

LES SIMULATIONS MULTI-AGENTS ET LE MANAGEMENT DES ECOSYSTEMES

Nadjia.El Saadi¹

Résumé:

Dans cette communication, nous proposons de passer en revue le développement et l'utilisation des systèmes multi-agents dans le management des écosystèmes. Les comportements et les interactions sont les problèmes clés pour comprendre et modéliser l'organisation des écosystèmes. Les simulations multi-agents sont introduites conceptuellement, des architectures variées des agents sont présentées et le rôle de l'environnement est évoqué. Nous présentons aussi quelques outils informatiques. Une discussion sur l'utilisation des simulations multi-agents pour le management des écosystèmes suivra et nous discuterons la force de ses simulations pour les sciences sociales et les problèmes spatiaux. Nous verrons aussi comment les simulations multi-agents peuvent être utilisées pour des objectifs variés, de la théorisation jusqu'à un support de prise de décision collectif. On propose quelques perspectives de recherche sur le processus de prise de décision individuelle, les institutions et sur la crédibilité des simulations multi-agents.

Mots-clefs: Systèmes multi-agents, Simulation, Architectures d'agents, Processus de prise de décision.

1. INTRODUCTION

Récemment, beaucoup de chercheurs ont commencé à utiliser les systèmes multi-agents, appelés aussi « modèles basés sur les agents » dans différents domaines. Les chercheurs en écologie ou économie utilisent cette méthodologie et les outils associés pour le management des écosystèmes (systèmes écologiques ou économiques). A l'origine, les systèmes multi-agents proviennent du domaine de l'intelligence artificielle. Dans un premier temps, ce

¹ Maître de conférences à l'INPS

domaine était appelé intelligence artificielle distribuée: au lieu de reproduire l'information et de raisonner sur un agent intelligent, l'objectif serait de reproduire l'information et le raisonnement de plusieurs agents hétérogènes qui coordonnent pour résoudre conjointement des problèmes planifiés. Certains chercheurs se sont intéressés beaucoup plus à l'agent et son autonomie, par exemple, la définition de l'agent proposée par Wooldridge (1999): «un agent est un système informatique situé dans un certain environnement et qui est capable d'une action autonome dans cet environnement dans le but de réaliser ses objectifs planifiés», alors que d'autres engagés dans le domaine des systèmes multi-agents, se sont concentrés sur l'organisation d'agents multiples en interactions (Huhns and Stephens, 1999). Puis, ces derniers chercheurs ont rencontré d'autres chercheurs provenant des sciences sociales et de la vie. Ils ont encore rencontré d'autres groupes du domaine de la vie artificielle (Langton, 1988), un domaine qui a été développé sur la base de la physique et le contexte général des sciences de la complexité qui réexamine des questions scientifiques en étudiant les interactions entre des entités élémentaires et leur mode d'organisation. D'une part, les systèmes multi-agents fournissent une méthode pour reformuler certaines questions dans les sciences sociales et naturelles. D'autre part, les chercheurs dans le domaine de l'informatique utilisent plusieurs concepts des sciences sociales: la psychologie cognitive et la théorie des jeux pour rationaliser les stratégies utilisées lors de l'établissement des relations entre agents, la sociologie pour définir les modes d'interaction entre les individus et la société, et les linguistiques pour munir les agents d'un langage et organiser les protocoles de communication.

Des groupes variés ont émergé du mouvement interdisciplinaire et utilisent de nos jours les systèmes multi-agents de différentes manières. Parmi les disciplines scientifiques mobilisées à examiner le problème d'interaction des agents avec un environnement collectif, l'écologie, pour laquelle l'environnement est une notion fondamentale, et qui peut jouer un rôle clé pour la spécification des concepts et le développement d'outils appropriés. Des références en écologie, dans son sens large, ont apparu rapidement dans les travaux sur les systèmes multi-agents. On peut citer le travail de Hogeweg et Hesper sur les colonies d'abeilles (Hogeweg and Hesper, 1983), et Craig Reynolds (Reynolds, 1987) qui imita le comportement de groupes d'oiseaux migrateurs. Ces travaux ont été suivis par une série d'études sur les comportements d'animaux et de sociétés d'animaux.

