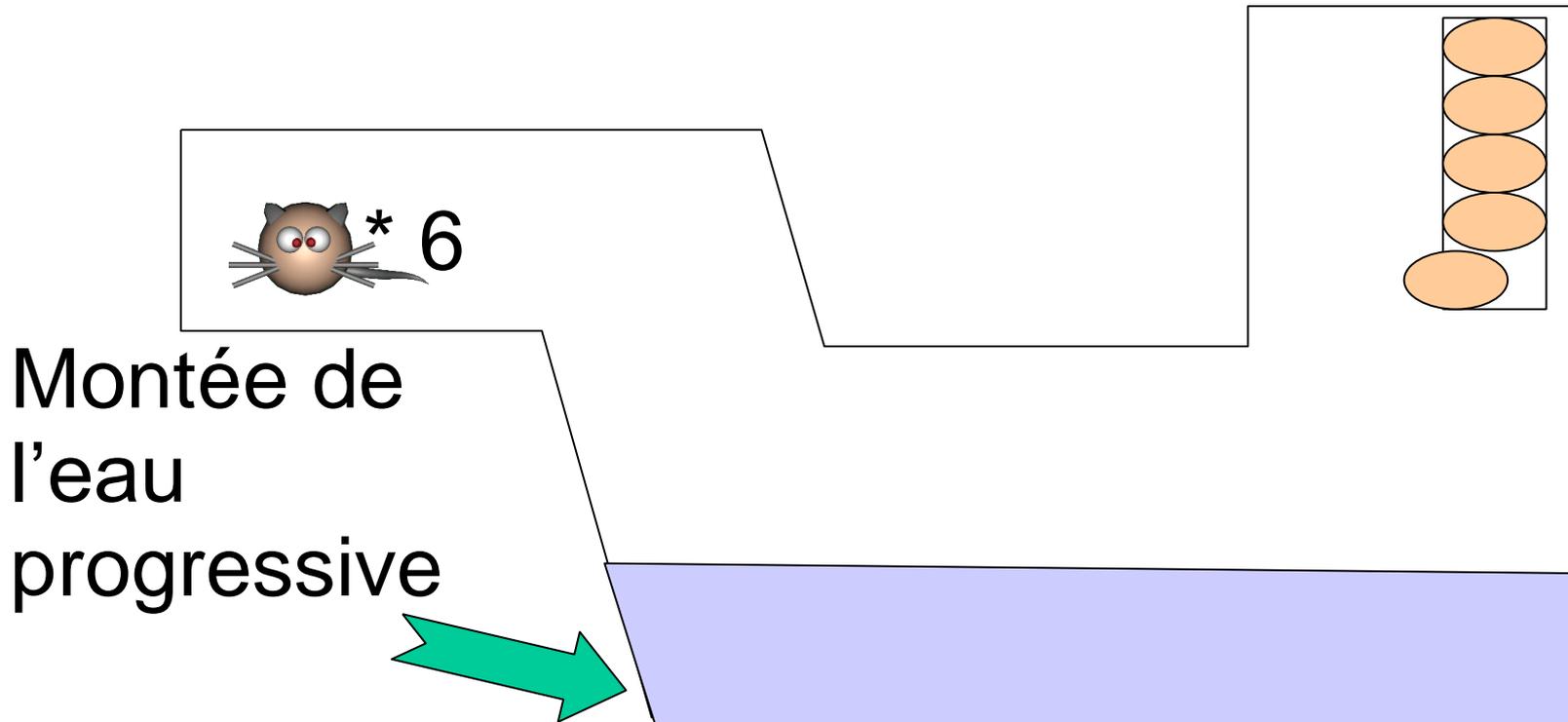
- Dispositif expérimental



# Modélisation

## Groupe de rats

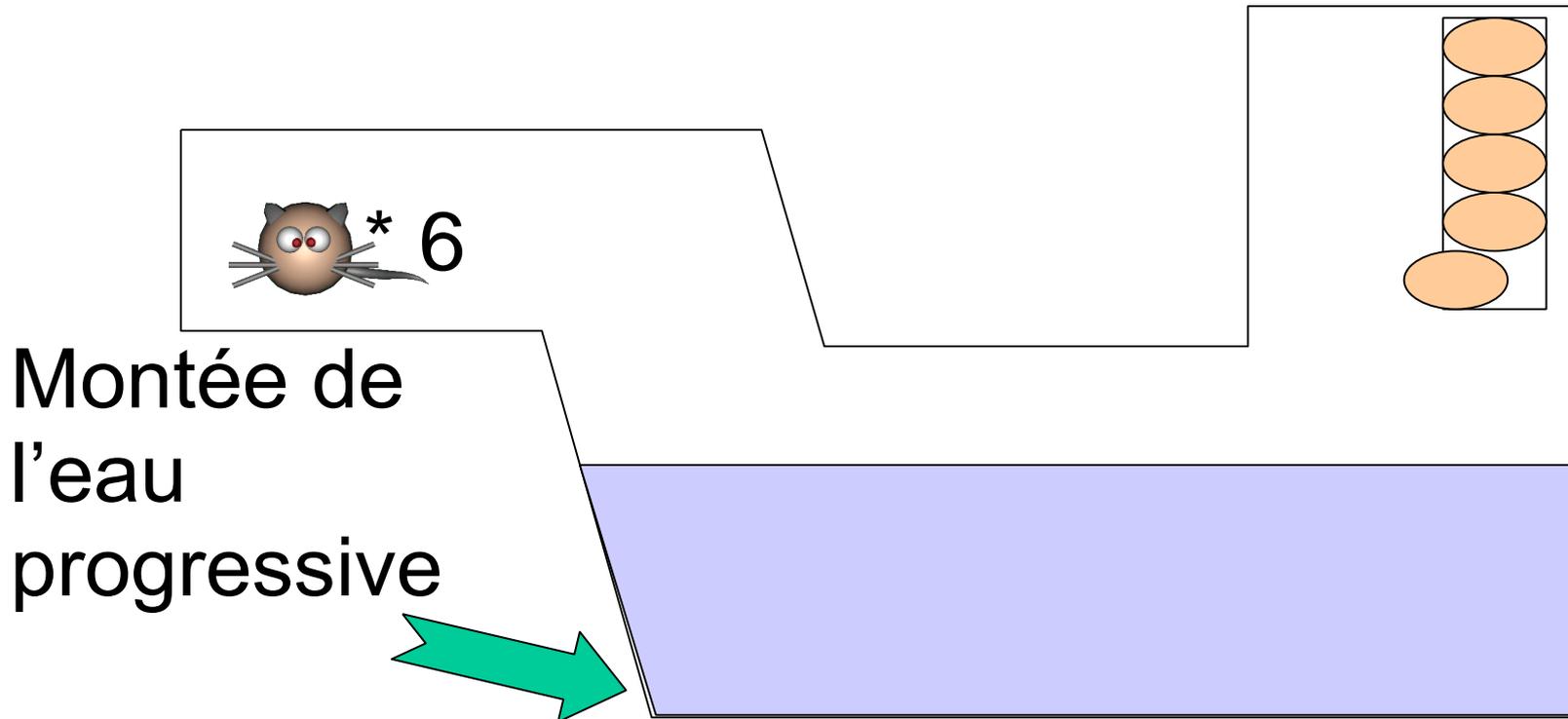
- Dispositif expérimental



# Modélisation

## Groupe de rats

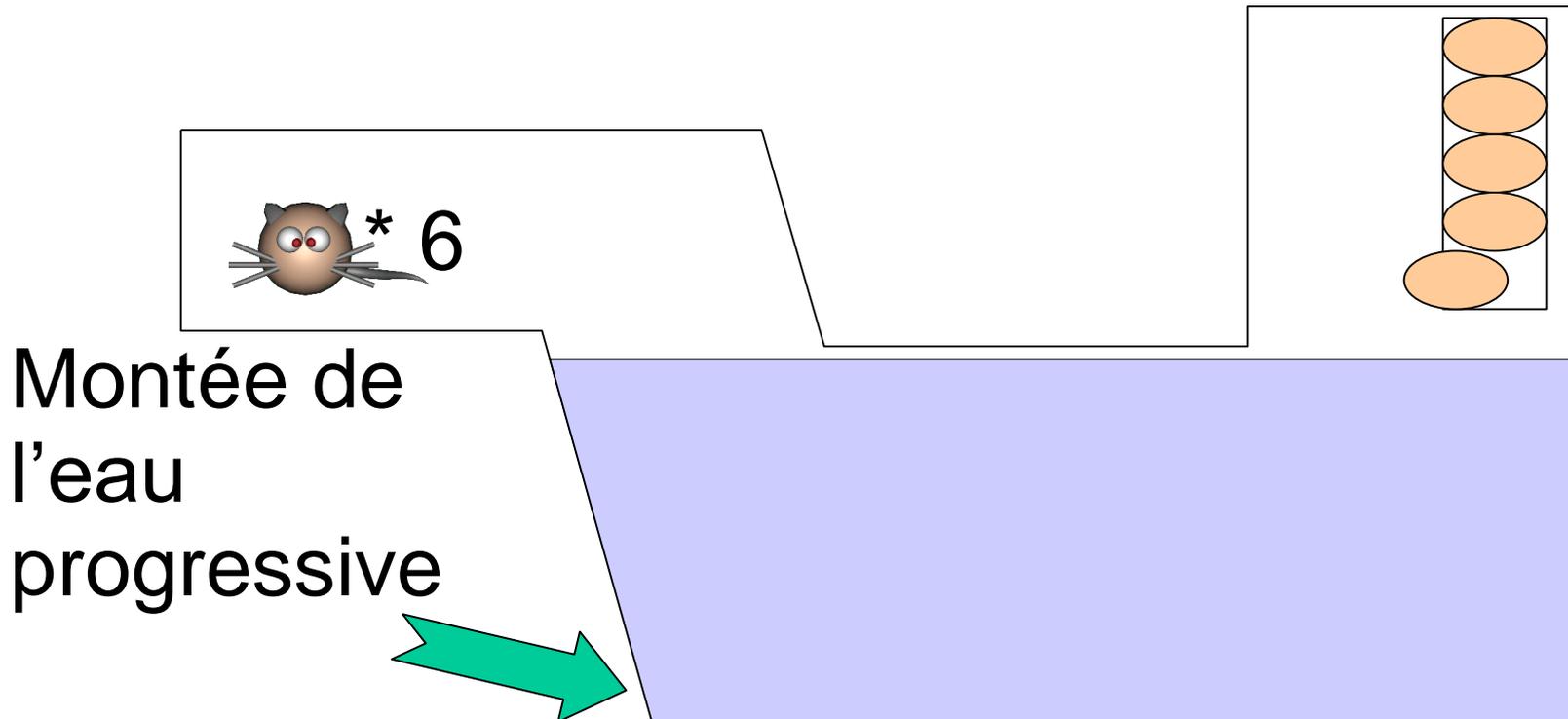
- Dispositif expérimental



# Modélisation

## Groupe de rats

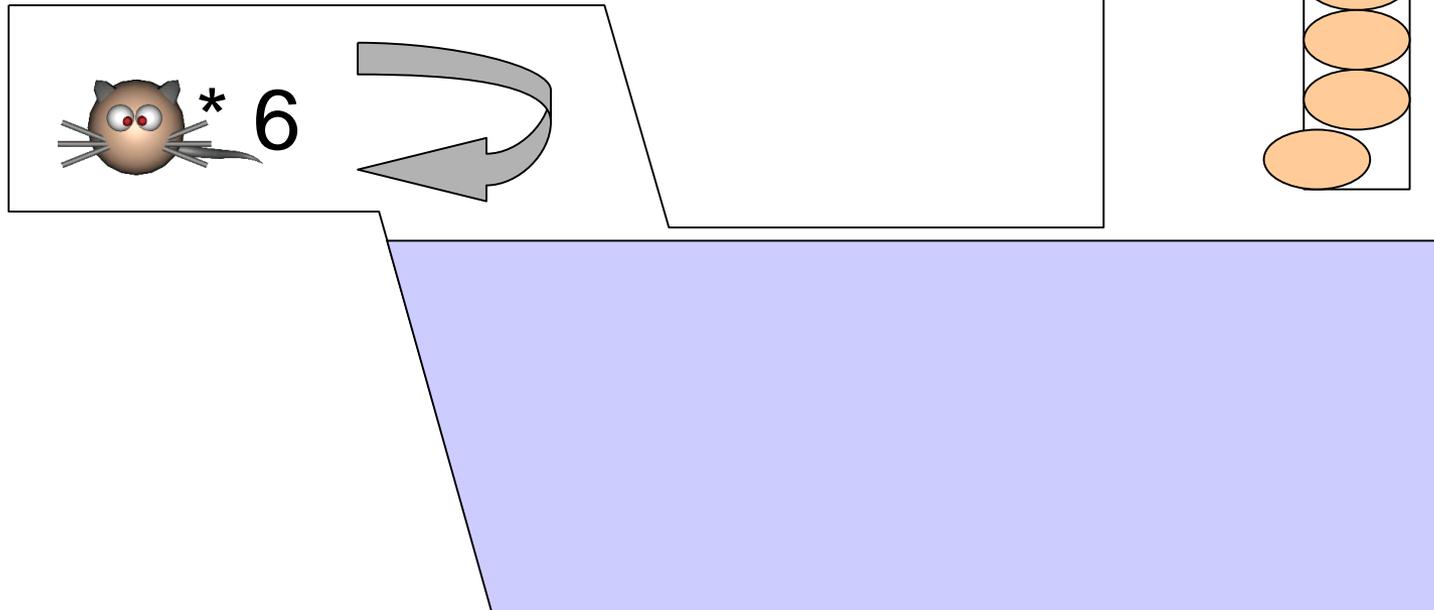
