

Modélisation et simulation multi-agent

François Bousquet, Christophe Le Page, Jean-Pierre Müller

CIRAD

73, av. Jean-François Breton 34070 Montpellier cedex 5
jean-pierre.muller@cirad.fr

Résumé. Après avoir situé la contribution des approches multi-agents dans le domaine de la modélisation et de la simulation et cerné son domaine d'applicabilité, nous présentons brièvement ce qui a été réalisé dans le domaine de l'écologie et de la sociologie avant de présenter quelques plate-formes existantes. Nous concluons finalement par quelques perspectives de recherche.

1 INTRODUCTION

Un modèle est une image simplifiée de la réalité qui nous sert à comprendre le fonctionnement d'un système en fonction d'une question. Tout modèle est constitué d'une part de la description de la structure du système, qui incorpore les spécifications sémantiques intégrées (nomenclature et règles d'affectation du sens pour une source, étendue et profondeur du consensus social donnant du sens dans le cas d'une représentation à dire d'acteurs) et d'autre part de la description des fonctionnements réguliers (ou non) et des dynamiques qui modifient cette structure au cours du temps.

La description de la structure du système (ou état) peut aller d'un ensemble de variables quantitatives (numériques) ou qualitatives (à valeurs discrètes) dans le cadre de ce qu'on appelle les systèmes dynamiques, jusqu'à un ensemble d'entités munies de propriétés et de relations entre elles dans le cadre de ce qu'on appelle les systèmes d'information (spatialisés ou non) et, en simulation, les systèmes individus-centrés et multi-agents.

La description de la dynamique peut aller de l'utilisation d'équations différentielles (dans le cas continu) ou d'équations aux différences (dans le cas discret) dans le domaine des systèmes dynamiques, à n'importe quelle combinaison de ces dernières et de modèles informatiques dans le domaine des systèmes individus centrés et multi-agents. Ces descriptions permettent de simuler les évolutions possibles du système que l'on décrit.

Afin de structurer davantage les différents types de modèles que nous venons d'évoquer, il faut encore distinguer entre les modèles descriptifs et les modèles explicatifs d'une part et les modèles basés sur des mesures ou sur des entités d'autre part. Les modèles descriptifs ont pour vocation de saisir un invariant observé d'un système, par exemple la trajectoire d'une planète ou l'évolution d'une population. Il n'est alors pas nécessaire de savoir pourquoi il y a cette trajectoire ou cette évolution mais seulement comment. Les modèles explicatifs ont pour vocation de rendre compte d'un mécanisme ou processus génératif dont le résultat peut être, entre autres, une trajectoire ou une évolution déterminée si tant est que les conditions initiales et les valeurs des paramètres du modèle produise effectivement un tel invariant. On citera, par exemple, le jeu des forces gravifiques pour la trajectoire d'une planète ou les comportements de reproduction pour l'évolution d'une population. Dans les modèles basés sur les mesures, l'état s'exprime comme un ensemble de variables représentant des grandeurs mesurables du système que l'on modélise (position, nombre d'individus dans une population). Dans les modèles basés sur les entités, l'état s'exprime comme un ensemble structuré, éventuellement variable, d'objets dont non seulement les états mais aussi les relations et le nombre peuvent changer au cours du temps.

Les systèmes multi-agents ont vocation d'être des modèles explicatifs basés sur les entités. Pour comprendre leur couverture thématique il est important de distinguer divers types de systèmes à décrire selon qu'il sont munis [27] :

- D'une simplicité organisée : il est facile d'exhiber leur comportement à l'aide de quelques lois sur un ensemble limité de variables, par exemple les systèmes physiques simples pour lesquels des jeux limités d'équations différentielles suffisent ;
- D'une complexité désorganisée : muni d'un grand nombre d'entités en interaction avec des comportements uniformes, par exemple, les gaz parfaits ou certaines dynamiques des populations dans lesquelles les différences entre individus ont peu d'importance et pour lesquels des approches par automates cellulaires ou utilisant la mécanique statistique sont possibles ;

- D'une complexité organisée : muni d'un nombre moyen d'entités hétérogènes produisant des comportements localement structurés tels les systèmes physiques perturbés, les éco-systèmes et les sociétés humaines observées à l'échelle méso (familles, entreprises, réseaux sociaux, etc.).

Les systèmes multi-agents sont naturellement adaptés à l'étude de cette dernière catégorie de systèmes dès lors que l'on cherche des modèles explicatifs, donc à comprendre les mécanismes sous-jacents aux phénomènes globaux observés, y compris les phénomènes d'auto-organisation et de reconfiguration dans des systèmes ouverts.

