

---

# PROCESSUS COGNITIFS ET DIFFÉRENCIATION SOCIALE DE GROUPES DE RATS

## INTÉRÊT DE LA MODÉLISATION MULTI-AGENT

Marie-Caroline COTEL<sup>1</sup>, Vincent THOMAS<sup>2</sup>, Vincent CHEVRIER<sup>2</sup>,  
Christine BOURJOT<sup>2</sup>, Henri SCHROEDER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Neurosciences Comportementales,

<sup>2</sup>LORIA — équipe de recherche MAIA,

Faculté des Sciences et Techniques — Université Henri Poincaré

BP 239 — 54506 Vandœuvre lès Nancy Cedex

Mél : henri.schroeder@sbiol.uhp-nancy.fr

---

### Résumé

*La situation de difficulté d'accès à la nourriture est un modèle expérimental qui consiste à contraindre des rats à nager jusqu'à une mangeoire et à rapporter la nourriture obtenue dans la cage pour la consommer. L'apparition de la contrainte aquatique va provoquer, au sein d'un groupe de 6 rats, l'émergence d'une différenciation sociale entre des rats Transporteurs qui plongent et ramènent ainsi la nourriture, et des Non-Transporteurs qui ne plongent jamais et se nourrissent en la volant aux premiers. Ce phénomène est stable, reproductible et correspond à un processus auto-organisé impliquant des opérations cognitives d'ordre social. De manière à confirmer cette hypothèse, une modélisation multi-agent (Hamelin) simulant cette situation expérimentale et faisant interagir plusieurs entités non cognitives a été réalisée. Hamelin simule efficacement la différenciation sociale, mais fait apparaître des inversions spontanées des statuts sociaux, phénomène qui n'est jamais observé in vivo. Cette discordance entre la réalité biologique et la modélisation multi-agent suggère un rôle pour des processus socio-cognitifs qui contribueraient in vivo à la stabilité des statuts sociaux.*

*Mots-clés : rat, différenciation sociale, cognition, système multi-agent, auto-organisation.*

### Abstract

COGNITIVE PROCESSES AND SOCIAL DIFFERENTIATION IN GROUPS OF RATS

*The "diving-for-food" situation is an experimental model in which rats are required to swim to a feeder and to bring the obtained food back to the cage before eating it. The progressive appearance of this aquatic constraint induced, in a group of six rats, the emergence of a social differentiation between Carrier rats, who dove and so brought back food, and non-Carrier rates, who never dove and fed themselves by stealing food from the Carrier rats. This phenomenon is stable and reproducible, and corresponds to a self-organized process involving social cognitive operations. To confirm this hypothesis, a multi-agent model (Hamelin) simulating this experimental situation, based on interactions between non-cognitive entities, was developed. Hamelin effectively simulates the social differentiation, but is also characterized by spontaneous inversions of social status, a phenomenon that is never observed in vivo. This disparity between the biological reality and the multi-agent model suggests a role for sociocognitive processes that may contribute in vivo to the stability of social status differentiation.*

*Keywords: rats, social differentiation, cognition, multi-agent system, self-organization.*

## Resumen

PROCESOS COGNITIVOS Y DIFERENCIACIÓN SOCIAL EN GRUPOS DE RATAS: EL INTERÉS DE UN MODELO MULTIAGENTES

*La situación de dificultad de acceso a la comida es un modelo experimental que consiste en obligar ratas a nadar hasta un comedero y a traer la comida obtenida de vuelta a la jaula para comerla. La aparición de la obligación de nadar provoca, dentro de un grupo de 6 ratas, la emergencia de una diferenciación social entre ratas Transportadores que se lanzan al agua y así traen la comida de vuelta, y los No-Transportadores que nunca van al agua y se sustentan robando la comida a los primeros. Este fenómeno es estable, reproductible y corresponde a un proceso auto organizado que implica operaciones cognitivas del ámbito social. Con el afán de confirmar esta hipótesis, se realizó un modelo multiagentes (Hamelin) simulando esta situación experimental y haciendo interactuar varias entidades no cognitivas. Hamelin simula eficazmente la diferenciación social pero hace aparecer inversiones espontáneas de los estatutos sociales, un fenómeno jamás observado in vivo. Esta discordancia entre la realidad biológica y el modelo multiagentes sugiere la existencia de un papel para los procesos sociocognitivos que contribuirían in vivo a la estabilidad de los estatutos sociales.*

*Palabras-claves: rata, diferenciación social, cognición, sistema multiagentes, auto organización.*

## Resumo

PROCESSOS COGNITIVOS E DIFERENCIAÇÃO SOCIAL DE GRUPOS DE RATOS: INTERESSE DO MODELAMENTO MULTI-AGENTE

*A situação de dificuldade de acesso à comida é um modelo experimental que consiste em forçar ratos a nadar até um comedouro e trazer a comida obtida até a gaiola para consumi-la. O aparecimento da restrição aquática provocará, num grupo de seis ratos, a emergência de uma diferenciação social entre ratos Transportadores, que mergulham e trazem dessa forma a comida, e ratos Não-Transportadores, que nunca mergulham e se alimentam roubando a comida dos primeiros. Esse fenômeno é estável, reprodutível e corresponde a um processo auto-organizado que implica em operações cognitivas de ordem social. De forma a testar essa hipótese, um modelamento multi-agente (Hamelin) simulando essa situação experimental e fazendo interagir diversos agentes não-cognitivos foi concebido. Hamelin simula eficazmente a diferenciação social, mas faz aparecer inversões espontâneas dos estatutos sociais, fenômeno que nunca é observado in vivo. Essa discordância entre a realidade biológica e o modelamento multi-agente sugere um papel para processos socio-cognitivos que contribuiriam in vivo para a estabilidade dos estatutos sociais.*

