

Démarche incrémentale pour l'évaluation d'un modèle multi-agent en éthologie

Vincent Thomas¹, Christine Bourjot¹, Vincent Chevrier¹, Didier Desor²

*1- LORIA. Equipe MAIA
tranche C - B.P. 239
54506 Vandoeuvre-les-Nancy, France.*

*2 - Laboratoire de neurosciences comportementales
campus scientifique
54506 Vandoeuvre-les-Nancy, France.*

Résumé : Cet article propose une démarche d'évaluation incrémentale pour évaluer un modèle censé rendre compte d'un phénomène biologique. Il présente dans un premier temps le phénomène collectif cible : à savoir le comportement de différenciation observés dans des groupes de rats, le modèle qui en a été fait puis son évaluation. Le fait d'envisager l'évaluation de manière incrémentale permet alors de voir jusqu'à quel point le modèle répond aux attentes et permet de mettre en évidence de nouvelles questions en éthologie qui seront abordées dans la dernière partie.

Mot clefs : Modélisation, simulation multi-agent, évaluation de modèle, phénomène de différenciation

1. INTRODUCTION

(Minsky, 1965) définit l'activité de modélisation de la manière suivante : « To an observer B, an object A* is a model of an object A to the extent that B can use A* to answer questions that interest him about A ».

Dans cette activité, on trouve en présence : d'un côté le réel (pour autant qu'on puisse l'appréhender : on appellera ici « réel » ce qui est issu de l'expérience du thématicien au sens de (Meurisse, 2004)), de l'autre le modèle (par exemple un programme). Le modèle est donc intrinsèquement différent de ce qu'il veut représenter ne serait ce déjà parce que leurs supports sont totalement différents : le phénomène réel fait appel aux processus du vivant tandis que le phénomène simulé s'appuie sur des composants électroniques. Il n'est donc pas possible de réduire le phénomène réel à sa modélisation puisqu'à un niveau donné les modes de fonctionnement sont fondamentalement différents. Les modèles que l'on propose ne peuvent donc être que des modèles réduits. Comme le présente (Picault, 2001) citant Soller « un modèle est une représentation théorique qui ne prétend pas décrire fidèlement l'objet d'étude mais qui revendique au contraire son caractère délibérément schématique en même temps que sa fécondité eu égard d'un objectif spécifié. ». L'objectif d'un modèle n'est donc pas de se revendiquer comme l'unique explication d'un phénomène mais de conforter ou d'infirmer des hypothèses relatives à la structure du phénomène étudié, ou d'en prédire le comportement. La modélisation se fait fréquemment de manière incrémentale. Les modélisateurs proposent un premier modèle censé rendre compte d'une partie du phénomène observé puis analysent les résultats par simulation afin d'évaluer sa capacité à reproduire qualitativement le phénomène cible mais aussi sa fécondité et « voir si le modèle permet de rendre compte de plus de choses que ce pour quoi il a été conçu » (Picault, 2001)

L'évaluation de la qualité du modèle est une étape incontournable. Selon nous, elle doit se faire de manière incrémentale en cherchant d'abord à évaluer dans quelle mesure le modèle parvient à reproduire ce pourquoi il a été conçu puis dans quelle mesure il permet de rendre compte d'aspects supplémentaire du phénomène. Cette évaluation permet ainsi de mettre en relation une partie du phénomène (assigné initialement au modèle ou observé en simulation) avec la connaissance produite par le thématicien et introduite de manière explicite par les modélisateurs. Cette mise en relation permet alors au thématicien d'avoir une meilleure vision

des conséquences des hypothèses mathématisées dans ce modèle et des parties du phénomène qui n'en sont pas la conséquence directe.

En suivant ces arguments, cet article propose une démarche d'évaluation incrémentale de modèle:

L'évaluation d'un modèle procèdera donc par questions successives, la question (n+1) n'étant posée que si le modèle répond correctement aux (n) précédentes.