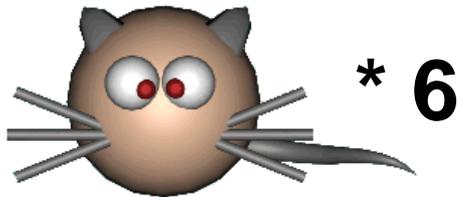
- Dispositif expérimental



# Modélisation

## Groupe de rats

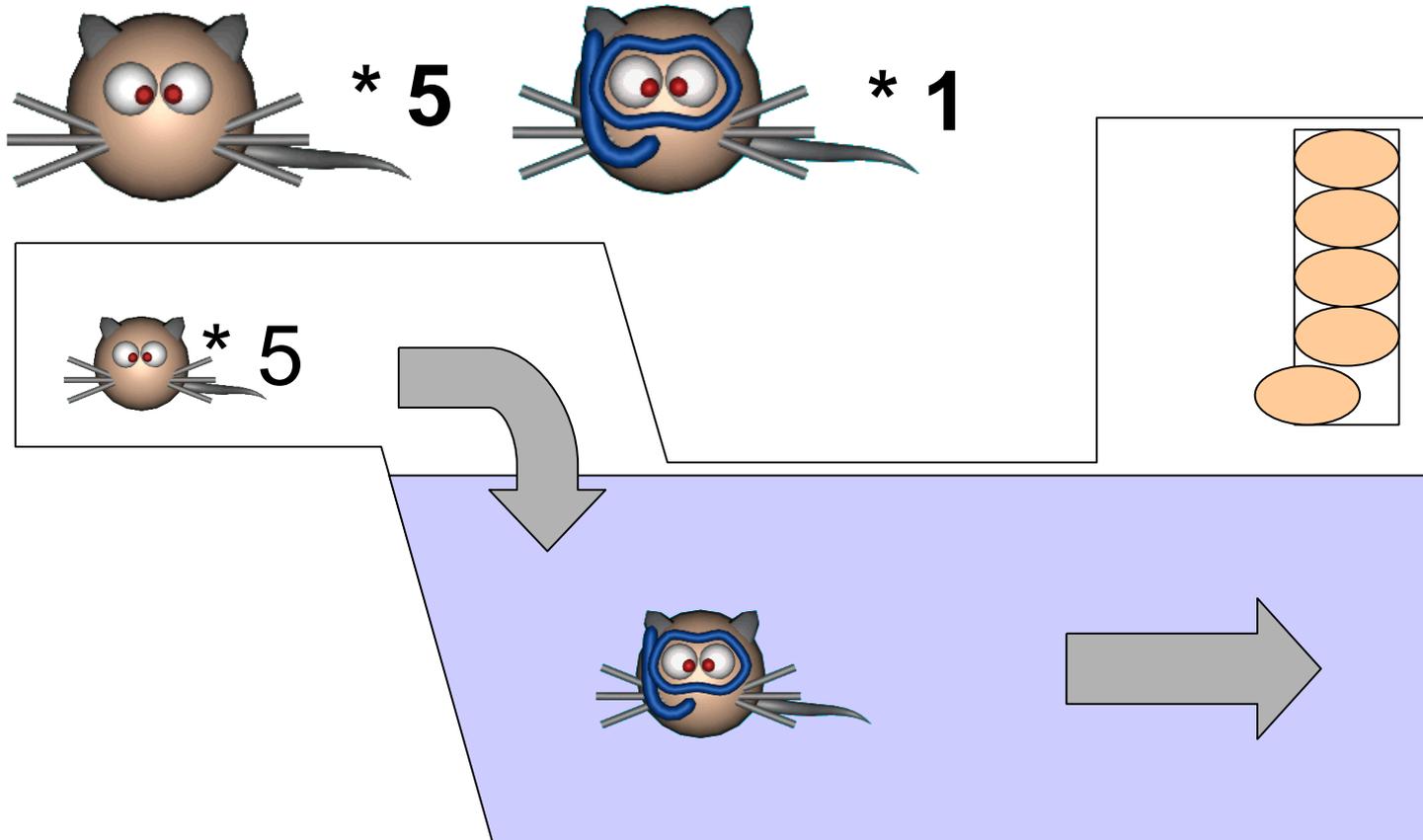
- Dispositif expérimental
  - Hésitation (peur de l'eau)



# Modélisation

## Groupe de rats

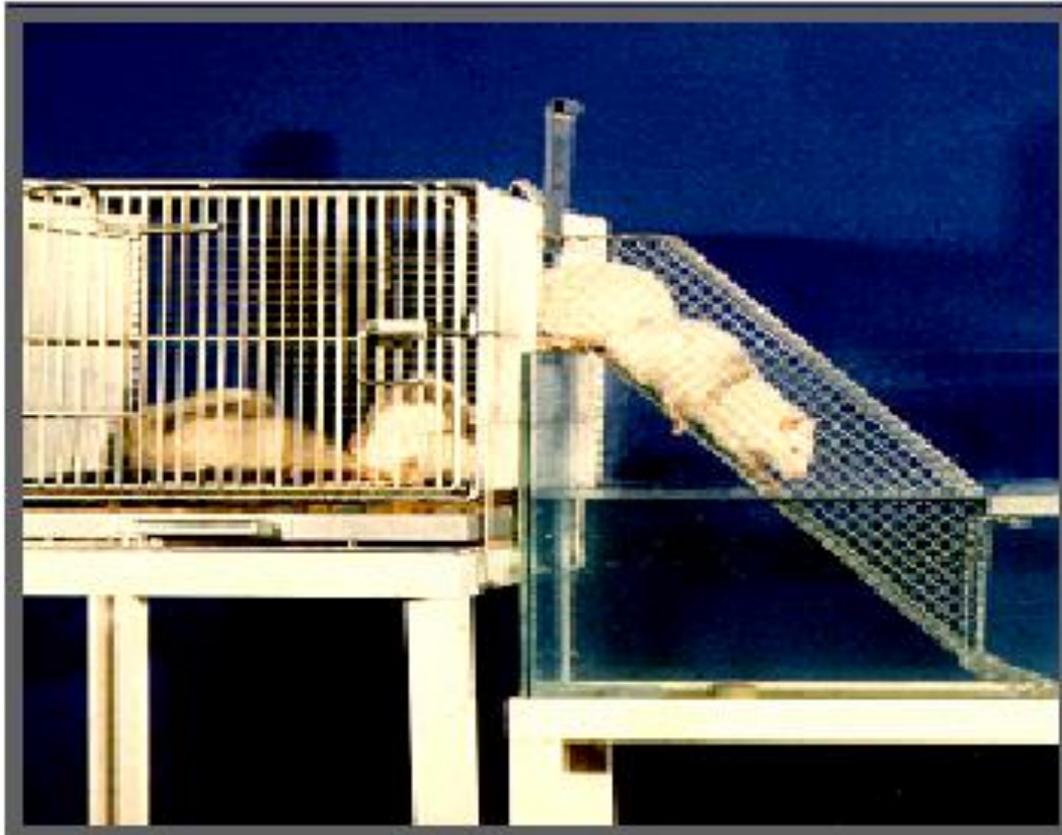
- Dispositif expérimental
  - Premier plongeon