*Palavras-chave: rato, diferenciação social, cognição, sistema, multi-agente, auto-organização.*

## Riassunto

PROCESSI COGNITIVI E DIFFERENZIAZIONE SOCIALE NEI GRUPPI DI RATTI

Il lavoro presentato è basato su un modello sperimentale chiamato "diving-for-food" e che consiste nel fatto di forzare ratti a nuotare fino ad una mangiatoia ed a riportare con sé gli

alimenti ottenuti nella gabbia per consumarla. L'ostacolo acquatico causa, nell'ambito di un gruppo di 6 ratti, l'emergenza di una differenziazione sociale tra ratti detti Trasportatori che immergono e riportano i cibi, e ratti Non trasportatori che non immergono mai e si nutrono rubando i primi. Questo fenomeno appare stabile, riproducibile e corrisponde ad un processo auto-organizzato che implica operazioni cognitive d'ordine sociale. Per confermare tale ipotesi, un modello multi-agente (Hamelin) capace di simulare questa situazione sperimentale è stata realizzata. Hamelin è anche capace di simulare con efficienza la differenziazione sociale ma fa apparire inversioni spontanee degli statuti sociali, fenomeno che non è mai osservato *in vivo*. Questa dissonanza tra la realtà biologica e la costruzione di modelli multi-agente suggerisce un ruolo per processi socio-cognitivi che contribuirebbero *in vivo* alla stabilità degli statuti sociali.

Parole chiave: ratti, differenziazione sociale, cognizione, sistema multi-agente, auto-organizzazione.

## **1. Introduction**

Dans la nature, de nombreuses formes d'organisation ont été observées au sein de sociétés animales en réponse à une contrainte environnementale. La majorité des sociétés de Mammifères a évolué en développant un système de comportements sociaux complexes et flexibles. Cette structure requiert l'implication d'une forme de cognition dite sociale permettant à chacun de construire des représentations des relations qui l'unissent aux autres membres de son groupe et de les utiliser pour exprimer et adapter son propre comportement. La situation de difficulté d'accès à la nourriture (« *diving-for-food* » *model*) est un modèle expérimental qui permet d'étudier l'implication de processus cognitifs d'ordre social dans la structuration de groupes de rats confrontés à un problème posé par l'environnement pour l'obtention de nourriture. La modélisation multi-agent de cette situation constitue une des voies de recherche permettant d'apporter des réponses à cette question. C'est pourquoi nous avons développé Hamelin, un simulateur dont le principe repose sur le couplage de deux modèles connus, le premier repose sur des réponses à seuil, le deuxième est représenté et géré par des hiérarchies de dominance. Nous ferons tout d'abord l'analyse du phénomène biologique ainsi que des questions qu'il engendre, puis nous ferons le bilan des réponses que permet d'apporter le modèle de simulation dans l'état actuel de son développement. Enfin, nous confronterons les deux approches avec les perspectives d'amélioration qui leur sont associées.

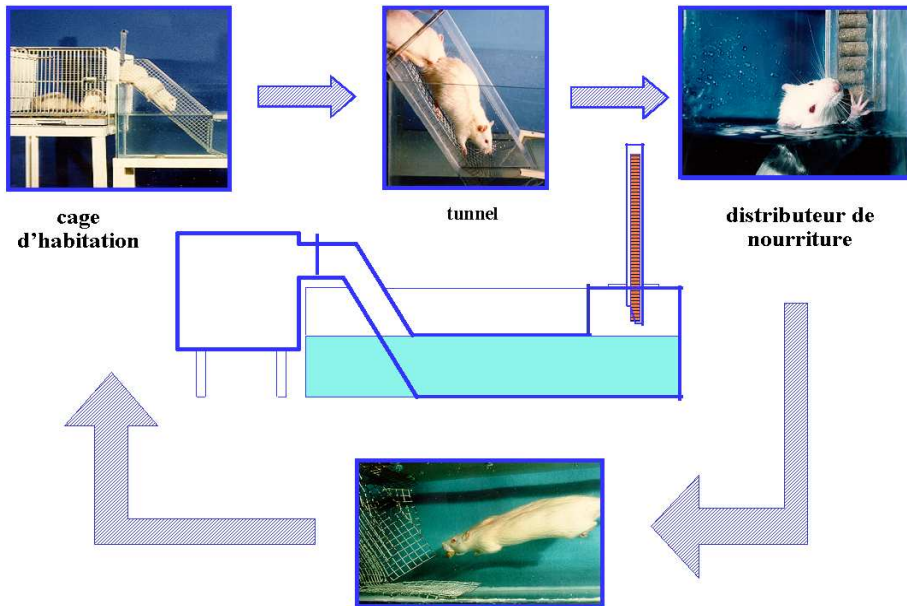
## **2. La situation de difficulté d'accès à la nourriture**