Nous appliquerons cette démarche à une tentative de modélisation d'un comportement social complexe observé dans des groupes de rats soumis à des contraintes environnementales. Dans un premier temps, nous présenterons le phénomène biologique puis sa modélisation. Nous présenterons ensuite comment se fait l'évaluation d'un modèle et nous nous concentrerons enfin sur la démarche d'évaluation incrémentale avant d'en tirer des conclusions sur ce phénomène et sa modélisation.

2. LE PHÉNOMÈNE NATUREL OU SYSTÈME CIBLE

Problématique « naturelle » (cible) : réponse adaptative de groupes de rats aux contraintes que le milieu leur impose à propos de l'obtention de nourriture.

Chez les mammifères, la structuration sociale s'accompagne généralement de spécialisations comportementales, en particulier dans les parties du répertoire qui gèrent les rencontres interindividuelles. Les modèles expérimentaux qui rendent compte de telles spécialisations sociales sont rares, en particulier chez les rongeurs, en dehors des modèles de relations hiérarchiques du type dominance.

Par ailleurs, dans de nombreux ensembles d'animaux, l'organisation sociale conduit parfois à la réalisation de tâches collectives dont la complexité terminale a pu laisser croire en l'existence de phénomènes cognitifs évolués tels que planification à long terme, représentation globale du but final, représentation interne de l'environnement. Récemment, pour certaines espèces (insectes sociaux en particulier) un certain nombre de théories ont été développées, qui mettent l'accent sur l'importance de mécanismes non-linéaires et d'évènements stochastiques dans l'émergence des structures (Deneubourg & Gross, 1989). A l'opposé, l'existence d'opérations mentales complexes et de phénomènes socio-cognitifs n'est généralement plus mise en doute chez les primates infra-humains. Intégration auto-catalytique d'activités individuelles et processus cognitifs ne semblent pourtant pas devoir être opposés d'une manière exclusive, et la comparaison des processus sociaux qui mènent à une réalisation collective dans divers groupes, même phylogénétiquement éloignés, est fondamentale dans la délinéation des différents processus mis en oeuvre.

Notre recherche s'inscrit dans cette optique. Elle aborde, en utilisant des groupes expérimentaux de rats, ce problème de la structuration du groupe social par l'intermédiaire de différenciations comportementales induites par un environnement contraignant, ainsi que la dynamique de cette organisation sociale. A cet effet, nous avons mis au point une situation expérimentale basée sur les deux principes suivants : l'existence d'une contrainte (pour atteindre la nourriture, il est nécessaire de franchir un obstacle : plonger et nager en apnée sur une distance d'environ 1,50 mètre), et le caractère différé de la satisfaction du besoin (il est impossible de consommer la nourriture sur son lieu d'obtention, et il est nécessaire de revenir à la cage d'habitation et d'affronter les congénères). Dans ces conditions, des différenciations comportementales apparaissent ; il s'agit d'une adaptation particulièrement efficace, puisque tous les individus des groupes survivent sans problème de santé, alors qu'environ 50% des individus n'accèdent jamais à la source de nourriture. Cette situation de laboratoire présente certaines analogies avec un phénomène observé en conditions naturelles par des écologistes italiens sur les rives du Pô : lorsque le niveau du fleuve baisse, des colonies de mollusques

sont découvertes ; les rats les consomment et quand l'eau remonte seuls certains individus plongent pour continuer à les saisir (Gandolfi & Parisi, 1973).

Dans la situation expérimentale appelée « situation piscine » (Desor, Krafft, Toniolo, & Dickes 91), les groupes de rats sont d'abord confrontés au dispositif à sec. Puis le niveau de l'eau est progressivement monté. Au terme d'une semaine d'habituation, il devient nécessaire de plonger en apnée. Dans ces conditions, dans des groupes de 6 individus, les rats se différencient en 2 types caractéristiques : environ 50% des rats plongent et transportent la nourriture (rats "Transporteurs"), tandis que les autres n'expriment jamais ce comportement (rats "Non-Transporteurs") : ils attaquent les Transporteurs à leur retour et leur volent la nourriture. Ces profils sont très stables dans le temps : aucune variation notable n'a été observée dans des groupes maintenus en situation pendant près d'un an. Une analyse plus fine des comportements des rats transporteurs fait apparaître deux sous groupes : les rats ravitailleurs qui plongent et donnent la nourriture aux non transporteurs et les rats autonomes qui plongent mais parviennent à conserver leur nourriture.