Les systèmes multi-agents ont aussi été utilisés dans des applications sur l'environnement, c'est-à-dire, des applications qui impliquent des interactions entre des dynamiques naturelles et sociales comme le management d'eau (Lansing and Kremer, 1994) ou comme la pêche (Bousquet et al. 1994). Ce papier passe en revue et discute les travaux dédiés au management d'écosystèmes et de ressources, qui prennent en compte les interactions entre la société et les systèmes naturels.

2. LES SYSTEMES MULTI-AGENTS EN ECOLOGIE, DANS LES SCIENCES SOCIALES ET DANS LE MANAGEMENT DES ECOSYSTEMES

2. 1. Définition de systèmes multi-agents

Il existe des définitions variées d'un agent (parmi elles, celle donnée par Wooldridge dans l'introduction) et de systèmes multi-agents. Nous présentons ici la définition donnée par Ferber (1995, 1999) parce qu'elle paraît la plus claire pour les chercheurs en écologie, en économie et en sciences environnementales. Un système multi-agents est composé de:

- Un environnement E , qui est usuellement un espace.
- Un ensemble d'objets, O . Ces objets sont situés, c'est-à-dire, il est possible à tout moment donné d'associer un objet avec une position dans E .
- Un ensemble d'agents, A , qui sont des objets spécifiques (un sous-ensemble de O) et qui représentent les entités actives dans le système.
- Un ensemble de relations, R , qui lient les objets (et donc les agents) l'un à l'autre.
- Un ensemble d'opérations, Op , permettant aux agents de A de percevoir, produire, transformer et manipuler les objets dans O .

- Des opérateurs ayant la tâche de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification.

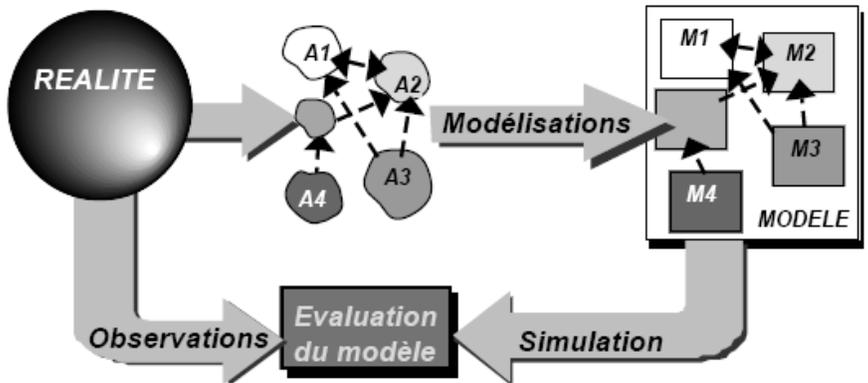


Fig 1: Principe de la simulation multi-agents: Le phénomène réel est décomposé en un ensemble d'éléments qui agissent et interagissent. Chacun de ces éléments est modélisé par un agent et le modèle général est la résultante des interactions entre ces agents.

Le problème clé est de formaliser la coordination nécessaire entre agents. Les questions sont liées à:

- Prise de décision: Quel mécanisme de décision est valable pour l'agent? Quels sont les liens parmi leurs perceptions, représentations et actions?
- Contrôle: Quelles sont les relations hiérarchiques entre les agents? Comment sont-elles synchronisées?
- Communication: Quel genre de messages s'envoient-ils? A quelle syntaxe, ces messages obéissent-ils?

Les systèmes multi-agents simplifient les problèmes à résoudre en divisant la connaissance nécessaire en sous unités, en associant un agent indépendant intelligent à chaque sous unité et en coordonnant l'activité des agents. Donc, ceci se réfère à l'intelligence artificielle distribuée. La recherche fondamentale est conduite sur les problèmes

associés à la représentation des décisions des agents et leurs protocoles de communication. Les applications principales des systèmes multi-agents sont dans les télécommunications, l'Internet et en robotique (Weiss, 1999). Un groupe de scientifiques se spécialisa dans les simulations de sociétés d'agents en écologie et sciences sociales.