### **2.1. Description du protocole expérimental**

Le modèle de difficulté d'accès à la nourriture représente sans aucun doute une situation expérimentale d'étude du comportement social du rat qui est originale par rapport aux modèles habituellement utilisés du fait de l'effectif du groupe ( $n=6$ ) et du très grand nombre d'interactions possibles entre les individus (Colin et Desor, 1986 ; Krafft *et al.*, 1994). Le principe du test est d'obliger le rat à quitter la cage d'habitation et à nager en apnée le long d'un aquarium jusqu'à une mangeoire où il ne pourra obtenir qu'une croquette de nourriture à la fois. Le rat ne peut pas manger la nourriture sur place et est contraint, pour s'alimenter, de rejoindre la cage d'habitation. Dans ces conditions, l'immersion progressive de l'unique voie d'accès à

la mangeoire va induire au sein d'un groupe de 6 rats une différenciation comportementale entre des animaux Transporteurs (T) qui plongent et ramènent la nourriture et des rats Non-Transporteurs (NT) qui ne plongent jamais et obtiennent leur nourriture en la volant aux T (Colin et Desor, 1986 ; Krafft *et al.*, 1994 ; Schroeder et Desor, 2005 ; Schroeder *et al.*, 1998, 2000). Ce phénomène de différenciation sociale permet donc au groupe de s'adapter face à l'apparition d'une nouvelle contrainte dans son environnement alors que seuls certains membres du groupe ont directement accès à la source de nourriture.

Le dispositif expérimental (voir figure 1) est constitué d'une cage d'habitation grillagée reliée par un tunnel à un aquarium fermé. Une porte coulissante commande l'accès à l'aquarium. À son extrémité se trouve un distributeur unitaire de croquettes.



**Figure 1** – Dispositif expérimental de la situation de difficulté d'accès à la nourriture (Schroeder et Desor, 2005).

Il est important de noter que le tunnel joue un rôle crucial dans la structuration des relations au sein du groupe. En effet, c'est un lieu privilégié pour des échanges d'informations. Le fond du tunnel est grillagé, ce qui permet aux individus de toutes les catégories (plongeurs ou non) de se retrouver au même endroit. Cette disposition permet également aux individus d'interagir sous l'eau en « s'arrimant » au tunnel avec les pattes arrière.

Le protocole comporte 3 phases. La familiarisation, qui permet aux animaux de s'habituer au nouvel environnement et de localiser la nourriture, se déroule dans le dispositif à sec. La différenciation, pendant laquelle l'aquarium est rempli progressivement jusqu'à immersion complète, permet de stabiliser les statuts. L'expérimentation, au cours de laquelle les animaux sont filmés pendant 3 heures, permet d'observer et quantifier les différentes variables comportementales. En fin de

séance, les individus d'un même groupe sont replacés dans une cage de vie où ils n'ont accès qu'à de l'eau (la raison en est qu'ainsi leur faim augmente, ce qui crée une motivation pour apprendre). Le nombre d'individus est fixé à 6 car c'est à partir de cet effectif que l'on obtient 100 % de groupes différenciés.

## **2.2. Observations comportementales**

L'analyse statistique en *cluster* révèle 3 statuts sociaux différents, le statut T pouvant être subdivisé en deux sous-types, Autonomes (TA) ou Ravitailleurs (TR) (Colin et Desor, 1986 ; Krafft *et al.*, 1994 ; Schroeder et Desor, 2005). Les TA sont définis comme des individus qui plongent, ramènent une croquette et la consomment dans la cage en repoussant efficacement les attaques des congénères, alors que les TR se font rapidement voler la nourriture par un NT. Dans l'état actuel de nos connaissances, il semble que la différenciation sociale soit le fruit de comportements modulés par le niveau individuel d'anxiété exprimé face à deux types de contraintes (Schroeder *et al.*, 1998, 2000) : l'eau et les congénères. Ainsi, les TA sont des individus qui surmontent les deux types de contraintes ; les TR ne surmontant que la contrainte liée à l'eau et les NT que celle relative au contexte social.

Le phénomène de différenciation est observé de manière systématique et dans des proportions constantes (la proportion de T est toujours de l'ordre de 50 %). Elle ne s'établit pas instantanément, les individus pouvant occuper différents statuts pendant la mise en eau avant d'en acquérir un de manière stable, exprimé en immersion complète. Il a été montré qu'en changeant la composition du groupe (par exemple, en mettant ensemble 6 rats NT ou 6 animaux T) il est possible de faire émerger une nouvelle répartition des statuts sociaux. Ce résultat suggère que la différenciation sociale correspond à un équilibre dynamique dont les paramètres sont évalués en permanence par chacun des membres du groupe de manière à adapter au mieux l'organisation sociale aux contraintes de l'environnement.