# Modélisation

## Groupe de rats

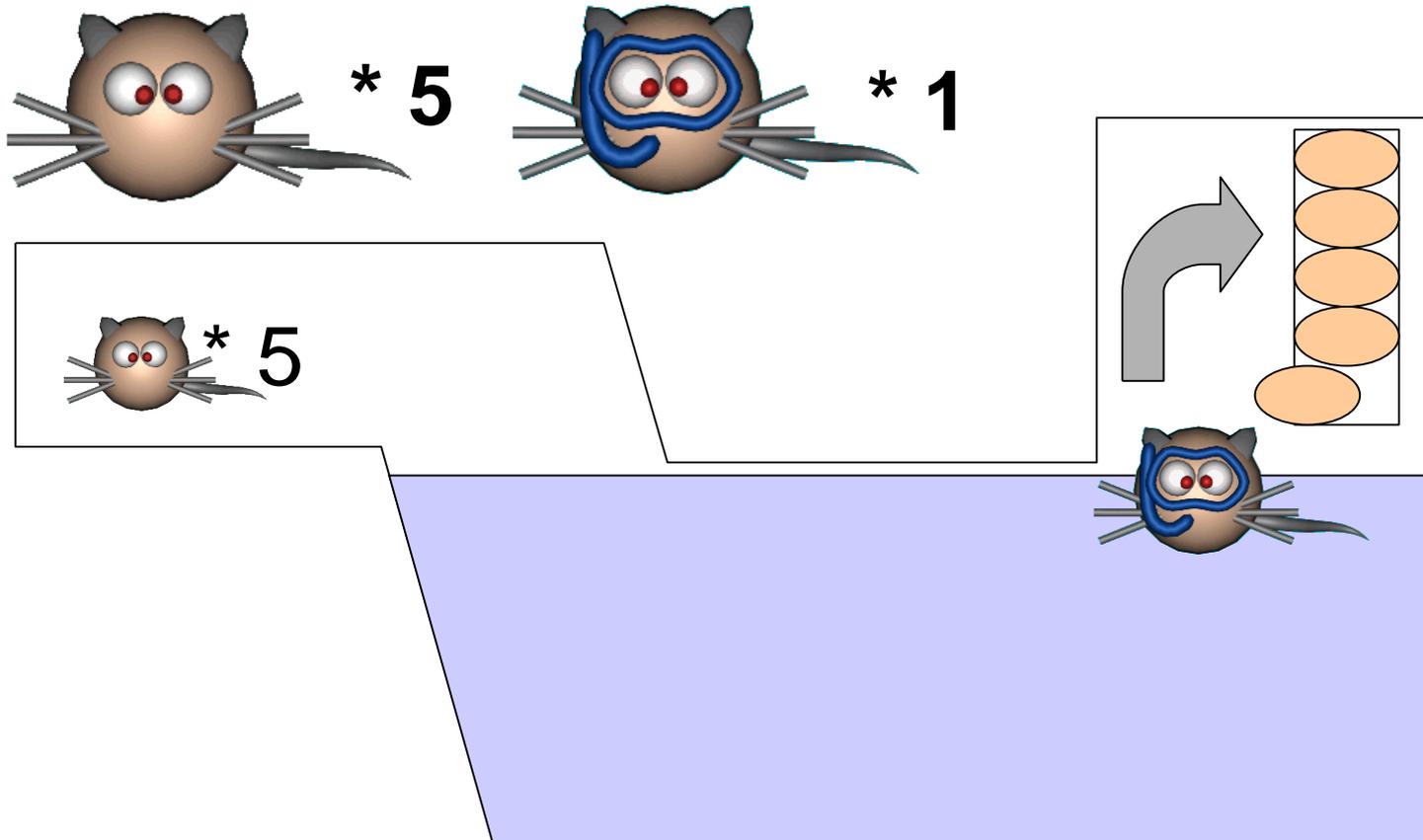
- Dispositif expérimental
  - Premier plongeon



# Modélisation

## Groupe de rats

- Dispositif expérimental
  - Premier plongeon



# Modélisation

## Groupe de rats

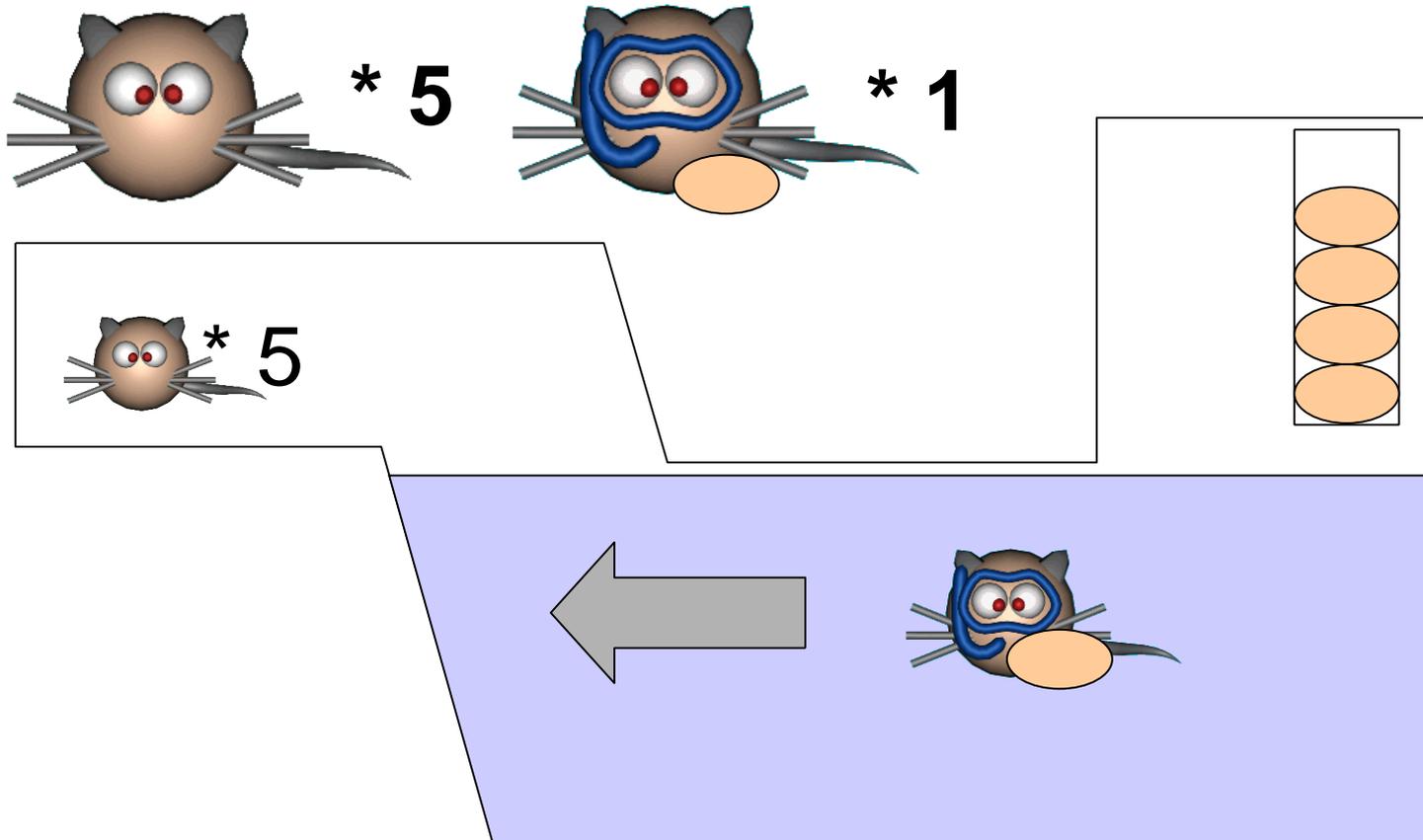
- Dispositif expérimental
  - Premier plongeon



# Modélisation

## Groupe de rats

- Dispositif expérimental
  - Premier plongeon



# Modélisation

## Groupe de rats

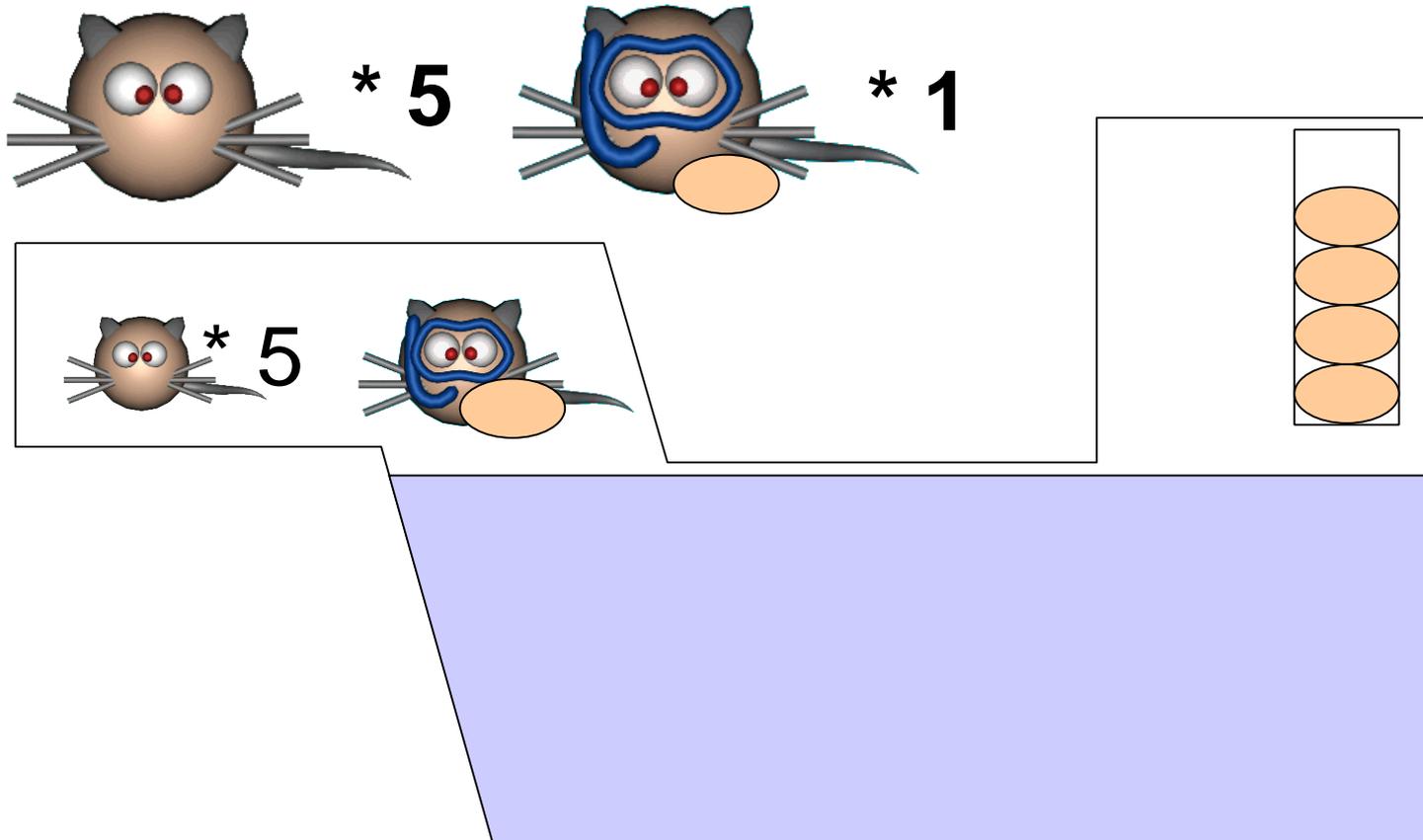
- Dispositif expérimental
  - Premier plongeon