2. 2. Les systèmes multi-agents, les sociétés artificielles et l'économie expérimentale

Les systèmes multi-agents sont en train de se développer rapidement dans le domaine des sciences sociales. Des simulations sociales font l'objet de nombreuses conférences, par exemple «multi-agents systems and agent-based simulation» (Sichman et al. 1998). Des recherches sur le sujet sont publiées dans la revue électronique JASSS (Journal of Artificial Societies and Social Simulation) ou dans des revues spécialisées. De plus, un groupe appelé «agent-based computational economics » (Tesfatsion, 1997) a été fondé, publiant sur des problèmes environnementaux dans des revues d'économie variées.

Les préoccupations majeures pour les chercheurs travaillant sur le management des écosystèmes par les simulations multi-agents sont:

Comment les individus forment un groupe? Comment se crée une institution? (Sous le fait que les individus ne peuvent pas être considérés comme entités autonomes indépendantes de leur environnement social).

Comment sont les individus contraints par les structures collectives qu'eux même forment et Comment agissent-ils sur ces structures?

Ce sont quelques questions parmi tant d'autres qui seront examinées en utilisant la modélisation et les simulations multi-agents. D'une façon générale, on peut exprimer cette problématique comme suit:

«Comment sont établies des structures collectives et comment fonctionnent-elles lorsqu'elles sont basées sur des agents ayant des capacités différentes de représentation, qui échangent informations, biens ou services etc,...tout en étant enfoncés dans un environnement dynamique lequel répond à leurs actions?

3. SYSTEMES MULTI-AGENTS: OUTILS INFORMATIQUES POUR MODELISER LES ECOSYSTEMES

Les simulations multi-agents sont basées sur une approche de bas en haut. A travers la modélisation des comportements des agents et des interactions, des propriétés observables à l'échelle du système émergent. Bien qu'un model conceptualisé en terme d'agents peut-être implémenté avec des équations mathématiques (Jansson and de Vries, 1998 ; El Saadi and Bah, 2007), il paraît plus naturel d'implémenter les agents avec des agents informatiques. Le domaine de l'informatique propose des architectures variées pour la prise de décision des agents et plusieurs protocoles d'interaction.

3.1. Architectures d'agents

Bien que la notion des multi-agents implique l'interaction entre plusieurs agents, la littérature montre que la plupart des études se concentrent sur les mécanismes internes de l'agent. Plusieurs types d'architecture sont proposés.

3.1.1. Architectures basées sur la métaphore évolutionnaire

Beaucoup d'applications de systèmes multi-agents aux écosystèmes ont été développées par la communauté de la vie artificielle. Cherchant à comprendre la vie comme elle devrait l'être plutôt comme elle l'est (Langton, 1988), ces chercheurs utilisent souvent des approches basées sur la théorie d'évolution pour comprendre l'adaptation. La méthode la plus connue est celle des algorithmes génétiques (Holland, 1975). Des applications numériques ont été proposées avec des agents évolutionnaires de ce genre (Lindgren and Nordahl, 1994).

3.1.2. Architectures pour des tâches compétitives

Des architectures ont été proposées pour représenter des choix faits par un agent quand il reçoit plusieurs stimulations qui activent des tâches différentes. Il y a un lien pour ce cas avec la robotique et la communauté travaillant sur les animaux (Guillot, 1999)

3.1.3. Architectures basés sur les réseaux de neurones

La relation perception-action est modélisée par un réseau dont les connexions évoluent. Collins and Jefferson (1992) munissent leurs fournis de réseaux de neurones qui sont capables d'apprendre. Jefferson et al. (Jefferson et al. 1991) proposent des réseaux de neurones pour leurs agents Genesys. Une application de ces méthodes se trouve dans la thèse de Dagorn et al., (2000) qui cherchent à comprendre les mouvements du thon dans son environnement.