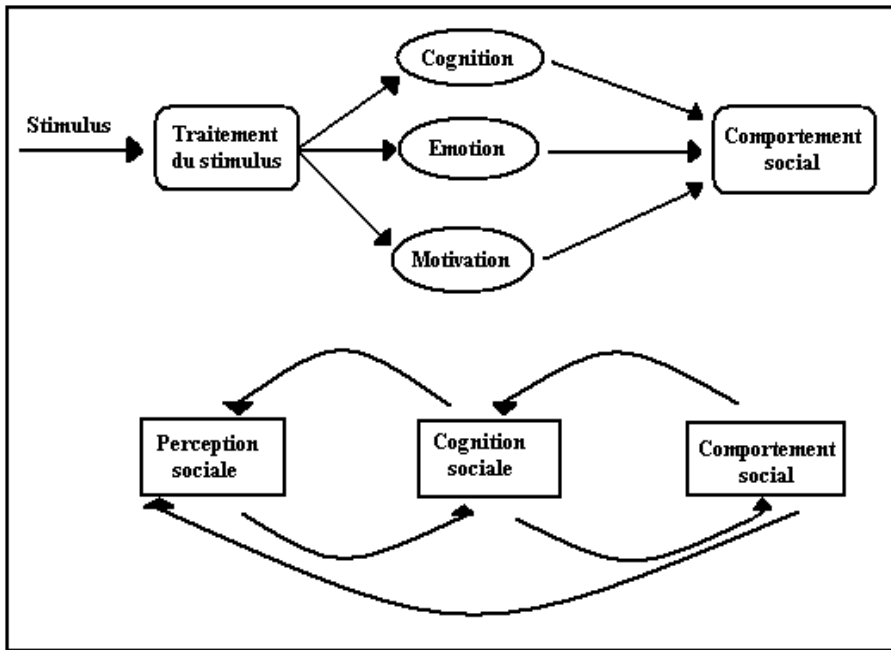
De telles observations soulèvent des questions concernant les mécanismes qui régissent la mise en place d'une structure aussi organisée. L'un de ces moteurs est sans doute le plus basique : la survie du groupe. En effet, sans « volontaires » pour ramener la nourriture, la fratrie est vouée à disparaître. Un moteur complémentaire, ou plutôt le médiateur de cette structuration, pourrait être désigné sous le terme de « cognition sociale ».

## **2.3. Définition de la cognition sociale**

Beaucoup d'espèces actuelles vivent en sociétés, ce phénomène reflète l'avantage évolutif que confère la vie en groupe. Cependant, cette situation donne naissance à des facteurs opposés qui façonnent les comportements sociaux : d'un côté le groupe offre de meilleures chances de survie ; de l'autre côté, il peut générer des compétitions inter-individuelles en son sein. La conciliation de ces facteurs s'est faite dans 2 voies évolutives distinctes :

- les comportements sociaux avec des individus spécialisés regroupés en castes tels qu'on les rencontre dans les sociétés d'insectes essentiellement,
- les comportements sociaux extrêmement complexes et flexibles tels qu'on les observe dans la majorité des sociétés de Mammifères.

Cette deuxième solution requiert de la cognition sociale, c'est-à-dire une capacité à construire des représentations des relations qui unissent les membres du groupe et à utiliser ces représentations de manière flexible pour parvenir à un comportement social (Adolphs, 2001 ; Rilling *et al.*, 2002 ; Takahashi, 2005). Le cerveau confère un avantage non négligeable pour la survie en permettant aux organismes d'extraire des schémas complexes qui aident à prédire des changements d'environnement (voir figure 2). Or, l'environnement social est généralement plus complexe que l'environnement physique, moins prédictible et plus réactif aux comportements de ses composantes. L'idée communément admise aujourd'hui est que ce sont ces facteurs, et spécialement la réciprocité inhérente aux comportements, qui ont dirigé l'évolution des capacités cognitives. La cognition sociale contrôle à la fois les comportements automatiques et volontaires en prenant part à divers processus qui modulent la réponse comportementale : la mémoire, la prise de décision, l'attention, la motivation et les émotions sont les composantes qui se trouvent recrutées pour produire un comportement en adéquation avec les stimuli socialement pertinents que perçoit l'organisme.



**Figure 2** — Schéma récapitulatif des éléments définissant la cognition sociale chez les Mammifères (Adolphs, 2001).

Dans le contexte expérimental qui nous intéresse, les arguments qui permettent de qualifier le Rat d'espèce cognitive sont multiples :

- C'est un mammifère doté d'une architecture cérébrale complexe qui lui permet de réaliser des tâches cognitives diverses (apprentissage et localisation spatiale).

- Il dispose d'un système de communication sophistiqué basé sur l'utilisation de signaux sensoriels qui lui permettent d'identifier ses congénères, de trouver des sources de nourriture et d'alerter le groupe de la présence de prédateurs.
- Une observation plus poussée des individus en situation révèle la formation de « couples » composés d'un T qui ramène des croquettes exclusivement pour un NT particulier. On observe également que ce dernier « incite » son congénère dans le tunnel en le poussant vers l'aquarium. Une étude non publiée réalisée dans le laboratoire de Neurosciences Comportementales a mis en évidence des *patterns* de réponses EEG spécifiques plus fortes lorsqu'on présente l'odeur du transporteur à son non-transporteur associé, en comparaison avec les autres membres du groupe expérimental.

Ces quelques arguments nous permettent donc de penser que le rat est une espèce douée d'une forme relativement élaborée de cognition sociale, ce qui nous fournit un élément pour dire que la différenciation sociale observée dans ce modèle expérimental pourrait être comparable à l'élaboration d'une structure sociale chez l'Homme.