# Modélisation

## Groupe de rats

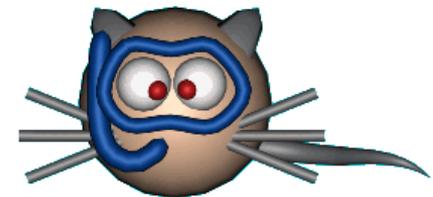
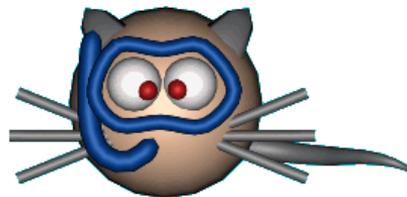
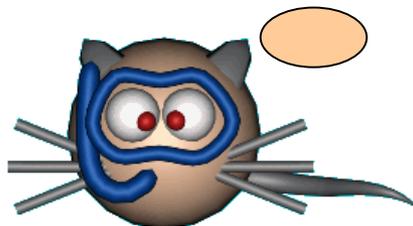
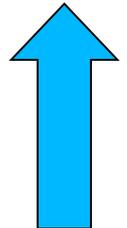
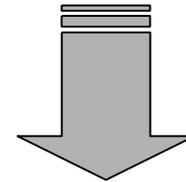
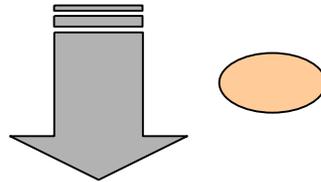
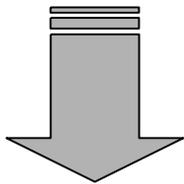
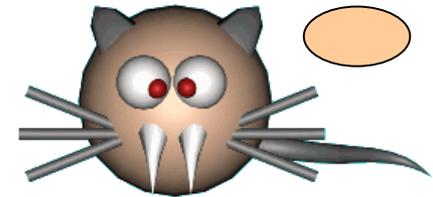
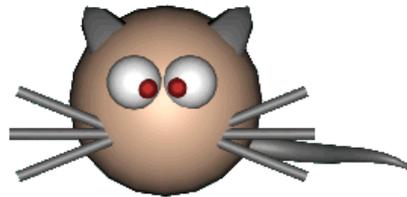
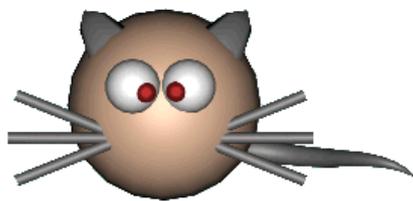
- Dispositif expérimental
  - Retour dans la cage



# Modélisation

## Groupe de rats

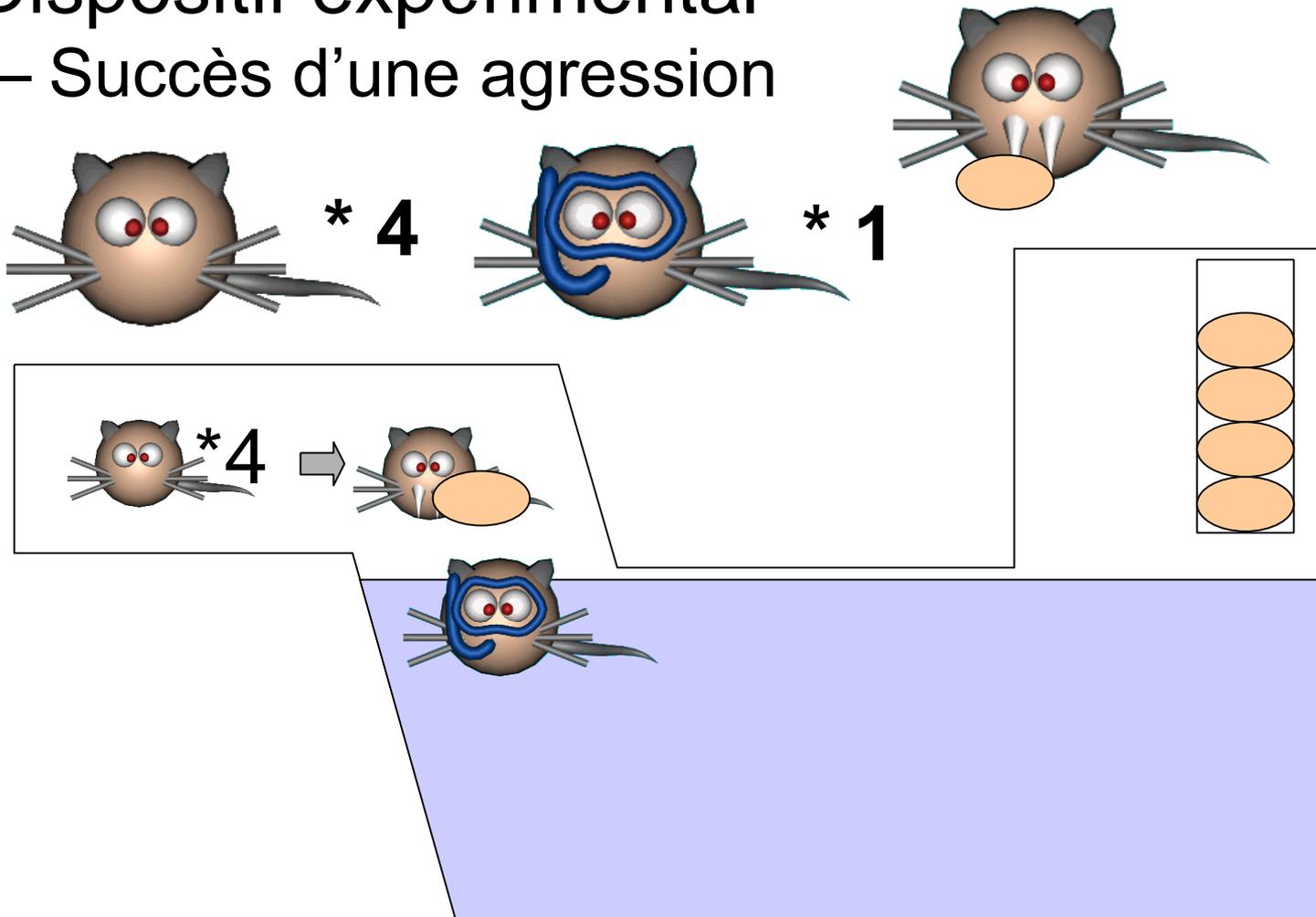
- Dispositif expérimental
  - Agression



# Modélisation

## Groupe de rats

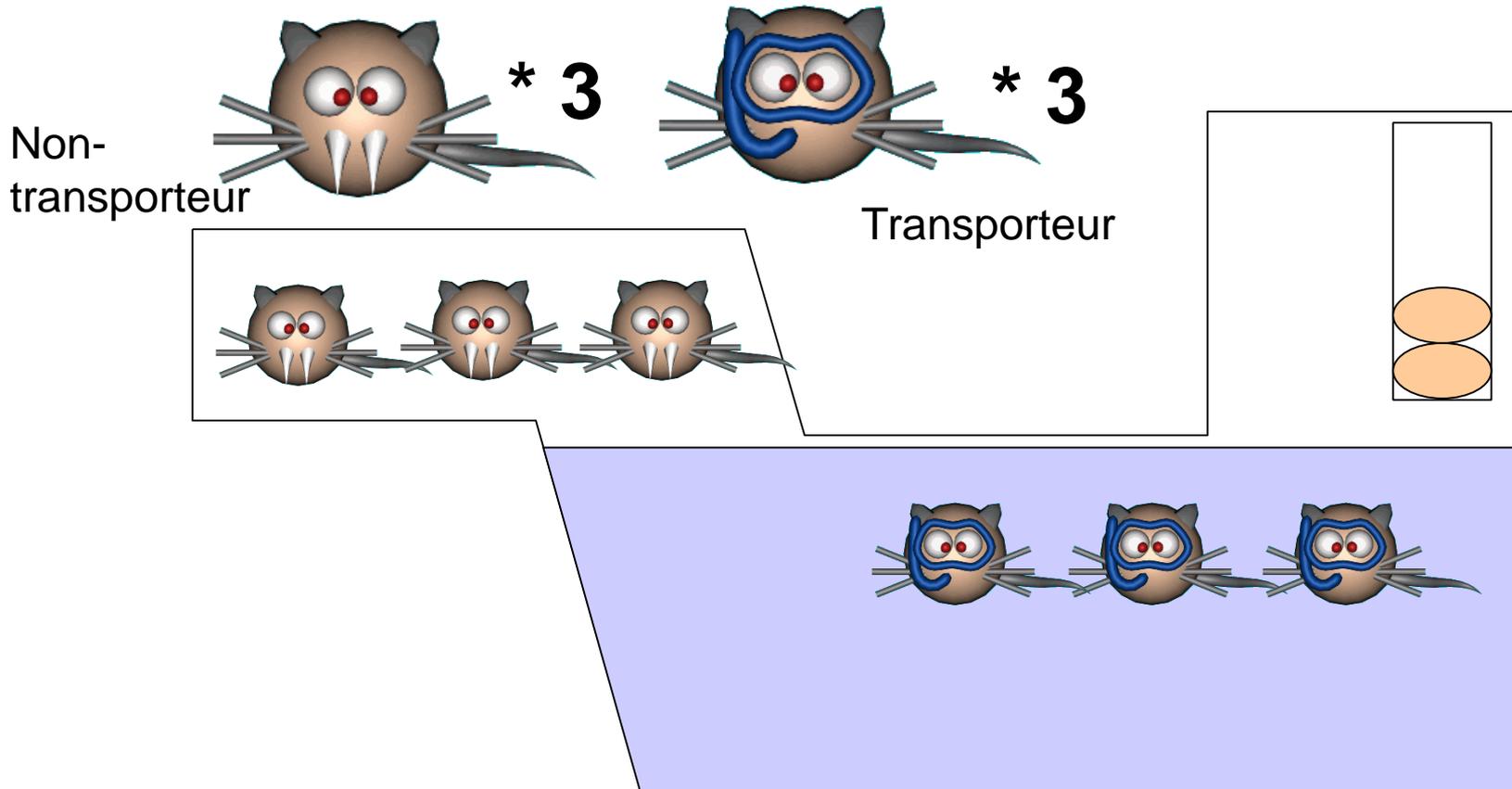
- Dispositif expérimental
  - Succès d'une agression