3.1.4. Fonctions paramétrées

La décision des agents peut-être exprimée en termes de sommes de forces physiques. Par exemple, le travail de Reynolds (1987) sur les volées d'oiseaux, où il applique un calcul vectoriel de forces résultantes de l'attraction et de la répulsion entre agents. Ce type de modélisation a subi des développements majeurs sur une étendue de domaines liés à la dynamique des fluides (Perrier and Cambier, 1997), dynamiques des trafics ou mouvements d'animaux (Mechoud et al., 1998 ; Ramat et al., 1998 ; Lambert et al., 1999). Pour certaines applications du management des ressources, parfois se rapportant aux écosystèmes agricoles, les processus de prise de décisions des agents rationnels économiques sont simulés. Pour décider quelle action prendre, ces agents utilisent des modèles basés sur la recherche opérationnelle (calcul du gradient, par exemple) ou microéconomie (maximisation de l'utilité) pour obtenir une solution optimale en présence de contraintes. Ceci est le cas dans le travail de Weisbuch et al. (1997) et Balmann (1997), qui ont simulé l'optimisation d'un fermier par le biais de la programmation linéaire. D'autres applications (Deffuant, 2001) munissent leurs agents de méthodes de prise de décision basées sur l'analyse multicritères. L'agent peut être aussi représenté par un modèle de flux d'énergie ou de matière (Guérin et al., 1999).

3.1.5. Les architectures BDI (Belief-Desire-Intention)

Les agents cognitifs impliqués dans les écosystèmes ont apparû tôt dans les systèmes multi-agents (Bousquet et al. 1993; Doran and

Palmer, 1993). Ils ne sont pas basés sur des architectures de réseaux de neurones mais sur ce qui a été appelé « architectures croyance-désir-intention ». Cependant, la plupart des applications en problèmes d'écologie utilisent des agents simples et l'attention est concentrée sur la compréhension de leur coordination ou leur relation avec l'environnement. Il y a néanmoins une dimension cognitive qui est primordiale pour tous les systèmes écologiques, c'est-à-dire, une représentation spatiale. Un petit nombre d'études initiales (Saarenma et al. 1988) ont examiné la représentation spatiale des animaux. Une autre dimension cognitive est utilisée lorsque la modélisation des interactions entre agents est une notion de réputation sociale (Doran and Palmer, 1993) ; Rouchier et al., 2001b ; Mathevet et al., 2003).

3.1.6. Les architectures pour des tâches compétitives

Des architectures variées ont été proposées pour représenter les choix faits par un agent lorsqu'il reçoit plusieurs stimulations qui activent différentes tâches. Il existe beaucoup de liens dans ce domaine avec la robotique et la communauté travaillant sur les animaux (Guillot, 1999). Considérant le problème de recherche de la nourriture comme base, Tyrell (1993) propose une architecture où les systèmes comportementaux sont activés en parallèle. Se basant sur l'idée de l'intelligence sans représenter ses limites, certains auteurs créent des agents dont les décisions sont basées directement sur la perception des stimulations (behaviorism). Des exemples incluent l'architecture Manta proposée par Drogoul (1994) qui attribue un niveau d'activation à chaque tâche compétitive.

3.2. Interactions et rôle de l'environnement

Dans le cas des systèmes multi-agents appliqués à l'écologie, il y a trois types majeures d'interactions: interactions par communication entre les agents, interactions physiques (croissance, poussée, nutrition) et interactions dues à l'environnement.

Les interactions directes à travers l'échange de messages sont relativement rares en applications écologiques. Un petit nombre d'applications métaphoriques sont mentionnées comme celle du modèle prédateur-proie étudié par Bouron ou Baray (1998): les prédateurs communiquent pour entourer la proie. Les exemples les plus pertinents concernent les négociations et les échanges de contrats,

de biens ou de services entre agents qui représentent des êtres humains prenant part dans l'écosystème. Par exemple, Franchesquin (1995) a implémenté le protocole de Sian pour simuler les négociations entre des fermiers boliviens.