### **3. HAMELIN : système multi-agent de simulation**

#### **3.1. Description**

L'intérêt de la modélisation multi-agent dans la compréhension des mécanismes sous-jacents au phénomène de différenciation sociale est qu'elle offre un cadre conceptuel permettant la représentation et la simulation de systèmes complexes faisant intervenir différentes entités en interaction entre elles et avec leur environnement, les caractéristiques globales du système ne découlant pas directement des propriétés des entités qui le composent. Les informaticiens de l'équipe MAIA du LORIA à Nancy ont donc développé un simulateur multi-agent pour lequel est postulé le fait qu'il est possible d'obtenir le même type d'organisation que chez les rats en n'attribuant aucune cognition aux agents (Thomas *et al.*, 2002, 2004). Cette hypothèse est d'un grand intérêt pour la biologie puisqu'un résultat positif invaliderait l'idée selon laquelle la cognition sociale est une aptitude indispensable à la mise en place d'une organisation au sein des groupes de rats. Ce simulateur, dénommé Hamelin, fonctionne sur la base de deux modèles connus : les réponses à seuil (Theraulaz *et al.*, 1998) et les hiérarchies de dominance (Hemelrijk, 1996).

##### **3.1.1. Éléments constitutifs du simulateur**

**L'environnement** — Il doit permettre l'apparition de la spécialisation tout en restant très simple, c'est pourquoi il est défini comme abstrait, sans topologie et caractérisé uniquement par les croquettes et la longueur de l'aquarium. Les croquettes sont définies par leur coefficient de fourniture énergétique,  $\tau\eta$ , où  $\tau$  est le temps nécessaire à la consommation d'une croquette entière, et  $\eta$  la quantité d'énergie absorbée par unité de temps lors de la consommation de la croquette. Quant à la longueur de l'aquarium, elle ne sert qu'à calculer un rapport exprimant la contrainte environnementale  $n$  ( $n = \tau /$  temps nécessaire pour ramener une croquette).

**Les agents** — Ils sont caractérisés par un état interne composé de 3 variables indépendantes (principe de parcimonie) : (a) la faim,  $h$ , qui constitue l'élément de

motivation de l'agent, est incrémentée si l'agent n'ingère pas de nourriture, (b) la force de l'agent,  $f$ , qui définit son aptitude à gagner un combat avec un autre agent, et (c) l'anxiété vis-à-vis de l'eau,  $\theta$ , qui définit la propension de l'agent à plonger. Une quatrième variable, dénommée *Food*, représente la quantité de nourriture possédée par un agent. Bien qu'externe à l'agent, cette variable le caractérise par rapport aux autres dans le sens où elle identifie cet agent comme étant en possession de nourriture. Sur la base de cette variable, un agent peut ainsi percevoir la présence de croquettes et identifier leur possesseur.

**Les items comportementaux** — Chaque agent peut effectuer 3 actions : plonger, voler ou consommer la nourriture. Les deux premières sont déclenchées de manière stochastique, la décision dépendant d'une part, d'une probabilité calculée en fonction de l'état interne de l'agent, et d'autre part, de la possession ou non d'une croquette. Rappelons que les agents savent seulement s'ils possèdent une croquette et, si ce n'est pas le cas, quel agent en a une. Une fois le comportement déclenché, les coefficients de renforcement modifient l'état interne des agents, leur permettant d'apprendre et de moduler leurs comportements futurs en fonction de leur expérience.

### 3.1.2. Modélisation des items comportementaux

**Le plongeon** — Il est envisagé dès que l'agent ne possède plus de croquette. La loi de probabilité le gouvernant est une réponse à seuil qui tient compte des niveaux d'anxiété  $\theta$  et de faim  $h$  selon l'équation suivante :

$$P_{\text{Plongeon}} = \frac{h^2}{h^2 + \theta^2}$$

Une fois la décision prise, le rat plonge et ramène une croquette, il est alors en possession d'une ressource, ce qui s'exprime comme suit :

$$\text{Food} \leftarrow \tau$$

On applique un coefficient de renforcement de l'anxiété vis-à-vis de l'eau de telle sorte que celle-ci soit diminuée :

$$\theta \leftarrow \theta \cdot \delta_\theta$$

Avec  $\delta_\theta \in [0;1]$ , un paramètre global de renforcement du coefficient d'anxiété.

Ainsi, l'agent apprend à réagir plus rapidement pour un niveau de faim  $h$  identique. Ce coefficient est responsable de l'adaptation individuelle et de la mise en place de la distribution des tâches dans le groupe. Les agents qui ne plongent pas voient leur niveau d'anxiété augmenter selon le principe suivant :

$$\theta \leftarrow \theta + (1000 - \theta) \cdot \delta_f$$

Avec  $\delta_f \in [0;1]$ , un paramètre global d'augmentation du coefficient d'anxiété (1000 étant le degré d'anxiété le plus élevé possible). Ainsi, plus l'agent a faim, plus il sera enclin à plonger, et plus il est anxieux, plus il y sera réticent.

**Le vol** — Il se déclenche lorsqu'un agent *Agr* ne possède pas de croquette et qu'il perçoit la présence d'une ressource au niveau d'un autre agent *Vic*. Cette configuration déclenche automatiquement l'attaque de l'agent *Agr* en direction de l'agent *Vic*. Le résultat du conflit est déterminé de manière stochastique en tenant compte de la force  $f$  des deux protagonistes. La probabilité qu'a *Agr* de voler la croquette à *Vic* est calculée selon un modèle de hiérarchie de dominance, selon l'équation suivante :

$$P_{Gagne_{Agr}} = \frac{f_{Agr}}{f_{Agr} + f_{Vic}}$$

Si l'action réussit, l'agresseur récupère la quantité de nourriture que la victime n'a pas encore mangée :

$$Food_{Agr} \leftarrow Food_{Vic}, Food_{Vic} \leftarrow 0$$

Si c'est le cas alternatif qui se produit, rien ne se passe au niveau des flux de ressource.