Notre hypothèse actuelle est qu'il s'agit d'un phénomène émergent, issu des interactions des individus, et basé sur des différences inter-individuelles initiales éventuellement faibles, la situation agissant alors comme un « amplificateur de différences ». Comme les capacités cognitives du rat sont loin d'être négligeables, on peut supposer qu'elles interviennent également dans ce processus de différenciation, pour l'accélérer et/ou le stabiliser.

3. LE MODÈLE MULTI-AGENT : HAMELIN

Afin de capturer l'essence de ce phénomène collectif, nous avons proposé un modèle appelé Hamelin basé sur un système multi-agent (Ferber, 1995). Un modèle multi-agent est décrit par un ensemble d'entités autonomes (agents) en interaction les unes avec les autres. Chacun de ces agents, dispose de ses perceptions propres et d'une fonction de décision qui lui permet de choisir son action à partir de son état interne, de ses perceptions et de sa mémoire. Le comportement collectif est alors la résultante des interactions qui ont lieu entre ces entités.

Le modèle Hamelin a plus spécifiquement pour objectif de vérifier comment des mécanismes d'adaptation individuels peuvent produire la spécialisation observée dans des groupes de rats. En particulier, nous avons cherché à voir s'il était possible de produire cette structuration de la collectivité sans cognition sociale (Cotel, Thomas, Chevrier, Schroeder, & Bourjot 2005).

3.1. Les agents

Les rats sont modélisés par des agents réactifs très simples. Leur comportement est régi par des règles de type stimulus-réponse et chaque agent prend sa décision en fonction de plusieurs variables supposées initialement indépendantes:

1. sa faim f qui caractérise le besoin de nourriture et constitue sa motivation.
2. la quantité de nourriture $nour$ que l'agent possède.
3. sa force dom qui correspond à sa capacité à remporter un affrontement. Cette force est analogue au rang de dominance dans les travaux de (Hemelrijk, 1999).
4. son anxiété μ vis à vis de l'eau

Afin de tester si la reconnaissance individuelle est nécessaire à la différenciation, chaque agent est doté de perceptions partielles. A un instant donné, il sait s'il possède une croquette et peut détecter les autres croquettes possédées par les agents dans la cage. Par contre, il ne peut pas identifier les autres agents ni reconnaître quel agent possède une croquette.

Le comportement d'un agent est l'exécution de trois items comportementaux testés séquentiellement: un item comportemental de plongée, un item comportemental d'agression et un item comportemental d'alimentation

L'item de plongée : Un agent décide de plonger en fonction de sa faim et de son anxiété par rapport à l'eau selon les tendances suivantes (voir (Cotel, 2005) pour plus d'informations):

- Plus l'agent a faim, plus sa probabilité de plongée sera importante.
- Plus l'agent est anxieux, moins il aura tendance à plonger.

L'anxiété d'un agent évolue selon des règles de renforcement très simples : lorsqu'un agent plonge, son anxiété diminue d'un facteur multiplicateur. Dans le cas contraire, son anxiété est renforcée.

L'item d'agression : Lorsqu'un agent détecte la présence de croquettes dans la cage alors qu'il ne possède pas de nourriture, il agresse systématiquement un agent en possédant. L'issue de l'affrontement est déterminée selon une probabilité correspondant à la force relative de l'agresseur. Ainsi plus l'agresseur est fort, plus sa probabilité de gagner sera importante et plus l'agressé est fort, plus sa probabilité de résister est importante.

A l'issue d'un combat, chaque agent impliqué dans l'affrontement renforce sa force : la force de l'agent victorieux (agresseur ou défenseur) augmente tandis que la force du second protagoniste diminue.