# Modélisation

## Groupe de rats

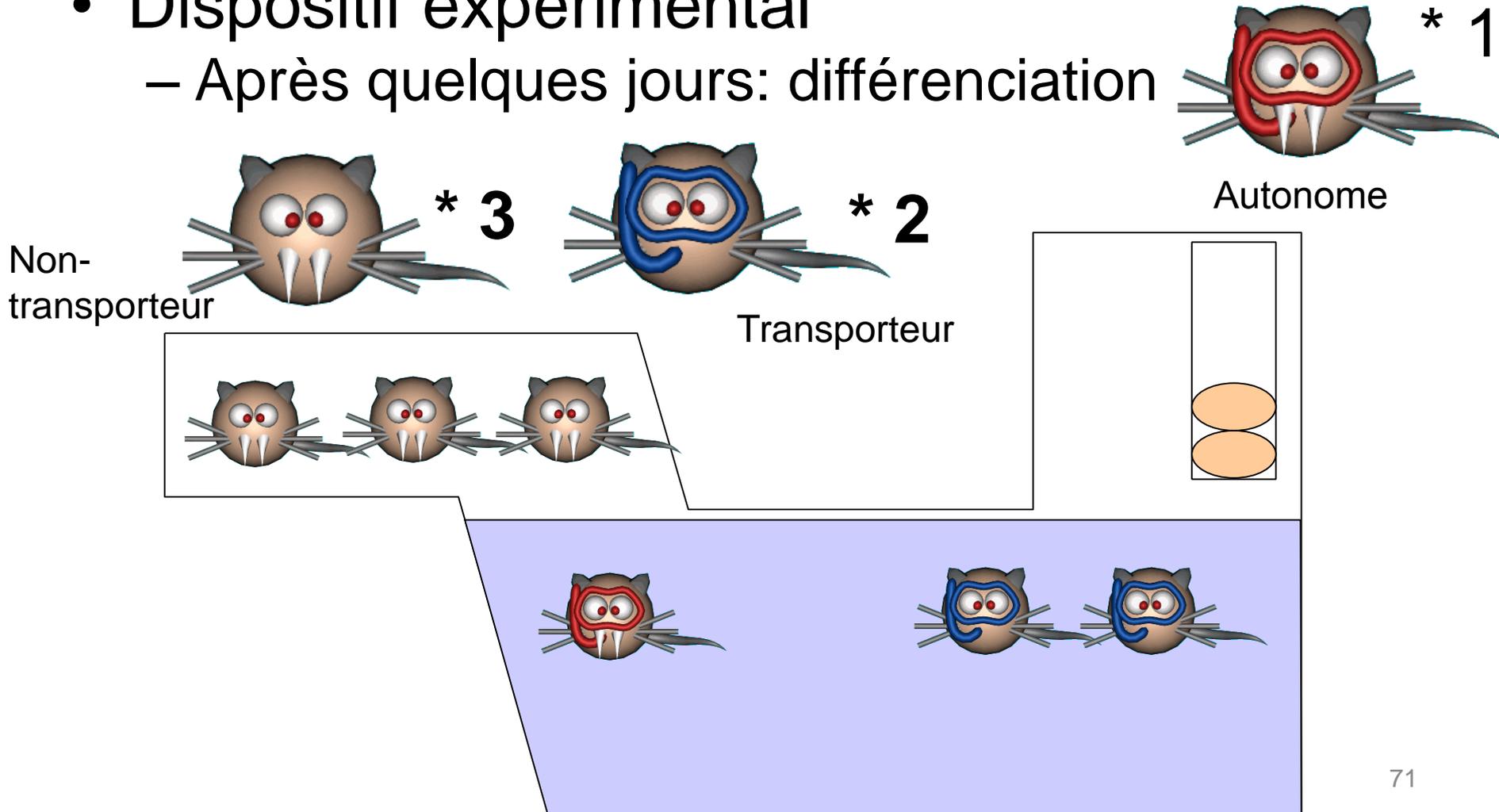
- Dispositif expérimental
  - Après quelques jours: différenciation



# Modélisation

## Groupe de rats

- Dispositif expérimental
  - Après quelques jours: différenciation



# Modélisation

## Groupe de rats

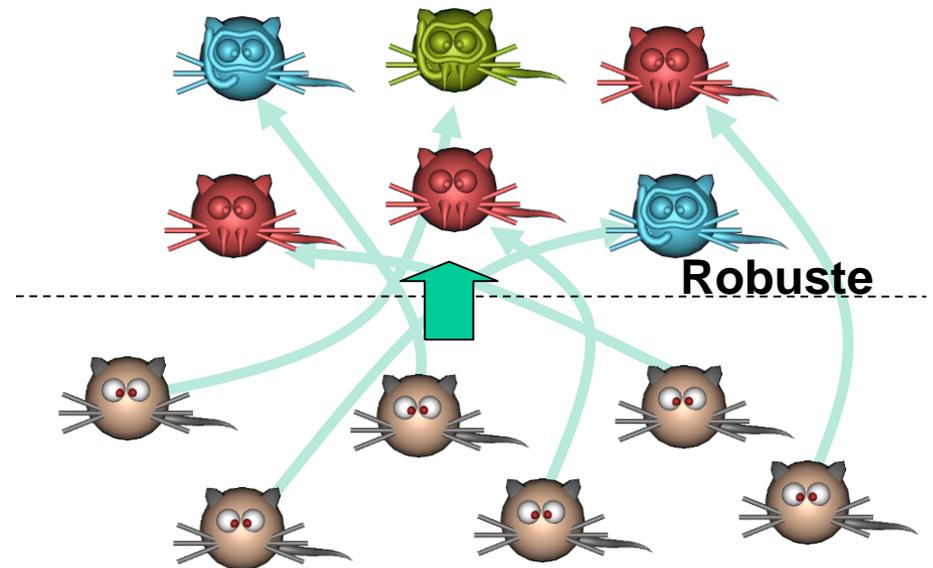
- Observations
  - Après quelques jours, apparition de profils
    - 3/6 ne plonge jamais (non transporteurs NT)
    - 2/6 plonge et ravitaille les autres (ravitailleurs R)
    - 1/6 plonge et ne ravitaille pas (autonomes A)
  - Tous se nourrissent
    - Mais 50% accèdent au distributeur
  - Réponse organisationnelle à un problème d'accès à une ressource

# Modélisation

## Groupe de rats

- **Analyses statistiques**
  - ACP sur les variables (nb de plongées ...)
  - Plus de 100 groupes
  - Pour chaque groupe :
    - 3 clusters
    - Même taille relative

Cluster	size
Rats NT	1 / 2
Rats T	1 / 2
Rats autonomes	1 / 6
Ravitailleurs	1 / 3



# Modélisation

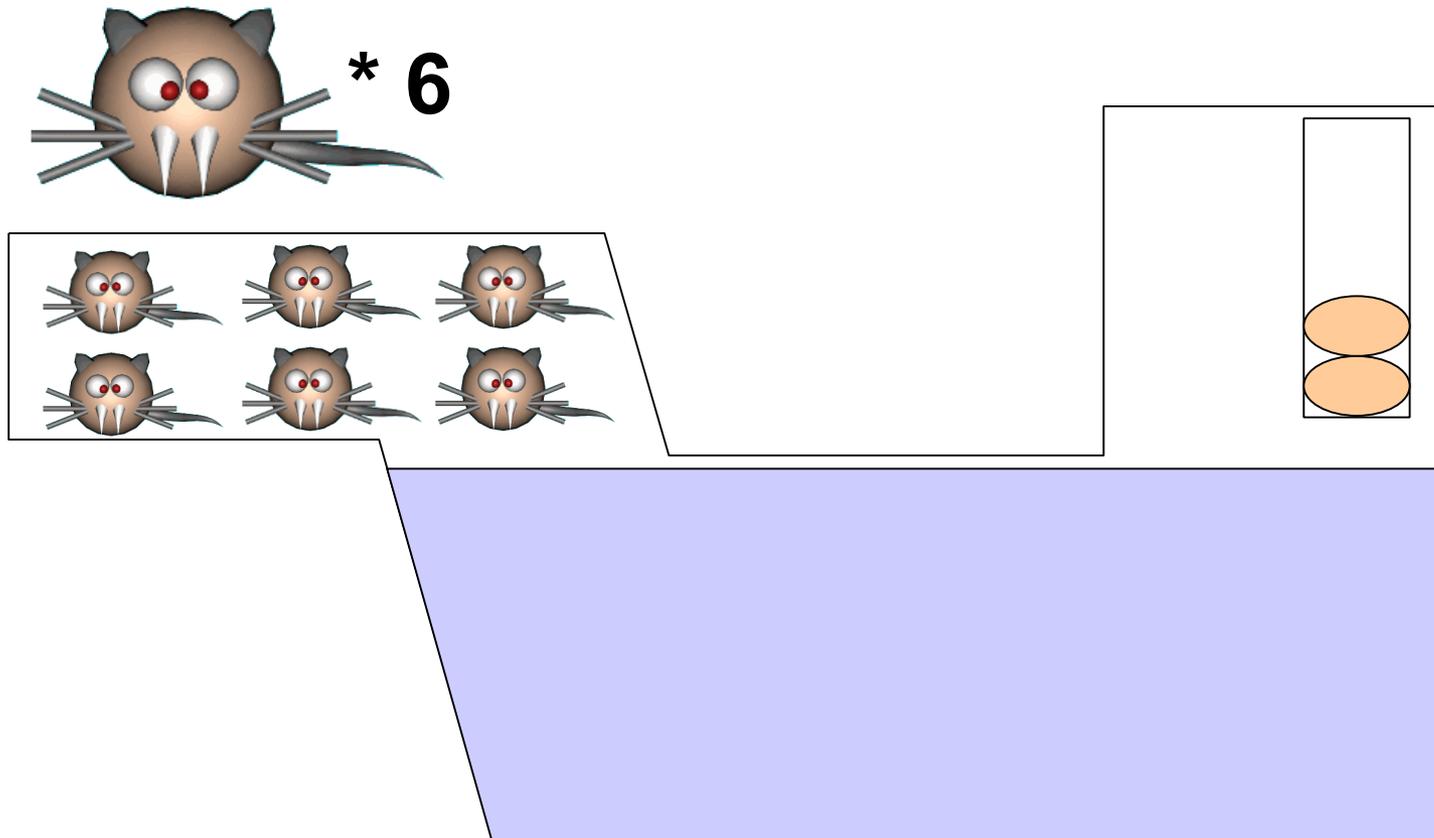
## Groupe de rats

- Auto-organisé ?
  - Apparaît régulièrement (98%)
  - Proportions constantes (50% T, 50% NT)
  - Phénomène dû aux interactions interindividuelles face à un problème
  - Apparition nécessite un certain temps
  - Ré-apparaît avec des individus déjà différenciés (cf après)
  - Lié à la taille du groupe (ex N= 1 ou 2)
- Questions biologiques
  - Mécanisme(s) impliqué(s) ?
  - Nécessité de cognition sociale ?