Les forces des deux agents inter agissants sont recalculées selon les règles de dominance (Hemelrijk, 1996) :

$$f_{Agr} = f_{Agr} + \left\{ Gagne_{Agr} \frac{f_{Agr}}{f_{Agr} + f_{Vic}} \right\} \cdot \delta_s$$

$$f_{Vic} = f_{Vic} - \left\{ Gagne_{Agr} \frac{f_{Agr}}{f_{Agr} + f_{Vic}} \right\} \cdot \delta_s$$

Avec  $\delta_s \in [0;1]$ , un paramètre global de renforcement de la hiérarchie de dominance.  $Gagne_{Agr}$  est un booléen qui prend 1 comme valeur si l'initiateur de l'attaque gagne et 0 dans le cas contraire. Le vainqueur du combat voit donc sa force augmenter alors que celle du vaincu diminue d'un coefficient de renforcement.

**La consommation de nourriture** — elle est déclenchée automatiquement dès qu'un agent possède une croquette. Elle a pour conséquence de faire diminuer la faim de l'individu et la taille de la ressource :

$$h \leftarrow h - \eta, Food \leftarrow Food - 1$$

Dans le cas où l'agent ne possède pas de croquette, sa faim augmente :

$$h \leftarrow h + 1$$

### 3.2. Déroulement de la simulation

La simulation consiste à faire évoluer le système de cycle en cycle, un cycle correspondant au temps nécessaire pour transporter une croquette du distributeur à

la cage. Le schéma général d'un cycle de simulation est défini comme suit, les valeurs des paramètres du système étant fixées avant le démarrage de la simulation :

- 1) début de la simulation ;
- 2) considérer successivement l'item Plongeon de tous les agents et décider de celui qui va aller au distributeur ;
- 3) deux groupes d'agents sont créés : les possesseurs de nourriture et les non-possesseurs ;
- 4) sélectionner aléatoirement un agent de chaque groupe et les confronter selon les lois de hiérarchies de dominance, répéter jusqu'à ce que le groupe possesseurs soit vide ;
- 5) tester chaque agent pour l'item relatif à la consommation de nourriture ;
- 6) cycle suivant : aller à l'étape 2.

### 3.3. Résultats

Le résultat le plus remarquable est que ce système aboutit à une différenciation du groupe similaire aux observations biologiques. En effet, sur un total de 100 simulations à 6 agents réalisées avec les mêmes conditions initiales, près de 60 % des simulations font apparaître une différenciation au niveau du groupe entre 3 agents Transporteurs et 3 Non-Transporteurs, le reste ayant abouti à des groupes de 2 T et 4 NT. Dans tous les cas, le niveau de faim de tous les agents est resté très proche de 0. Au niveau des caractéristiques individuelles, les T présentent des niveaux d'anxiété  $\theta$  et de force  $f$  faibles, le contraire étant observé chez les NT.

Par ailleurs, des simulations plus poussées ont montré qu'il était possible de redifférencier un groupe constitué d'agents de même statut. Par contre, la différenciation observée avec le simulateur n'est pas stable dans le temps puisque des inversions de statut pour un agent donné ont pu être mises en évidence, phénomène qui n'est jamais observé dans le modèle biologique. Pour avoir une présentation plus détaillée des résultats, le lecteur est invité à consulter les références Thomas *et al.* (2002) et Thomas *et al.* (2004).

## 4. Discussion-Conclusion

Les résultats obtenus avec le modèle Hamelin montrent que, dans l'état actuel de son développement, il présente les principales caractéristiques de la réalité biologique (émergence d'une différenciation sociale entre des T et des NT et dans des proportions identiques, néodifférenciation de groupes constitués de 6 agents de même statut), ceci en l'absence du facteur « cognition sociale ». Ce système est caractérisé au niveau individuel par un besoin à satisfaire (la faim) et par une difficulté d'accès à la ressource qui permet de satisfaire ce besoin (plonger pour obtenir de la nourriture et la manger). Par rapport à son propre besoin, chaque agent peut accéder à la ressource de deux manières : (a) plonger et prendre une croquette de nourriture dans la mangeoire, ou (b) voler la nourriture à un agent qui en possède. Initialement, les agents sont indifférenciés quant au mode d'accès à la ressource. L'apparition de la contrainte environnementale entre le groupe et la source de nourriture (l'eau) induit une dynamique collective qui conduit à l'émergence d'une organisation de ces agents : pour obtenir la nourriture, certains vont se spécialiser

dans le plongeon et le transport de nourriture (les agents T) alors que les autres obtiendront leur nourriture en interagissant avec les premiers (les agents NT). Le processus qui conduit à la spécialisation est construit par couplage entre deux mécanismes de renforcement : plus un agent accède à la ressource par l'un de ces deux moyens, plus il a tendance à utiliser (et à réussir avec) ce moyen. Le premier de ces mécanismes de renforcement est celui des réponses à seuil. Il favorise l'utilisation de l'accès direct à la source de nourriture et renforce la décision de plonger à chaque fois que l'agent réussit à obtenir de la nourriture. Le second mécanisme construit une hiérarchie de dominance entre deux agents et renforce les différences interindividuelles quant à l'obtention de la nourriture par le vol. Le couplage de ces deux mécanismes fait qu'ils s'influencent mutuellement et conduisent à l'apparition de profils spécialisés.