L'item d'alimentation : A chaque pas de temps, si l'agent possède une croquette, il la consomme en partie et sa faim diminue. Si ce n'est pas le cas, sa faim augmente d'un pas fixe.

3.2. Environnement

L'environnement correspond au dispositif expérimental. Il est caractérisé par la taille du couloir immergé et par la taille initiale des croquettes insérées dans le dispositif. Ces caractéristiques sont implémentées sous la forme de deux variables :

- le nombre de pas de temps mis pour consommer entièrement une croquette
- l'énergie absorbée pendant un pas de temps consacré à consommer la croquette

L'unité de temps choisie correspond au temps nécessaire à un agent pour traverser le couloir immergé et revenir dans la cage.

3.3. Paramètres

Les paramètres de la simulation ont été choisis de deux manières : certains paramètres comme le nombre de pas de temps nécessaire pour manger la croquette ont été établis en considérant les expériences biologiques. Pour d'autres paramètres, (force par exemple), seules les variations inter individuelles sont importantes. Ils ont été initialisés à des valeurs par défaut.

4. DÉMARCHE GÉNÉRALE D'ÉVALUATION

Évaluer la pertinence d'un modèle dans le domaine de la simulation d'un phénomène collectif en biologie met en œuvre plusieurs types de démarches :

Au plan général, le modèle doit impérativement présenter une validité *de construit* : les principes sur lesquels il repose doivent être cohérents avec ce que l'on connaît du phénomène-cible que l'on cherche à simuler ; or, ce phénomène-cible est lui-même, en général, une abstraction, c'est-à-dire une construction de l'esprit de l'observateur. Un bon exemple est le phénomène de dominance : de nombreuses discussions ont tourné et tournent encore autour de la question de savoir si le phénomène de dominance existait bien, ou s'il n'était qu'une

construction théorique élaborée par les observateurs, ou même encore un épiphénomène engendré par le dispositif censé la mesurer. Dans le cas qui nous concerne, le problème relève du comportement social : si les qualificatifs « transporteurs » et « non-transporteurs » font référence à des faits objectifs (transporter ou non la nourriture par des allers-retours en apnée à la mangeoire), il semble clair que les qualificatifs complémentaires comme par exemple « ravitailleurs » possèdent une forte charge interprétative, qu'il conviendra d'atténuer par des quantifications adéquates. Mais même dans ce cas, nous ne sommes pas certains d'être exempts de tout anthropomorphisme, les *umwelts* humains et murins étant particulièrement éloignés. Les principes de base de la simulation devraient être cohérents avec les connaissances théoriques ou la théorie sous-jacente au phénomène étudié. Dans le cas présent, les appels à des fonctions représentatives de *l'anxiété*, à la *faim* et à la *force* semblent être pertinents au regard de ce que l'on connaît des déterminants des relations sociales des rats. Le modèle étant un système multi-agents (SMA), il en va de même pour le caractère décentralisé de la prise de décision, l'hypothèse d'un « Roi des rats » organisant le travail de ses congénères semblant assez peu probable.

Par ailleurs il est nécessaire de déterminer jusqu'à quel point le modèle simule les caractéristiques de la cible, des caractéristiques les plus grossières jusqu'aux plus fines. Il s'agira ici de d'évaluer la proximité des valeurs de sortie du modèle et des données observées. Cette évaluation se fera au travers d'une série de « questions » qui doivent être en rapport avec le construit que l'on envisage de simuler : cette évaluation doit donc, dans notre cas, faire appel à des données du comportement social des rats, au moins de celles qui sont mises en œuvre dans le phénomène-cible : l'apparition d'une différenciation stable en agents « transporteurs » et « non-transporteurs », possédant des caractéristiques simulées en rapport avec celles que l'on évalue chez les rats « réels » est donc impératif.

Cette démarche d'évaluation incrémentale permet de mettre en évidence la capacité du modèle (et donc des hypothèses introduites dans le modèle) à reproduire le phénomène cible mais aussi des aspects non prévus dans le modèle et qui en découlent directement. Le chapitre suivant se charge de présenter l'application de la démarche d'évaluation à notre modèle.