Les interactions physiques à travers lesquelles les agents exercent une action physique sur les autres telle que pousser ou tirer ou exercer une pression ne sont pas utilisées pour des applications écologiques. Ce genre d'interactions a été utilisé dans des applications physiques, comme l'hydrologie ou la physique des sols. Par contre, une interaction physique comme la prédation est souvent utilisée dans des modèles écologiques. Le troisième type d'interactions (interactions dues à l'environnement) équivaut au concept d'externalité utilisé par les économistes. Les résultats de l'action d'un agent transforment l'environnement commun avec un effet positif ou négatif sur les autres agents. Dans certaines études, les dynamiques de l'environnement et son hétérogénéité sont utilisées comme un milieu pour une adaptation commune, dans ce cas, on parle de dynamiques de co-adaptation. Plusieurs applications utilisent l'environnement comme un ensemble de signaux pour le mouvement, la reproduction ou pour le choix de tâches. Les algorithmes sont souvent basés sur le concept de «intelligence d'un fourmillement» qui est originaire de l'éthologie sociale des insectes. L'idée clé est que «la structure de l'environnement et l'organisation du groupe des agents sont mutuellement co-déterminants» (Théraulaz, 1994). Il y a beaucoup d'applications sur cette approche (intelligence d'un fourmillement, co-évolution, etc.) (Bonabeau et al., 1999).

3.3 Outils

Les applications présentées sont généralement développées à l'aide d'un langage objet-orienté. La plupart d'entre elles utilisent des plateformes. Ces dernières sont divisées en 3 types:

- Les plateformes génériques utilisées pour différents buts (télécommunications, réseaux). La plateforme Swarm (Minar et al., 1996) est l'outil favori pour beaucoup de chercheurs spécialement aux états-unis. StarLogo est aussi un outil qui est souvent mentionné mais il est moins potentiel que Swarm.

- Les plateformes pour des simulations sociales et écologiques qui fournissent des programmes utilitaires permettant de simuler des écosystèmes et les problèmes de management de ressources. Ces outils qui incorporent la représentation spatiale, les méthodes de Monte-Carlo et les liens pour d'autres softwares (databases) sont complets pour l'implémentation des différents systèmes sociaux ou écologiques. Des algorithmes et des structures sont fournis pour implémenter le lien entre les agents et leur environnement et aussi des éléments pour organiser des sociétés d'agents (marchés, ventes, mécanismes de prédation, etc.). Ecosim (Lorek and Sonnenschein, 1999) est plus orienté vers l'écologie alors que Repast (basé sur Swarm) ou Cormas (Bousquet et al., 1998) est plus ouvert pour l'implémentation des dynamiques sociales en interaction avec les dynamiques des ressources naturelles.
- Les plateformes dédiées qui sont des outils concernant des applications plus spécifiques. Par exemple, Manta (Drogoul, 1994) qui se concentre sur les problèmes de recherche de nourriture ou d'allocation de tâches chez les sociétés d'insectes. Arborscape (Savage and Bell, 2000) modélise les dynamiques de forêts. BacSim (Kreft et al., 2002) modélise les dynamiques microbiologiques. Mobydic modélise les dynamiques de populations de poissons (Ginot et al., 2002).

4. DISCUSSION SUR L'UTILISATION DES SYSTEMES MULTI-AGENTS POUR LE MANAGEMENT DES ECOSYSTEMES

4.1. Couplage des dimensions spatiales et sociales

L'objectif des systèmes multi-agents est l'étude des interactions entre des agents autonomes et leur organisation. Est-ce que l'organisation constitue les simulations multi-agents ou bien elle est le résultat de systèmes multi-agents?

Le débat sur l'émergence est moins simpliste aujourd'hui et il est basé sur une étude de circularité micro-macro. Bien que l'organisation soit simultanément un produit, un contexte et une contrainte pour les agents, sa caractérisation n'est jamais limitée. Et

malgré que les structures des agents et les interactions sont catégorisés et décrits, les organisations restent non clairement formalisées. Dans les systèmes multi-agents dédiés aux écosystèmes, on rencontre deux éléments d'organisation: organisation spatiale et réseaux.