Si les résultats *in silico* montrent que les agents peuvent exprimer les deux profils observés *in vivo*, le simulateur Hamelin présente actuellement un certain nombre de limites :

- Plusieurs milliers d'itérations sont nécessaires dans le simulateur pour parvenir à ce résultat alors qu'environ 600 cycles (40 croquettes/ jour/ groupe pendant 15 jours) suffisent dans le modèle biologique, ce qui nous pousse à émettre l'hypothèse de l'existence d'un « catalyseur » au sein de ce dernier.
- L'inversion de statut pour un agent en cours d'expérience : ce phénomène n'est jamais observé *in vivo*. Ce problème pourrait être lié à l'absence de cognition sociale dans le modèle virtuel. En effet, dans la réalité biologique, chaque individu acquiert un statut et le conserve du fait des interactions sociales qu'il a avec ses congénères, ce que semblent prouver les observations telles que l'existence de « couples » T/NT sur la base d'une reconnaissance olfactive et l'expression de comportements d'incitation de la part d'un NT en direction d'un T au niveau du tunnel. La pression sociale exercée par le groupe sur un individu le maintiendrait alors dans le statut qu'il a acquis. Les interactions ne sont ainsi en rien des actes faits au hasard mais semblent dus au fait que chaque animal est capable de construire une représentation globale de son groupe et de situer précisément le rôle de chacun au sein de celui-ci. Des phénomènes tels que les comportements d'incitation ne sont actuellement pas modélisés par Hamelin.
- Le principe de tirage au sort des agents entrant en conflit pour la nourriture dans chacun des deux groupes d'agents (T et NT) n'a pas de fondement biologique. Les résultats de la simulation montrent que ce principe mène à l'apparition de situations aberrantes aboutissant à des réappropriations successives de la même croquette, phénomène qui n'est jamais observé dans le modèle *in vivo*. L'observation comportementale a ainsi montré que le rat qui obtient la nourriture en la volant oriente son comportement vers un possesseur de nourriture en ayant une représentation précise des capacités de défense de son congénère (Krafft *et al.*, 1994). C'est ainsi que l'on peut observer l'apparition au sein de groupes de rats de « couples préférentiels » en terme d'échanges de nourriture constitués d'un T et d'un NT.
- L'émergence des profils TA et TR tels que l'on peut les caractériser dans le modèle biologique n'a pour l'instant jamais été étudiée dans le cadre de la simulation. Dans ce cas, se posera la question du rôle joué par l'anxiété d'un individu vis-à-vis de la contrainte sociale (la présence des autres agents) dans l'apparition des profils TA et TR.

La prise en compte du facteur cognition sociale dans la simulation nous semble être un élément pertinent pour répondre globalement à chacune de ces limites même s'il est possible d'envisager des solutions au cas par cas. De plus, ces solutions ponctuelles, pour certaines d'entre elles, n'ont pas été testées et on ne connaît rien de leur impact éventuel sur le fonctionnement global du système.

En conclusion, le modèle Hamelin permet de simuler avec efficacité la différenciation sociale telle qu'elle est observée dans des groupes de rats confrontés à la situation de difficulté d'accès à la nourriture. Il constitue ainsi un outil précieux pour mieux appréhender les mécanismes sous-jacents à l'émergence de cette structure et en particulier, le rôle de la cognition sociale. Si Hamelin permet de reproduire ce phénomène en l'absence de cette forme de cognition, l'apparition de phénomènes qui ne sont jamais observés *in vivo* (inversion spontanée des statuts sociaux en cours d'expérience) suggère qu'elle constitue une limite importante à l'émergence et à la persistance de cette organisation sociale permettant à l'ensemble du groupe de s'adapter face à la contrainte environnementale. Compte-tenu de cette limite, une perspective importante de ce travail est l'introduction de facteurs explicites de nature cognitive au niveau de la modélisation des agents dans Hamelin de manière à ce que chaque agent puisse avoir une représentation explicite des autres membres du groupe et exprimer ainsi un comportement social au meilleur bénéfice. Ce travail souligne également l'intérêt du recours à la modélisation multi-agent pour valider ou non des hypothèses relatives à une meilleure compréhension des phénomènes collectifs.

## Références bibliographiques

Adolphs R. (2001). The neurobiology of social cognition. *Current Opinion in Neurobiology*. 11(2), 231-239.

Colin C., Desor D. (1986). Différenciations comportementales dans des groupes de rats soumis à une difficulté d'accès à la nourriture. *Behavioural Processes*. 13(1-2), 85-100.

Hemelrijk C. K. (1996). Dominance interactions, spatial dynamics and emergent reciprocity in a virtual world. Proceedings of the *4th International conference on simulation of adaptive behavior*. Cambridge, USA. 545-552.

Krafft B., Colin C., Peignot P. (1994). Diving-for-food: A new model to assess social roles in a group of laboratory rats. *Ethology*. 96(1), 11-23.