# Modélisation

## Groupe de rats

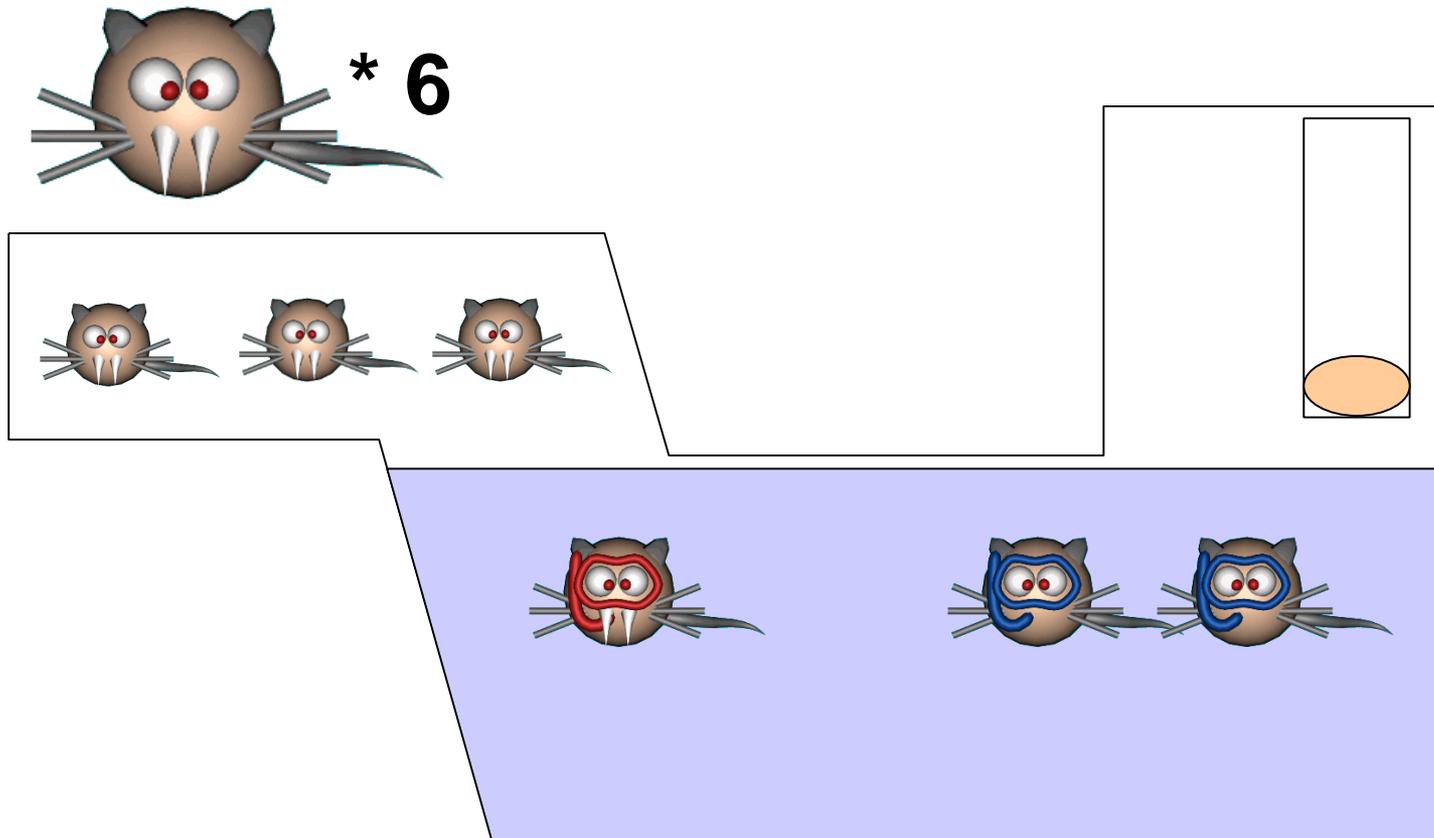
- Autres expériences
  - Avec 6 rats déjà spécialisés (non transporteurs)



# Modélisation

## Groupe de rats

- Résultat
  - Mêmes profils, mêmes proportions



# Modélisation

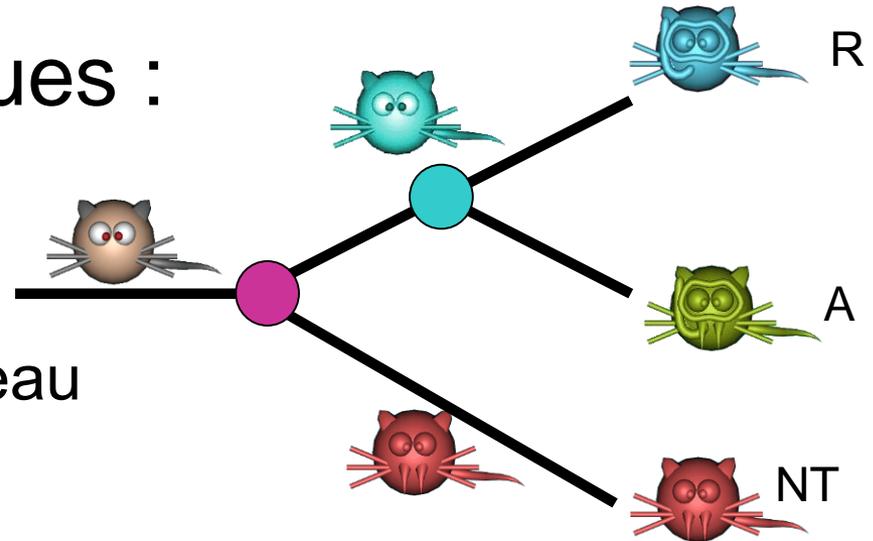
## Groupe de rats

- Autres expériences
    - Avec 6 rats
      - $\frac{1}{2}$  des rats drogués (diazepan)  
Baisse de l'anxiété pour l'eau
      - $\frac{1}{2}$  des rats non drogués
    - Résultat
      - Même profils, même proportions
      - mais
        - 80% des non transporteurs chez les non drogués
        - 80% des transporteurs chez les drogués
- ⇒ Rôle de l'anxiété
- Les moins anxieux plongent les premiers

# Modélisation

## Groupe de rats

- Hypothèses biologiques :
  - Rat
    - Faim
    - Anxiété vis à vis de l'eau
      - ⇒ Différentiation T/NT
    - Force
  - Présence du rat autonome
    - ➔ 2 mécanismes couplés :
      - Plongée : Anxiété
      - Vol : Force (dominance sociale)
    - Renforcement local



# Modélisation

## Groupe de rats

- Proposition d'un modèle :
  - Environnement: piscine et croquette
    - Taille croquette= tps de consommation/ tps plongée
    - Coefficient énergétique
    - Remarque: pas de représentation spatiale ...
  - Agent : rat
    - Variables internes: faim, anxiété, force
    - Items comportementaux
      - Manger si possible sinon
        - » Plonger ou Voler
      - Remarque: pas de représentation (cognition) sociale
      - Déclenchement probabiliste (2 derniers)
  - Mise en œuvre des comportements par couplage de 2 modèles existants :
    - Réponse à seuil (plongée) et relation de dominance (vol)

# Modélisation

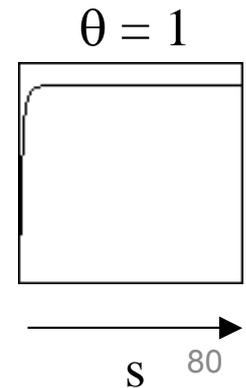
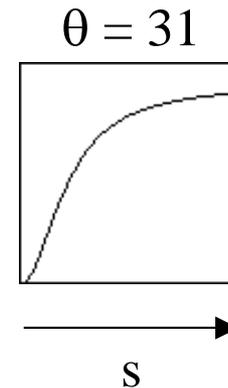
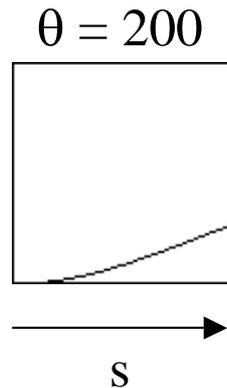
## Groupe de rats

- Proposition d'un modèle :
  - Comportement de plongée
    - Vue intuitive
      - Plus le rat est anxieux, moins il plonge
      - Plus il a faim, plus il plonge
    - Modèle
      - Réponse à seuil
      - Avec  $\theta$  (anxiété),  $S$  (faim)
      - Action effectuée: renforcement ( $\theta$  diminue)

Probabilité de déclenchement

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

Probability  
1  
0



# Modélisation

## Groupe de rats

- Proposition d'un modèle :
  - Comportement de vol
    - Vue intuitive
      - Plus un rat gagne de combat, plus il est fort
      - L'issue du combat est relative à la force
    - Modèle
      - Relation de dominance (Hem96)
      - Avec  $F$  : force\* de l'agresseur,  $f$  celle de l'agressé (\* ou rang social)
      - Action effectuée
  - » Mise à jour des forces (Win=agresseur a gagné ?)

Probabilité de déclenchement

$$P(win) = \frac{F}{F+f}$$

Maj des forces

$$f = f - \left( win - \frac{F}{F+f} \right) * c_{ref}$$

$$F = F + \left( win - \frac{F}{F+f} \right) * c_{ref}$$

# Modélisation

## Groupe de rats

- Proposition d'un modèle :
  - Fonctionnement du système cyclique :
    1. les rats sans croquette essayent *plongée*
    2. les rats sans croquette essayent *vol (choix au hasard d'un autre rat possédant une croquette)*
    3. Les rats mangent (si possible)
    4. La faim augmente constamment

# Modélisation

## Groupe de rats

- Proposition d'un modèle :
  - Propriétés du modèle
    - Réponse collective à un problème d'accès à des ressources
      - Pas de stimulus global
      - Pas de représentation des autres
      - Pas de représentation de l'objectif collectif
      - Pas de cognition sociale
    - Réponse organisationnelle = spécialisation
      - Répartition des rôles au sein d'une communauté
      - Spécialisation: une des organisations les plus répandues pour résoudre un problème à plusieurs

*Ici « construction » de l'organisation de manière auto-organisée sans stimulus global*

# Modélisation

## Groupe de rats

- Proposition d'un modèle :
  - Evaluation
    - Du résultat : vérification de la spécialisation ;
      - Graphiquement (une simulation)
      - Statistiquement (plusieurs) – semblable à l'analyse du système biologique
    - Du processus :
      - Introduire des perturbations
      - Modifier les conditions initiales
      - Vérifier les résultats (graphiquement)
    - Etapes préalables :
      - Trouver des « bonnes » conditions initiales
      - Choix empirique des paramètres

# Modélisation

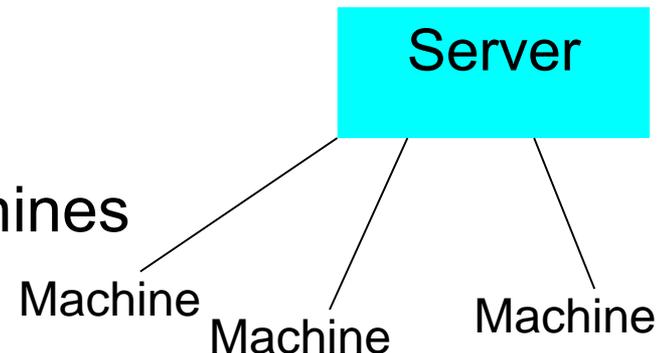
## Groupe de rats

- Proposition d'un modèle :
  - Paramètres
    - Propriétés d'adaptation du système:
      - À l'environnement : Nombre d'agents
      - Aux conditions externes : Quantité de nourriture
    - Propriétés d'adaptation dynamique
      - Durant l'exécution : ré-adaptation