5. LA DÉMARCHE : EVALUATION INCRÉMENTALE

5.1. Evaluation de l'objectif du modèle

5.1.1. *Le caractère systématique de la différenciation.*

Analyse éthologique : Plusieurs centaines de groupes de 6 rats ont été expérimentés à ce jour : seule une proportion infime (moins de 2%) ne se sont pas différenciés.

Analyse des résultats de simulation: A l'issue d'une simulation, le groupe d'agents se divise en deux sous-groupes : le premier est constitué d'agents qui ont tendance à plonger rapidement et à perdre leurs combats (anxiété et force faibles). Le second est constitué d'agents avec une anxiété importante et une force élevées: ils ne plongent pas et parviennent à satisfaire leurs besoins en volant la croquette aux autres agents. Cette séparation en deux groupes comportementaux a été validée statistiquement par analyse factorielle [Thomas 02]

5.1.2. - la constance dans les proportions respectives des différents types.

Analyse éthologique : Dans les groupes de 6 rats, les proportions de Transporteurs et de Non-Transporteurs sont toujours très proches de 50%.

Analyse des résultats de simulation : Sur 100 simulations conduites, deux états globaux du système ont pu être observés: un état global constitué de 3 agents transporteurs et 3 agents non transporteurs qui apparaît dans environ 60% des cas et un autre état global constitué de 4 agents non transporteurs et 2 agents transporteurs qui intervient dans environ 40% des cas.

5.2. Evaluation de la fécondité du modèle

5.2.1. re-différenciations après regroupement d'individus antérieurement différenciés.

Analyse éthologique : Si on constitue des nouveaux groupes à partir d'individus tous antérieurement différenciés en tant que Transporteurs, ces nouveaux groupes se redifférencient immédiatement : des "néo-Non-Transporteurs" apparaissent immédiatement. L'inverse est également vrai.

Analyse des résultats de simulation : La spécialisation apparaît encore si l'on modifie les valeurs initiales des agents introduits dans le système afin de simuler des agents ayant été préalablement différenciés. Quand le système ne contient que des agents transporteurs (anxiété initiale faible), une spécialisation peut encore être observée et conduit à des profils et des proportions analogues.

5.2.2. Lien entre différenciation et effectif du groupe.

Analyse éthologique: Entraînés individuellement dans la situation "piscine", tous les rats deviennent Transporteurs. Si 2 rats affrontent ensemble cette situation, des Non-transporteurs apparaissent dans 10% des groupes. Cette proportion passe à 50 % dans des groupes constitués de 3 rats, à 80% dans des groupes de 4 et à 100% dans des groupes de 6 individus

Analyse des résultats de simulation : les résultats issus de la simulation divergent légèrement : lorsque les agents sont isolés, ils deviennent transporteurs, mais par contre, lorsque deux agents sont mis en présence, une différenciation apparaît très fréquemment. Le mécanisme semble beaucoup plus marqué et plus stable dans la simulation informatique

5.2.3. La différenciation semble reposer sur des différences inter-individuelles initiales

Analyse éthologique : Le premier point qui devait être contrôlé était une éventuelle relation entre les types comportementaux (transporteurs / non – transporteurs) et les statuts individuels dans une hiérarchie de dominance préexistant dans le groupe. Cette hypothèse, testée dans une situation classique d'accès unitaire à la mangeoire, n'a pas été confirmée. Une deuxième possibilité aurait pu être une relative indépendance de la structure sociale par rapport aux contraintes du milieu. Nous avons montré que la connaissance du statut d'un rat dans une situation donnée ne permettait pas de prédire son statut dans une autre. En revanche, à partir d'une étude longitudinale prenant en compte diverses variables telles que l'évolution pondérale, le développement neuromoteur, l'exploration, les réactions face à des situations anxiogènes ..., nous avons montré que l'adoption ultérieure des différents profils en "situation piscine" était prédictible avec une grande précision. **Les différences inter-individuelles dans l'anxiété face à la contrainte semblent jouer un rôle fondamental.**