Rilling J.K., Gutman D.A., Zeh T.R., Pagnoni G., Berns G.S., Kilts C.D. (2002). A neural basis for social cooperation. *Neuron*. 35(2), 395-405.

Schroeder H., Desor D. (2005). The behavioural differentiation between the carrier and the non-carrier profiles in groups subjected to the diving-for-food situation: A complex social model to study anxiety in rodents. Proceedings of the *5th International conference on methods and technics in behavioral research*. Wageningen, The Netherlands. Measuring Behavior 2005 Conference CD. Wageningen: Noldus Information Technology.

Schroeder H., Grasmuck V., Toniolo A.-M., Desor D. (2000). Rôle de l'anxiété dans l'émergence de la différenciation sociale de groupes de rats confrontés à une contrainte environnementale relative à l'obtention de la nourriture. In Flieller A., Bocéréan C., Kop J.-L., Thiébaud E., Toniolo A.-M., Tournois J. (eds.), *Questions de psychologie différentielle*, Presses Universitaires de Rennes. 339-343.

Schroeder H., Toniolo A.-M., Nehlig A., Desor D. (1998). Long-term effects of early diazepam exposure on social differentiation in adult rats subjected to the diving-for-food situation. *Behavioural Neurosciences*. 112(5), 1209-1217.

Takahashi T. (2005). Social memory, social stress, and economic behaviors. *Brain research bulletin*. 67(5), 398-402.

Theraulaz G., Bonabeau E., Deneubourg J.-L. (1998). Response threshold reinforcement and division of labour in insect societies. *Proceedings of the Royal Society of London, Serie B*. 265(1393), 327-332.

Thomas V., Bourjot C., Chevrier V., Desor D. (2002). MAS and RATS: Multi-agent simulation of social differentiation in rats' groups. Interest for the understanding of a complex biological phenomenon. *Proceedings of International workshop on self-organization and evolution of social behaviour*. Monte Verita, Suisse. 396-405.

Thomas V., Bourjot C., Chevrier V., Desor D. (2004). Hamelin: A model for collective adaptation based on internal stimuli. In Schaal S., Ijspeert A., Billard A., Vijayakumar S., Hallam J., Meyer J.-A. (eds), *Proceedings of the 8th international conference on the simulation of adaptive behaviour*. Los Angeles, USA. 425-434.

---

## Les auteurs

Marie-Caroline Cotel est étudiante en master de Recherche au sein de l'équipe Neurosciences comportementales de l'URAFPA. Son travail a constitué à caractériser les réponses au stress en fonction du statut social des animaux au sein de cette situation expérimentale et la relation avec le statut cognitif.

Après avoir soutenu son doctorat en 2005, Vincent Thomas a été nommé en 2006 maître de conférence en informatique à l'université de Nancy 2, où il enseigne à l'IUT Charlemagne. Il a réalisé son doctorat au sein de l'équipe MAIA du LORIA sous la direction de Vincent Chevrier et Christine Bourjot. Son travail s'inscrit dans le domaine de l'intelligence artificielle distribuée et s'intéresse plus précisément à la construction décentralisée des comportements individuels au moyen de deux approches thématiques différentes que sont les systèmes multi-agents et les processus décisionnels de Markov. C'est au cours de son travail de thèse qu'a été généré le simulateur du modèle comportemental des rats plongeurs HAMELIN qui est à l'origine de cette publication.

Titulaire d'un doctorat consacré à l'étude et la mise en œuvre de systèmes multi-agents, Vincent Chevrier est maître de conférence HDR en informatique à l'UHP (Université Henri Poincaré) et membre de l'équipe MAIA du LORIA. Il est plus particulièrement impliqué dans l'étude et la modélisation de phénomènes collectifs complexes (intelligence en essaim) et l'utilisation de ces connaissances à l'élaboration de nouvelles approches conceptuelles et expérimentales (laboratoires virtuels, systèmes formels, ...).

Christine Bourjot est maître de conférence en Informatique à l'Université de Nancy 2. Elle est membre de l'équipe MAIA (Machines Intelligentes Autonomes) au LORIA (laboratoire LOrrain de Recherche en Informatique et ses Applications) où elle mène son activité de recherche dans le domaine de l'intelligence artificielle située (*embodied artificial intelligence*) et des systèmes multi-agents en s'attachant plus particulièrement à la conception de systèmes auto-organisés à base d'agents réactifs d'inspiration biologique. Elle est également responsable du parcours professionnel du master de sciences cognitives et applications de Nancy 2 et membre du conseil d'administration de l'ARCo (Association pour la Recherche Cognitive).

Henri Schroeder est maître de conférence en neurosciences comportementales à l'UHP (Université Henri Poincaré). Animateur de l'équipe Neurosciences

comportementales de l'URAFPA (Unité de Recherche Animal et Fonctionnalités des Produits Animaux associé à l'INRA) ; son travail de recherche autour du modèle « des rats plongeurs » porte plus précisément sur l'implication de mécanismes relatifs à l'anxiété dans le devenir des individus au sein des groupes de rats et de la relation avec les mécanismes cognitifs impliqués. Il utilise également ce modèle au plan d'applications relatives à l'étude de facteurs environnementaux sur le comportement social (facteurs alimentaires, polluants, agents pharmacologiques) ou de modélisation de systèmes formels. Il est également membre du conseil d'administration de l'ARCo (Association pour la Recherche Cognitive).