Nous allons faire un bref tour d'horizon des applications des systèmes multi-agents en écologie puis en sociologie afin de citer quelques plateformes de simulation. Nous terminerons sur les perspectives dans ce domaine.

2 SIMULATION SMA ET ECOLOGIE

Du point de vue des avancées en écologie, Grimm ([14], [15]) à classifié l'utilisation des modèles basés individus (IBM : un cas particulier de systèmes multi-agents) suivant deux motivations. La première motivation est dite pragmatique : elle s'adresse à des problèmes qui ne pourraient pas être étudiés avec des modèles à variable d'état, comme par exemple expliquer une structure de taille de poissons [7] ou la dynamique d'une hiérarchie. Ce type d'application a donné lieu à beaucoup de modèles pour comprendre l'hétérogénéité d'une structure de population animale ou végétale. La deuxième motivation est dite paradigmatique : elle considère que les modèles à variables d'état sont pertinents mais montrent des déficiences pour étudier les questions classiques de l'écologie à savoir la régulation, la stabilité ou la résilience. Dans le champ théorique, deux thèmes se dégagent. Le premier est la variabilité individuelle en tant que cause ou conséquence de la dynamique d'un système. On retrouve ici des questions d'interactions soit entre les agents eux-mêmes, soit entre les agents et leur environnement. Lomnicki et Grimm ([26_a], [18]) mettent ainsi en avant la relation entre les caractéristiques individuelles et la distribution des ressources pour comprendre la régulation du système. Le deuxième thème qui se dégage est celui du descripteur de dynamique. Grimm propose de s'intéresser au concept de persistance. Si la stabilité suppose l'existence de un ou plusieurs équilibres, la persistance est la capacité d'un système à persister pendant un certain temps avec une certaine probabilité. On retrouve ici

les idées développées par exemple par les mathématiciens Gardner et Ashby [11]. Notons que, sur cette voie de recherche, les travaux menés en approche IBM conduisent souvent à des résultats aussi intéressants que surprenants¹. Pour en terminer avec cette analyse partielle, Grimm tire un certain nombre de conclusions. Parmi celles-ci, l'idée d'un nécessaire couplage entre approches. L'approche ascendante qui utilise les IBM devrait être complétée d'une approche descendante classique en écologie qui définit les propriétés dynamiques au niveau de la population et fournit ainsi le cadre théorique auquel devraient se référer les IBM. Pour les auteurs, les approches qui utilisent les IBM, en s'appuyant sur l'utilisation de données, se rapprochent d'une science expérimentale et courent ainsi le risque d'une accumulation de cas sans tentative de généralisation. Le couplage avec des modèles agrégés de l'écologie théorique réduirait ce risque et enrichirait le débat.

Parallèlement à la dynamique scientifique exposée ci-dessus et sans qu'il y ait beaucoup d'interactions - seuls quelques auteurs comme Hogeweg ou Bonabeau publient dans les deux communautés - de nombreux développements ont été effectués par des chercheurs informaticiens qui invoquent une référence à l'écologie. La revue que nous avons effectuée montre que dans une très grande majorité des cas, la méthode utilisée est celle de la simulation. Quelques recherches abordent la question de la résolution de problèmes, appelée résolution collective de problèmes [25] dans le contexte des SMA. A partir de travaux en éthologie sur les capacités de résolution de problèmes par des insectes sociaux [8] sont apparus de nombreux travaux dont les problématiques sont transposables à des problématiques logicielles ou en robotique. On trouvera une excellente revue dans [10] qui développe par ailleurs avec Ferber une approche originale nommée l'éco-résolution.

3 LA SIMULATION SMA EN SOCIOLOGIE

L'organisation est-elle constitutive du SMA ou en est-elle le résultat ? Le débat sur l'émergence est moins simpliste aujourd'hui et s'organise autour d'une réflexion sur la circularité micro-macro [12]. A la fois produit, contexte et contrainte pour les agents, l'organisation est pourtant peu caractérisée. Si les structures d'agents ou les interactions sont catégorisées ou décrites, les organisations sont moins formalisées. On en trouvera néanmoins une analyse dans [1] sous la forme de modèles

¹ Pour une revue sur ce thème on pourra se reporter à la thèse de Shin [24]

organisationnels et une étude sociologique de l'articulation macro-micro dans [5_a].

Certains chercheurs en sciences sociales modélisent et simulent des réseaux d'interactions entre agents pour analyser les effets de différentes rationalités et d'échanges. Ainsi Rouchier montre comment diverses hypothèses de relations entre des agents transhumants et sédentaires au Sahel donnent des dynamiques de la ressource très différentes [22].