La dimension spatiale est la plus fréquemment mentionnée avec des descriptions de l'organisation des agents dispersés dans l'espace. La plupart des problèmes associés à la recherche de nourriture implique l'organisation des agents et leur environnement. Les études s'intéressent aussi à une question importante en écologie: la régulation. Dans le contexte des relations entre les agents et leur environnement, la question du nombre d'animaux capable de survivre et de se reproduire est souvent soulevée (Pepper and Smuts, 1999).

Le second type d'organisation qui peut-être étudié par les systèmes multi-agents est la structure réseau. Beaucoup d'études ont été conduites dans le domaine des chaînes alimentaires et de la diversité des espèces. Si on inclut la dimension humaine dans l'écosystème, les scientifiques sociaux modélisent et simulent les réseaux interactifs parmi les agents pour analyser les effets des différentes rationalités et les échanges. Par exemple, (Routier et al., 2001a) montrent comment des hypothèses variées de relations entre les agents engagés dans une migration et les agents sédentaires dans le sahel produisent des dynamiques de ressources très différentes.

4.2 D'une théorisation à une prise de décision collective

Les systèmes multi-agents sont développés dans le domaine du management des écosystèmes pour de nombreux objectifs. Le premier type d'utilisation de ces simulations obéit aux principes de la vie artificielle. Le modélisateur établit les mécanismes et observe les réponses émergentes. L'objectif est donc de construire des modèles d'interaction très simples et de trouver les coefficients critiques qui caractérisent les transitions. Et donc beaucoup de publications utilisent les systèmes multi-agents pour des objectifs théoriques (Doran and Palmer, 1993 ; Hales, 1997 ; Pepper and Smuts, 1999 ; Rouchier et al., 2001b ; Thébaud and Locatelli, 2001).

Une autre utilisation plus empirique provient de la communauté de modélisateurs travaillant dans les sciences de la vie et les sciences sociales, qui sont impliqués soit directement ou indirectement dans les problèmes de management de ressources. L'idée fondamentale qui est de produire un système qui se comporte

comme la réalité est toujours présente avec l'objectif en utilisant le simulateur de poser la question: «et si...? ». En adaptant le modèle à la réalité, l'objectif n'est pas de mettre le modèle dans un outil de prédiction mais plutôt de comprendre les dynamiques qui existent ou ont existé. Les auteurs examinent les comportements et identifient les paramètres, non pour donner une explication mais pour simuler des observations de la réalité. Cette méthode est utilisée, par exemple en archéologie (Kohler et al., 2000) et en histoire. Un exemple d'application est celui de Dean et al., (2000) qui reconstitue l'histoire des indiens Anasazi et simule des scénarios qui examinent le mouvement de la population en réponse aux crises environnementales. Un autre travail célèbre est celui de Lansing and Kremer (1994) sur la coordination pour le management de l'eau au Bali. Les simulations multi-agents sont aussi utilisées pour comprendre le management traditionnel des ressources renouvelables (Bousquet et al., 2001) et des pratiques agricoles (Balman, 1997)

5. QUELQUES PERSPECTIVES

Les systèmes multi-agents pour la management des écosystèmes est un domaine de recherche tout à fait récent. Cependant, après le premier ensemble d'applications et de papiers théoriques, il est possible de proposer un ensemble de questions de recherche à être examinées dans le futur (Parker et al., 2003). Ce sont des thèmes pour lesquels une rencontre interdisciplinaire entre l'informatique, les sciences sociales et l'écologie s'impose.

5.1. Prise de décision individuelle

Des questions intéressantes surgissent lors de la modélisation du processus de prise de décision pour un agent. Dans un premier lieu, se pose la question concernant le choix de modèles théoriques pour la prise de décision ou de modèles de décision à partir de l'observation du monde réel. En second, il devrait y avoir une recherche interdisciplinaire sur les processus d'apprentissage, ces derniers sont peu étudiés dans les travaux présentant les systèmes multi-agents pour le management des écosystèmes.