Analyse des résultats de simulation : De la même manière dans Hamelin, des variations interindividuelles initiales permettent de conditionner les rôles adoptés par les agents. Cependant, alors que ce sont les différences interindividuelles vis-à-vis de l'anxiété qui semblent déterminantes en éthologie, les résultats sont différents dans le cadre de la simulation informatique : ce sont les forces relatives des agents qui conditionnent grandement le phénomène. Il y a en effet prégnance de la hiérarchie entre agents sur l'adaptation

individuelle et le comportement de plongée. Les affrontements permettent la distribution de croquettes entre les agents et les agents les plus faibles ne parviennent pas à s'alimenter. Leur faim croit alors et les pousse à plonger. Le renforcement du comportement de plongée stabilise enfin les agents dans leur rôle de transporteur. D'autres études avec des résolutions de combat légèrement différentes (hiérarchie beaucoup plus marquée ou lien entre la force d'un agent et sa faim) ont permis de renforcer cette analyse.

5.2.4. les individus différenciés élaborent une connaissance à propos des rôles tenus par leurs congénères

Analyse éthologique : En ce qui concerne le Non-transporteur, on remarque tout d'abord qu'il dirige ses attaques uniquement vers les Ravitailleurs, qu'il est par ailleurs capable d'inciter à plonger. La directionnalité stricte de ces interactions (Non-transporteurs vers ravitailleurs exclusivement), et la distance spatio-temporelle qui en sépare le début de la fin de la séquence complète d'incitation laissent penser que le Non-Transporteur a élaboré une certaine représentation du rôle que le Ravitailleur est susceptible de jouer à son égard, et qu'il est capable d'activer ce rôle. Réciproquement, si on donne au Ravitailleur la possibilité de retourner à la cage par un chemin différent de celui où l'attend le Non-Transporteur qui vient de l'inciter, et si ce chemin le conduit en un endroit inaccessible à ce dernier, 75% des ravitailleurs testés à ce jour utilisent cette opportunité et peuvent ainsi consommer ce qu'ils ont transporté. **Ceci suggère qu'ils anticipent l'attaque de leurs congénères, et utilisent leur connaissance de la structure spatiale du dispositif pour lui échapper.**

Analyse des résultats de simulation : L'observation des résultats de la simulation ne permet pas de mettre en évidence l'apparition de couples transporteur/non transporteur et des mécanismes d'incitation. Ce résultat est effectivement attendu puisque les agents n'ont pas la capacité de s'identifier les uns les autres, ils ne peuvent donc pas élaborer des stratégies basées sur les rôles endossés par leur congénères. De nouvelles simulations dans lesquelles les agents ont la possibilité d'élaborer des modèles sur les autres agents semblent donc nécessaires pour capturer l'ensemble du phénomène biologique jusqu'à ce niveau de détail.

6. DISCUSSION

Une évaluation incrémentale du modèle basée sur une séquence de comparaisons entre observations biologiques et résultats de simulation a permis de mettre en évidence des propriétés pertinentes du modèle par rapport au phénomène cible

- Dans les deux cas, une spécialisation apparaît
- Les proportions des groupes sont analogues
- Il est possible d'observer des mécanismes de re-différenciation dans les deux cas.

Ces différents résultats extrêmement robustes par rapport aux paramètres décrivant la simulation laissent supposer que ce modèle semble capturer une partie de l'essence du phénomène à cette échelle.