# Modélisation

## Groupe de rats

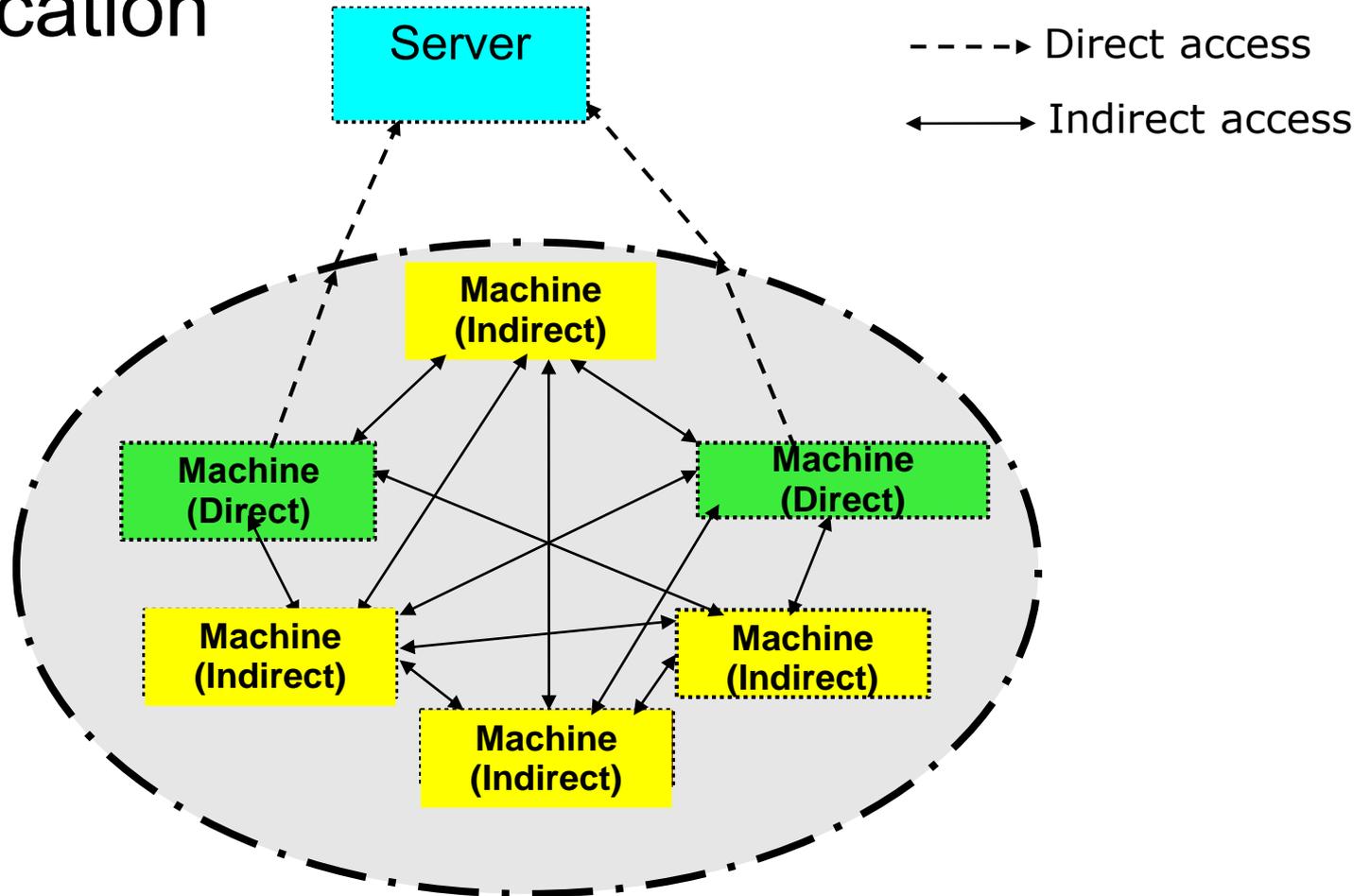
- Application
  - Exemple :
    - distributions de processus dans un réseau
  - Initialisation :
    - les données sont sur le serveur
  - Problématique :
    - le serveur plante lors s'un trop grand nombre de connections
  - Points communs avec les rats :
    - Produire une organisation :
      - Accès directs au serveur ET
      - Accès indirects
  - Objectif : auto-organiser les machines
    - Réduire le nombre de connections
    - Réduire le temps de traitement



# Modélisation

## Groupe de rats

- Application



# Modélisation

## Groupe de rats

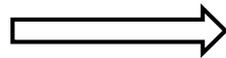
- Application
  - Transposition :
    - Les machines doivent s'auto-organiser pour réguler leurs accès aux données
      - Directement (eq. Plonger)
      - Indirectement (eq. Voler)
    - Environnement
      - Le serveur avec les données et les machines
      - Caractéristiques du réseau et des données
    - Agents = machines
      - Traitement des données
      - Peuvent accéder au serveur avec contrainte (priorités)
      - Peuvent échanger des données entre eux
    - Dynamique inchangée :
      - Seuils de réponse
      - Hiérarchie (rapport de dominance)

# Modélisation

## Groupe de rats

- Application
  - Transposition :

Cage, mangeoire



Réseau, serveur

- Taille de la nourriture
- Gain d'énergie
- Temps d'accès  
(longueur du couloir)

- Taille des données
- Nombre de connections max.
- Politique du serveur (qualité de service : liste de favoris ...)
- Bande passate
- ...

# Modélisation

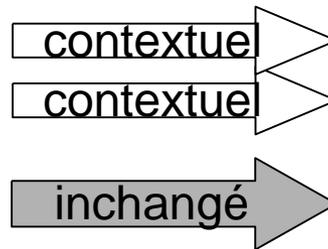
## Groupe de rats

- Application

- Transposition :

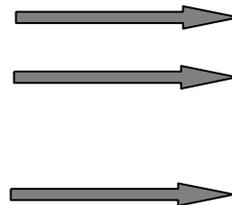
- Comportements

1. Manger
2. Plonger
3. Voler



- Paramètres

- Faim
- Anxiété (peur de l'eau)
- Force
- Possession de nourriture



- Comportements

1. Traiter les données
2. Accès direct
3. Accès indirect

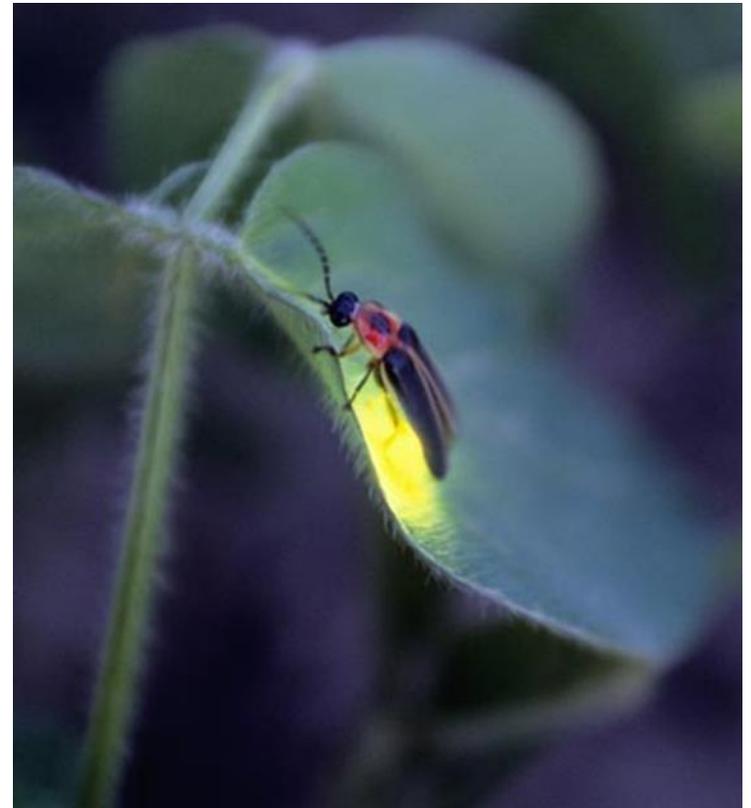
- Paramètres

- Espace pour stocker
- Difficulté d'accès au serveur
- Données stockées
- Puissance de traitement

# Modélisation

## Lucioles

- Inspiration biologique
  - Famille des insectes
  - Environnements tropicaux
  - Capables de voler
  - Produisent de la lumière « froide » chimiquement
  - Larves = vers luisants



# Modélisation

## Lucioles

- Inspiration biologique



# Modélisation

## Lucioles

- Inspiration biologique
  - Objectifs du comportement de clignotement
    - Attirer les congénères (forme de communication)
    - Attirer les proies
    - Systèmes d'alerte protecteur
  - Chaque motif de clignotement est unique
  - Certaines espèces peuvent mimer les motifs d'autres espèces (prédation)
  - L'intensité lumineuse est limitée

# Modélisation

## Lucioles

- Inspiration biologique
  - Objectifs du comportement de clignotement
    - Attirer les congénères (forme de communication)
    - Attirer les proies
    - Systèmes d'alerte protecteur
  - Chaque motif de clignotement est unique
  - Certaines espèces peuvent mimer les motifs d'autres espèces (prédation)
  - L'intensité lumineuse est limitée

# Modélisation

## Lucioles

- Proposition d'un modèle [Yang2009]
  - Hypothèses :
    - Pas de différenciation de genre
    - L'attraction dépend de la luminosité (inversement proportionnel à la distance)
    - La luminosité est déterminée par une fonction objectif

# Modélisation

## Lucioles

- Proposition d'un modèle
  - Comportements
    - Attraction
      - Intensité d'une luciole :
        - »  $I(I_0, d) = \frac{I_0}{d^2}$
        - »  $I_0$  est l'intensité à une distance nulle
        - »  $d$  est la distance de l'observateur à la source
      - Attraction avec atténuation (coefficient  $\gamma$ ) :
        - » Attractiveness  $(I_0, d, \gamma) = I_0 e^{-\gamma d^2}$

# Modélisation

## Lucioles

- Proposition d'un modèle
  - Comportements
    - Mouvements
      - Deux types : approcher une source ou exploration

$$\mathbf{x}^i = \mathbf{x}^i + \text{Attractiveness}(I_0, \gamma, \text{Distance}(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j)) \cdot (\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i) + \alpha \cdot (\text{Random}() - \frac{1}{2})$$

$$= \mathbf{x}^i + \text{Attractiveness}(I_0, \gamma, d_{i,j}) \cdot (\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i) + \alpha \cdot (\text{Random}() - \frac{1}{2})$$

$$= \mathbf{x}^i + I_0 e^{-\gamma d_{i,j}^2} \cdot (\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i) + \alpha \cdot (\text{Random}() - \frac{1}{2})$$

$$= \mathbf{x}^i + \beta \cdot (\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i) + \alpha \cdot (\text{Random}() - \frac{1}{2})$$

$$= (1 - \beta) \cdot \mathbf{x}^i + \beta \cdot \mathbf{x}^j + \alpha \cdot (\text{Random}() - \frac{1}{2}),$$