5.2. Institutions pour régulation

Les systèmes multi-agents ont déjà été utilisés pour étudier les chaînes alimentaires, les hiérarchies, des outils de régulation économique, etc. Le domaine institutionnel général offre une structure pour l'étude du management de propriétés communes et des mécanismes de régulation sociale (Janssen and Ostrom, 2001). Il devrait donc fournir de l'inspiration pour des simulations multi-agents. Le domaine institutionnel propose des solutions autres que les solutions économiques (marché-orienté) (Wellman, 1996).

5.3. Crédibilité du modèle

Il est clair qu'après quelques années d'innovations enrichissantes pour les systèmes multi-agents, une période de consolidation est nécessaire. Cette consolidation doit être appliquée tout d'abord à la méthode. Comment présenter les résultats d'un modèle multi-agents? Comment devrait être sa structure représentée? Une stratégie est de comparer les résultats des modèles multi-agents avec d'autres modèles comme les équations différentielles. Les modèles multi-agents peuvent être simplifiés ou paramétrés de façon à ce qu'ils puissent être formulés à l'aide d'équations qui peuvent être explicitement résolues. L'équivalence des résultats de simulations avec les résultats analytiques renforce la crédibilité du modèle multi-agents.

Références:

- 1- Balmann, A, 1997. Farm based modelling of regional structural change. A cellular automata approach. *Eur. Rev. Agrc. Econ.* 24, 85-108.
- 2- Baray, C, 1998. Effects of population size upon emergent group behaviour. *Complex. Int.* 6, <http://life.csu.edu/au/complex/ci/vol6/baray>.
- 3- Bonabeau, E., Dorigo, M.,Theraulaz, G., 1999. *Swarm intelligence. From natural to artificial systems.* Oxford University Press.
- 4- Bousquet, F., Cambier, C., Morand, P., Quensière, J., Mullon, C., 1993. Simulating the interaction between a society and a renewable resource. *J. Biol. Syst.* 1, 199-214.

- 5- Bousquet, F., Cambier, C., Morand, P., 1994. Distributed artificial intelligence and object-oriented modelling of a fishery. *Math. Comput. Model.* 20, 97-107.
- 6- Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H., Le Page, C., 1998. Cormas : Common-pool resources and multi-agent systems. *Lecture Notes Artif. Intel.* 1416, 826-837.
- 7- Bousquet, F., Le Page, C., Bakam, I., Takforyan, A., 2001. Multi-agent simulations in hunting wild meat in a village in eastern Cameroon. *Ecol. Model.* 138, 331-346.
- 8- Bousquet, F., Le page, C., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecol. Model.* 176, 313-332.
- 9- Collins, R.J., Jefferson, D.R., 1992. Antfarm: towards simulated evolution. In: Langton, C., Taylor, C., Doyne Farmer, J., Rasmussen, S. (Eds.), *Artificial Life II*. Addison-Wesley, pp. 579-602.
- 10- Dagorn, L., Menczer, F., Bach, P., Olson, R.J., 2000. Co-evolution of movement behaviours by tropical pelagic predatory fishes in response to prey environment: a simulation model. *Ecol. Model.* 134, 325-341.
- 11- Dean, J., Gumerman, G., Epstein, J., Axtell, R., Swedlund, A., Parker, M., McCarroll, S., 2000. Understanding anasazi culture change through agent-based modelling. In: Kohler, T., Gumerman, G. (Eds.), *Dynamics in Human and Primate Societies*. Oxford University Press, pp. 179-206.
- 12- Deffuant, G., 2001. Final report, "improving agri-environmental policies: a simulation approach to the cognitive properties of farmers and institutions". Cemagref, <http://www.lisc.clermont.cemagref.fr/ImagesProject/FinalReport/references-list.htm>.