Les modèles divergent cependant sur plusieurs points :

- La permanence de la différenciation dès que la simulation contient plus de deux agents, alors que la différenciation est moins marquée dans l'observation éthologique.
- La primauté de l'anxiété en biologie alors que le modèle informatique semble principalement guidé par les forces relatives et la hiérarchie entre agents
- L'impossibilité pour le modèle informatique de reproduire certains phénomènes microscopiques comme la formation de couple transporteur/non transporteur et les mécanismes d'incitation

Le fait d'avoir suivi une évaluation incrémentale a permis de localiser les différences et de focaliser l'attention sur ces points précis aussi bien dans le domaine de l'éthologie que dans la simulation proposée

Du point de vue de l'éthologie, plusieurs questions se posent :

- La re-différenciation dans la simulation informatique apparaît du fait de la présence d'un facteur d'oubli (augmentation régulière de l'anxiété). il serait intéressant de voir si cette variation d'anxiété est mesurable en éthologie. Si la mise en relation du niveau d'anxiété des rats et de leur statut social a pu être réalisé à plusieurs reprises (par exemple en traitant certains rats par anxiolytiques pendant la phase de mise en eau : Desor, 1994) ou par mesures directes des niveaux d'anxiété après différenciation (Vakanas, Desor, Schroder, 2003) grâce à des tests tels que l'enfouissement défensif conditionné ou le labyrinthe en croix surélevé, l'évolution de cette anxiété en cours d'exposition à la contrainte environnementale s'avère beaucoup plus délicate, de par les problèmes engendrés par l'obligation de répéter plusieurs fois ces tests. Quant à la redifférenciation, nous ne disposons pas à l'heure actuelle d'hypothèse concurrente à celle qui suppose que la formation d'un nouveau groupe de rats qui ne se connaissent pas auparavant s'accompagne d'évaluations interindividuelles concernant la force et l'anxiété face à l'eau des nouveaux protagonistes.
- Le mécanisme de hiérarchisation semble guider la simulation informatique alors que l'anxiété semble être à l'origine de la différenciation dans les expériences conduites en éthologie, une analyse plus poussée du mécanisme observé en biologie semble intéressante. Il serait ainsi intéressant de se concentrer sur les liens entre l'anxiété d'un agent et sa résistance à l'agression indépendamment de tout autre facteur pour savoir si ces paramètres sont couplés contrairement à la simulation actuelle.
- Enfin, l'apparition de couples n'a pas pu être reproduite par notre modèle. Cette divergence laisse supposer que le rat dispose d'une représentation extrêmement complexe des autres vis à vis de cette tâche. Une cognition sociale plus fine pourrait éventuellement expliquer une différenciation plus rapide.

Du point de vue de la simulation, d'autres questions peuvent être posées pouvant conduire à de nouvelles recherches

- L'hypothèse simple d'indépendance entre les variables internes peut être remise en cause : l'anxiété vis-à-vis de l'eau pourrait conditionner la réponse à un affrontement. Des premières expériences en informatique consistant à coupler la faim d'un individu à sa force (plus l'individu a faim, plus il cherche à garder sa croquette) permettent d'avoir une meilleure régulation de la faim au sein du groupe. Un couplage entre anxiété et force pourrait mettre en évidence de nouveaux phénomènes observés en biologie (comme la primauté de l'anxiété au sein du processus)
- L'hypothèse volontairement simpliste de non reconnaissance des individus, semble être mise en défaut par l'apparition de couples dans les expériences biologiques. De nouveaux modèles dans lesquels chaque agent aurait la possibilité de stocker de l'information sur les autres sont à envisager. Ils permettraient de voir apparaître de nouveaux phénomènes et d'envisager dans le futur de nouvelles applications de ce phénomène de différenciation pour la résolution de problèmes posés en informatique.

7. CONCLUSION

Le modèle Hamelin donne actuellement des résultats prometteurs en ce qui concerne les « questions » que nous lui avons posées. Il parvient ainsi à reproduire un ensemble de résultats qualitatifs observés dans la nature (la différenciation, la structure et les proportions

des groupes) ainsi qu'un nombre important d'autres résultats (re-différenciation). Le fait d'obtenir tous ces éléments avec un seul modèle très simpliste (et pour des intervalles de paramètre très importants) laisse supposer que ce modèle semble capturer une partie du phénomène collectif.