- Paramètres

»  $\alpha$  est le rayon maximum lors de l'exploration

»  $\beta$  est la valeur du déplacement vers une source

# Modélisation

## Lucioles

- Proposition d'un modèle
  - Cas particuliers
    - si  $\gamma = 0$ , alors  $\beta = I_0 e^{-0 d^2} = I_0$ 
      - Pas d'atténuation (air homogène et pur)
      - Pas de dispersion de la lumière
      - Toutes les lucioles peuvent se percevoir
      - Déséquilibre exploration-exploitation (100% exploitation)
    - si  $\gamma = \infty$ , alors  $\beta = I_0 e^{-\infty d^2} = 0$ 
      - Forte atténuation
      - Forte dispersion de la lumière
      - Les lucioles ne peuvent pas se percevoir
      - Déplacements aléatoires
      - Déséquilibre exploration-exploitation (100% exploration)

# Modélisation

## Lucioles

- Proposition d'un modèle
  - Pseudo-code

*Objective function  $f(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_d)^T$*   
*Generate initial population of fireflies  $\mathbf{x}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )*  
*Light intensity  $I_i$  at  $\mathbf{x}_i$  is determined by  $f(\mathbf{x}_i)$*   
*Define light absorption coefficient  $\gamma$*   
**while** ( $t < \text{MaxGeneration}$ )  
**for**  $i = 1 : n$  all  $n$  fireflies  
    **for**  $j = 1 : i$  all  $n$  fireflies  
        **if** ( $I_j > I_i$ ), Move firefly  $i$  towards  $j$  in  $d$ -dimension; **end if**  
        *Attractiveness varies with distance  $r$  via  $\exp[-\gamma r]$*   
        *Evaluate new solutions and update light intensity*  
    **end for**  $j$   
**end for**  $i$   
*Rank the fireflies and find the current best*  
**end while**  
*Postprocess results and visualization*

# Modélisation

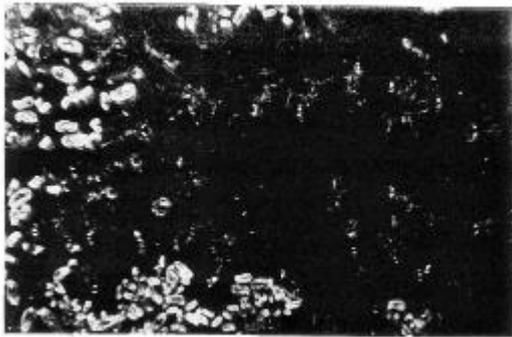
## Lucioles

- Applications
  - Traitement et compression d'images
  - Sélection de variables et détection de panne
  - Design de structures
  - Plannification
  - Web sémantique
  - Equilibre de phase (chimie)
  - Clustering

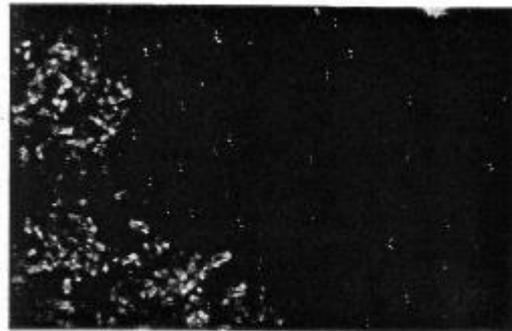
# Simulation

## Tri collectif

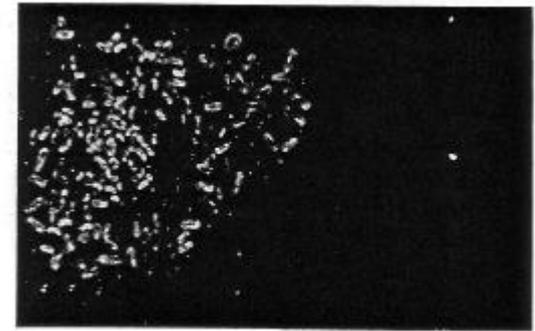
- Inspiration biologique [Deneubourg1991]
  - Comportement de tri (œufs, corps, nourriture) chez les fourmis



T = 1h



T = 1h40



T = 72h

# Simulation

## Tri collectif

- Modélisation [Deneubourg1991]

- Comportements :

- Règles (probabilités) :

- Prendre un objet :  $p(\text{pick up}) = \left( \frac{k^+}{k^+ + f} \right)^2$

- Déposer un objet :

- $p(\text{putdown}) = \left( \frac{f}{k^- + f} \right)^2$

- Mouvement : complètement aléatoires

# Simulation

## Tri collectif

- Modélisation [Deneubourg 1991]
  - Paramètres
    - $f$  : puissance de l'odeur d'un type de ressource dans le voisinage (= fréquence de la ressource)
    - $k^+$  : constante d'exploration
    - $k^-$  : constante d'exploitation

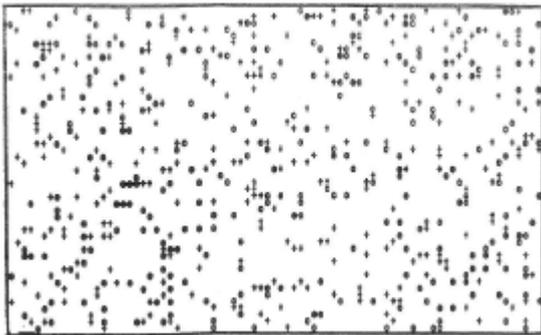
# Simulation

## Tri collectif

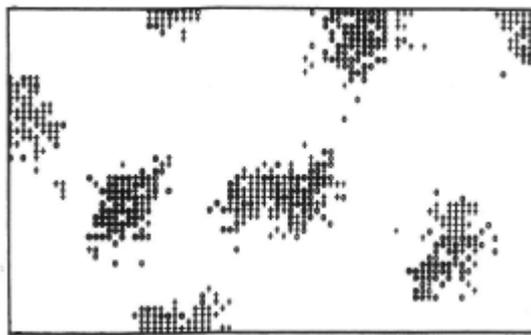
- Résultats [Deneubourg1991]

- Paramètres :

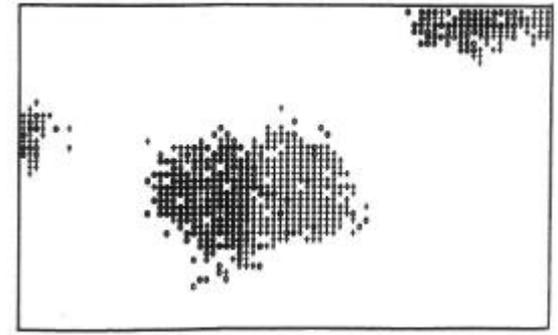
- 20 Agents
- 300 + 300 objets
- $k^+ = 0.1$ ,  $k^- = 0.3$ ,
- environnement =  $80 \times 49$



$t = 1$



$T = 225000$



$T = 1660000$

# Simulation

## Tri collectif

- Application : Micro-TP
  - Dans le langage, IDE de votre choix ;
  - Implémenter un environnement (grille, matrice, avec états discrets (agent, ressource1, ressource2))
  - Implémenter des agents et leurs comportements (prendre, déposer, se déplacer).
  - Initialiser l'environnement aléatoirement (ressources et agents)
  - Simuler le tri collectif

# Conclusions

- L'**intelligence collective** existe sous de **multiples formes** dans la nature
- L'inspiration biologique permet de trouver de **nouvelles formes d'algorithmes** distribués
- L'**auto-organisation** permet de résoudre des **problèmes complexes** avec des **règles simples**
- Mais la **transposition** n'est **pas** toujours **immédiate** (pas de méthode automatique)
- Le **paramétrage** (stabilité, robustesse) reste **critique**

# Bibliographie

- [Ali1997] Ali, S.; Zimmer, R. & Elstob, C. The question concerning emergence: Implication for Artificiality Computing Anticipatory Systems: CASYS, 1997
- [Bonabeau1999 ] Bonabeau, E.; Dorigo, M. & Theraulaz, G. Swarm intelligence: from natural to artificial systems Oxford university press, 1999
- [Bourjot2003] Bourjot, C.; Chevrier, V. & Thomas, V. A new swarm mechanism based on social spiders colonies: from web weaving to region detection Web Intelligence and Agent Systems: An International Journal, IOS Press, 2003, 1, 47-64
- [Camazine2002] Camazine, S.; Deneubourg, J.-L.; Franks, N.; Sneyd, J.; Theraulaz, G. & Bonabeau, E. Self-organization in biological systems Princeton University Press, 2002
- [Conway1970] Conway, J. The game of life Scientific American, 1970, 223, 4
- [Deneubourg1991] Deneubourg, J.-L.; Goss, S.; Franks, N.; Sendova-Franks, A.; Detrain, C. & Chrétien, L. The dynamics of collective sorting robot-like ants and ant-like robots Proceedings of the first international conference on simulation of adaptive behavior on From animals to animats, 1991, 356-363
- [DiMarzoSerugendo2006) Di Marzo-Serugendo, G.; Gleizes, M.-P. & Karageorgos, A. Self-organisation and emergence in MAS: An overview Informatica, 2006, 30
- [Dorigo1996] Dorigo, M.; Maniezzo, V. & Coloni, A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), IEEE, 1996, 26, 29-41
- [Foukia2003] Foukia, N. & Hassas, S. Managing computer networks security through self-organization: a complex system perspective International Workshop on Engineering Self-Organising Applications, 2003, 124-138

# Bibliographie

- [Goldstein1999] Goldstein, J. Emergence as a construct: History and issues *Emergence*, Taylor & Francis, 1999, 1, 49-72
- [Grasse1959] Grassé, P.-P. La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie: Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs *Insectes sociaux*, Springer, 1959, 6, 41-80
- [Holland1999] Holland, O. & Melhuish, C. Stigmergy, self-organization, and sorting in collective robotics *Artificial life*, MIT Press, 1999, 5, 173-202
- [Palut2004] Palut, Y. Propriétés d'auto-organisation dans les déplacements des joueurs en sports duels *Toulouse 3*, 2004
- [Parunak1999] Parunak, H. V. D. Industrial and practical applications of DAI *Multiagent Systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*, MIT Press Cambridge, MA, 1999, 337-421
- [VandeVijver1997] Van de Vijver, G. Emergence et explication *Intellectica*, 1997, 25, 7-23
- [Werfel2014] Werfel, J.; Petersen, K. & Nagpal, R. Designing collective behavior in a termite-inspired robot construction team *Science, American Association for the Advancement of Science*, 2014, 343, 754-758
- [Yang2009] Yang, X.-S. Firefly algorithms for multimodal optimization *International Symposium on Stochastic Algorithms*, 2009, 169-178