- 13- Doran, J., Palmer, M., 1993. The EOS project: integrating two models of paleolithic social change. In: Gilbert, N., Conte, R. (Eds.), *Artificial Societies*. UCL Press.
- 14- Drogoul, A. 1994. La mémoire collective dans les sma réactifs : l'exemple de manta. In : *Mémoire Collective, Dialogue entre les sma artificiels et les sciences humaines et biologiques*. Centre de Recherche de Royallieu, Compiègne.
- 15- El Saadi, N., Bah, A., 2007. An individual-based model for studying the aggregation behaviour in phytoplankton. *Ecological Modelling*, 204, 193-212.
- 16- Ferber, J., 1995. *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*. InterEditons, Paris.
- 17- Ferber, J., 1999. *Multi-agent Systems: An introduction to distributed artificial intelligence*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- 18- Franchesquin, N., 1995. Modélisation des négociations aboutissant à une prise de décision collective au sein d'une assemblée communautaire. DEA de l'Université Paris 6.
- 19- Ginot, V., La page, C, Souissi, S., 2002. A multi-agents architecture to enhance end-user individual-based modelling. *Ecol. Model.* 157, 23-41.
- 20- Guerrin, F., Courdier, R., Calderoni, S., Paillat, J.M., Soulié, J.C., Vally, J.D., 1999. Biomas : un modèle multi-agents pour aider à la gestion négociée d'effluents d'élevage. In : Ferrand, N. (Eds.), *modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires*. Cemagref Editions.
- 21- Guillot, A. 1999. Pour une approche dynamique des animats. In : Drogoul, A., Mayar, J.A. (Eds), *Intelligence artificielle située*. Hermès.

- 22- Hales, D., 1997. Modelling meta-memes. *Lecture Notes Econ. Math. Syst.* 456, 365-384.
- 23- Hogeweg, P., Hesper, B., 1983. The Ontogeny of the interaction structure in bumble bee colonies: a mirror model. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 12, 271-283.
- 24- Holland, J., 1975. *Adaptation in natural and artificial systems.* University of Michigan Press.
- 25- Huhns, M, Stephens, L., 1999. Multiagent systems and societies of agents. In: Weiss, G. (Ed.), *Multiagent systems. A modern approach to distributed artificial intelligence.* Mit Press, pp. 79-122.
- 26- Janssen, M. A., de Vries, H.J.M., 1998. The battle of perspectives: a multi-agent model with adaptive responses to climate change. *Ecol. Econ.* 26, 43-65.
- 27- Janssen, M., Ostrom, E., 2001. Critical factors that foster local self-governance of common-pool resources. In: Annual meeting of the resilience alliance, Chiang Mai, Thailand, August, 16-18 and conference on "Inequality, collective action, and Environmental Sustainability," Santa Fe Institute, September 21-23.
- 28- Jefferson, D., Collins, R., Cooper, C., Dyer, M., Flowers, M., Korf, R., Taylor, C., Wang, A., 1991. Evolution as a theme in artificial life: the genesys/tracker system. In: Lanton, C., Taylor, C., Farmer, J., Rasmussen, S. (Eds.), *Artificial Life II.* Addison-Wesley, pp. 549-578.
- 29- Kohler, T.A., Gumerman, G.J. (Eds.), 2000. *Dynamics in human and primate societies. Agent-based modelling of social and spatial processes.* Oxford University Press. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity.
- 30- Kreft, J.U., Booth, G., Wimpenny, J.W.T., 1998. Bacsim, a simulator for individual-based modelling of bacterial

colony growth.
<http://www.eeb.yale.edu/ginger/bacillus/model.html>.

- 31- Lambert, P., Rochard, E., Masse, J., 1999. Environnement des poissons migrateurs dans les modèles individus-centrés. In : Ferrand, N. (Ed.), modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires. Cemagref Editions.
- 32- Langton, C., 1988. Artificial life. In: Langton, C. (Ed.), Artificial Life. Addison-Wesley, pp. 1-47.
- 33- Lansing, J.S., Kremer, J.N. (Eds.), 1994. Emergent properties of Balinese water Temple Networks: Coadaptation on a rugged fitness landscape. In: Langton C. (Ed.), Artificial Life III. Addison-Wesley, Santa Fe.
- 34- Lindgren, K., Nordhal, M., 1994. Artificial food webs. In: Lanton, C. (Ed.), Artificial Life III. Addison-Wesley,