Pour le moment, il est effectivement difficile de considérer le modèle comme un modèle prédictif du phénomène (si cela peut être un jour possible), mais il peut néanmoins être utile de plusieurs manières :

- Le modèle permet de faire ressortir les généralités sur le mécanisme difficile à appréhender en éthologie puisque l'éventail des expériences envisageables dans la nature reste très limité alors que la simulation peut être effectuée dans de nombreuses conditions (pour par exemple évaluer l'influence de la taille d'une croquette indépendamment des autres facteurs – alors qu'en biologie une diminution de la taille conduirait vraisemblablement à une facilité accrue à la protéger).
- De la même manière, le modèle permet de confirmer certaines hypothèses émises par les éthologues et l'analyse du processus informatique permet d'avoir de nouvelles manières d'appréhender le processus biologique. En particulier, le phénomène collectif peut s'interpréter comme le couplage de deux phénomènes: un phénomène de partage des besoins par les affrontements et un phénomène d'adaptation individuelle permettant de résoudre localement la tâche en allant chercher de la nourriture. Les affrontements peuvent alors être vus comme un moyen permettant à la collectivité de tirer parti de mécanismes d'adaptation individuels pour résoudre la tâche collective à laquelle elle est confrontée.
- Enfin, ce n'est pas forcément le modèle lui-même qui s'avère intéressant mais plutôt la démarche permettant de le construire. Cette démarche a permis de raffiner les hypothèses des éthologues, de poser de nouvelles questions et de proposer des réponses potentielles. En cela, la démarche a permis de proposer des réponses sur le phénomène biologique. Comme le présente Minsky, c'est le propre d'une bonne modélisation.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Amblard F. & Phan, D. (2006) *Modélisation et simulation multi-agents : applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Hermès.
- Cotel M.C., Thomas V., Chevrier V., Schroeder H., & Bourjot C. (2005) Processus cognitifs et différenciation sociale de groupes de rats : intérêt de la modélisation multi-agents. *Cahiers Romans de Sciences Cognitives*, accepté sous presse.
- Deneubourg, J.L. & Gross, L. (1989). Collective patterns and decision making, *Ethol. Ecol. Evol.*, 1 : 295-311
- Desor D., Krafft A., Toniolo A.M. & Dickes P. (1991) Social cognition in rats : incentive behaviour related to food supply, *XXII Int ethological conference*.
- Desor D. (1994) Contribution à l'étude du comportement social du rat. Différenciations comportementales dans des groupes de rats confrontés à une situation de difficulté d'accès à la nourriture : typologie des individus, aspects socio-cognitifs des interaction, ontogenèse des différenciations, aspects pharmacologiques. *Thèses de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université Henri Poincaré-Nancy1*
- Ferber J (1995) *les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*, Intereditions, 1995
- Gandolfi, G., Parisi, V.(1973). Ethological aspects of predation by rats, *Rattus norvegicus* (Berkenhout), on bivalves *Uniuo pictorum* L. and *cerastoderma Lamarkii* (Reeve). *Boll. Zool.*40: 69-74
- Hemelrijk C.K. (1999) An individual-oriented model on the emergence of despotic and egalitarian societies. *Proc of royal society london B: biological sciences*, (pp 361-369)

- Meurisse T. (2004) *Simulation multi-agent: du modèle à l'opérationnalisation*, Thèse de l'Université Paris 6.
- Minsky M. (1965), *Matter, Mind & Models*, Proc of IFIP Congress, (pp 45-49)
- Picault S. (2001), *Modèles de comportements sociaux pour les collectivités d'agents et de robots*, thèse de l'université Paris 6.
- Thomas V., Bourjot C., Chevrier V. & Desor D. (2002) MAS and RATS : Multi-agents simulation of social differentiation in rats groups, *International Workshop on Self-Organization and Evolution of Social Behaviour*.
- Vakanas, G., Desor, D. & Schroeder, H. (2003). Influence du statut social (transporteur autonome, transporteur ravitailleur, non transporteur) sur le comportement du rat male dans deux modèles d'anxiété : l'enfouissement défensif conditionné et le labyrinthe en croix surélevé. *6^{ème} colloque de la Société des neurosciences, Rouen, France*