Dans le même type de simulation, Doran étudie les réseaux sociaux qui se forment pour capturer des ressources situées dans l'espace [9]. Le travail porte sur une approche classique en BDI avec recrutement des agents pour accomplir une tâche. Des hiérarchies apparaissent et leur fonctionnalité est étudiée.

Hiérarchies, filières, outils de régulation économique, enchères ; l'exploration des formes d'organisation des SMA est encore en cours mais on peut déjà imaginer les quelques formalisations qui vont se confirmer dans les années à venir pour compléter la structuration d'un SMA en s'ajoutant aux architectures d'agents, aux formes d'environnement et d'interactions. Le domaine général des institutions² propose un cadre général pour étudier la gestion des biens communs et les mécanismes de régulation sociales, et devrait aussi fournir des éléments d'inspiration pour les SMA [6].

4 QUELQUES PLATE-FORMES DE SIMULATION

Les applications présentées sont le plus souvent élaborées avec un langage orienté-objet. Certaines d'entre elles utilisent des plate-formes. On peut classer ces dernières en trois types :

- Les plate-formes génériques ; aujourd'hui, quelques-unes d'entre elles sont régulièrement citées dans des applications environnementales.

²**Institution** Un ensemble de règles socio-économiques, mises en place dans des conditions historiques, sur lesquelles les individus ou les groupes d'individus n'ont guère de prise, pour l'essentiel, dans le court et moyen terme. Du point de vue économique, ces règles visent à définir les conditions dans lesquelles les choix, individuels ou collectifs d'allocation et d'utilisation des ressources pourront s'effectuer. Elles contribuent à définir les conditions socio-historiques dans lesquelles les mécanismes de coordination peuvent s'instaurer. [20]

Swarm [21] est l'outil privilégié de la communauté américaine et des chercheurs en Vie Artificielle, ainsi que la plate-forme Echo déjà décrite ci-dessus. De nombreuses applications ont été développées à partir de Swarm qui existe aujourd'hui en plusieurs langages (Java, Objective-C). Des outils génériques ont même été créés à partir de Swarm (voir ci-dessous). La plate-forme Geamas [19] a été utilisée pour quelques applications sur des écosystèmes. Alors que la plate-forme MadKit implémente la notion de rôle [16_a], Geamas propose une implémentation du groupe. On peut également citer Oris [2] ;

- Les plate-formes orientées écosystème. Ce type de plate-forme parmi lesquelles on peut ranger l'outil Ecosim ou encore les plate-formes Sugarscape ou Cormas [3], proposent des utilitaires pour simuler des écosystèmes ou des problèmes de gestion des ressources. Grilles spatiales, utilitaires de simulation pour méthodes de type Monte-Carlo, liens vers des logiciels (SIG, bases de données) font de ces outils des ateliers pour l'implémentation de divers systèmes écologiques. Des algorithmes ou des structures sont prévus pour implémenter le lien des agents avec leur environnement et on trouve aussi des éléments pour l'organisation de sociétés d'agents (marchés, enchères, mécanismes de prédation, ...)
- Les plate-formes dédiées. Ces outils s'intéressent à des types d'applications plus précis. Ainsi Manta [10] s'intéresse aux problèmes de fourrageage ou d'allocation des tâches dans une société d'insectes, Arborscape [23] qui modélise les dynamiques forestières en insistant sur la diversité, BacSim [17] qui modélise les dynamiques micro-biologiques. Mobydic propose de modéliser les dynamiques des peuplements de poissons [13]. L'utilisateur bénéficiera de la réflexion sur la dimensionalité, sur des relations de type prédation ou compétition, sur les fonctions biologiques classiques (mortalité, croissance, ...).

5 CONCLUSION

Les SMA peuvent être créés à partir des modèles mathématiques dans le but de les complexifier ou bien il est possible d'utiliser les SMA pour développer de nouvelles constructions théoriques. ([5_b], [16_c], [26_b], [28]) entre autres ont proposé les premiers travaux qui confrontent un SMA à des modèles mathématiques existants ou créés à l'occasion d'une

application. En général le modèle mathématique³ est d'abord élaboré (les méthodes de la physique statistique sont très utilisées), ses propriétés sont étudiées, puis les SMA permettent d'introduire de l'hétérogénéité, de l'anisotropie, des histoires locales. Mais les modèles SMA s'avèrent aussi de très riches méthodes pour élaborer directement de nouvelles théories. « more theory building than modelling » [9]. Ils doivent ainsi participer à des efforts de théorisation des relations. Cette théorisation n'interdit pas une confrontation avec les données de terrain. A côté de l'approche Vie Artificielle s'est développée l'idée du laboratoire virtuel. Il s'agit de construire un modèle du monde et d'observer sa dynamique à travers des indicateurs élaborés selon les mêmes protocoles que ceux employés pour observer le réel. Des méthodes de validation, classiques en simulation, [16_a] peuvent même être utilisées. On peut trouver une analyse plus détaillée dans [4].

Au delà de la perspective de la production de nouvelles théories explicatives et surtout de l'articulation de théories multiples nécessaire dans une approche du complexe, une idée de la genèse de ces théories et des représentations sous-jacentes est nécessaire pour comprendre la référence à un monde, un espace ou un temps en soi et fournir des possibilités d'expression plus appropriées. Parmi celles-ci, nous citons les pistes suivantes :

- La notion d'entité vue, non pas comme un objet en soi mais comme l'articulation de mesures, essentiellement relationnelles, et de possibilités de transformations à la fois des mesures attribuées à l'entité et des mesures attribuées aux relations entre entités. La composition d'une entité résulterait d'une articulation particulière entre un point de vue pour lequel l'entité est perçu comme un tout et un point de vue décrivant ses composants. Ceci permettrait, par exemple, une approche holonique des écosystèmes tel qu'il est suggéré dans la théorie des hiérarchies [22] ;
- L'espace est souvent vu comme support des entités donc muni d'une existence autonome. Or il est souvent plus direct de penser un lieu comme le lieu d'une entité (le lieu de travail, la ville, la région, etc.) et la relation entre lieux comme issue des relations entre entités (la maison d'à côté). Ainsi toute structure relationnelle entre entités constitue un espace de fait. Le problème vient alors de coordonner ces différents espaces.

³ On remarque qu'aujourd'hui c'est le modèle mathématique lui-même qui est appelé modèle multi-agents. Ces modèles prennent en compte la multiplicité des interactions en général au moyen de calculs probabilistes, mais ne tiennent pas compte de l'unicité de l'agent, de son autonomie.

- Le temps peut subir la même ligne de raisonnement, particulièrement pour penser le processus même de la simulation. En effet, plutôt que d'avoir les instants ou les intervalles, comme des « lieux » d'évènements (changement des mesures), respectivement d'états (état des mesures), on aurait le temps produit par la succession même (réelle ou simulée) des évènements ou des états. Se pose alors le problème de la coordination des différents temps engendrés par autant de dynamiques distinctes.

Ces réflexions ont déjà été menées en tout ou en partie, que ce soit en représentation des connaissances (le projet Cyc de D. Lenat, les représentations du temps, de l'espace, des processus chez Allen et Ginsberg, ainsi que les nombreuses réflexions des modélisateurs eux-mêmes) mais n'ont jamais abouti sur un véritable cadre générique permettant de capitaliser une expérience maintenant riche de la modélisation et de la simulation multi-agent.

6 REFERENCES

- [1] Amiguet M. and J.-P. Müller (2002). Simulating the Dynamics of Social Networks. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Springer. To come as MABS '02 Proceedings.
- [2] Ballet P., Rodin V., and J. Tisseau (1998). A multiagent system to simulate in-vitro experimentation, *Proceedings of the 1998 IIIE Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI '98)*, July 10-15, Orlando (USA).
- [3] Bousquet F., I. Bakam, et al. (1998). Cormas : common-pool resources and multi-agent Systems. *Lecture Notes in Computer Science 1416*, pp. 826-838. Springer.
- [4] Bousquet F. and C. Le Page. Systèmes multi-agents et écosystèmes, dans J. P. Briot et Y. Demazeau, coordinateurs. *Principes et Architectures des Systèmes Multi-Agents*, pp. 235-266. Hermès.
- [5_a] Castelfranchi C. (1998). Emergence and Cognition. Towards a Synthetic paradigm of AI and Cognitive Science, *Proceedings of IBERAMIA '98, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1484*, pp. 13-26.
- [5_b] Cazoulat R. et B. Victorri. Etude de la dynamique des populations par simulation. <http://www.univ-caen.fr>.
- [6] Conte R. and C. Castelfranchi (1995). *Cognitive and Social Action*. UCL Press.

- [7] DeAngelis D. L., D. C. Cox, et al. (1979). Cannibalism and size dispersal in the young-of-the year largemouth bass: experiments and model. *Ecologica Modelling*, 8: 133-148.
- [8] Deneubourg J. L. and S. Goss (1989). Collective patterns and decision making. *Ethol. Ecol. & Evol*, 1: 295-311.
- [9] Doran J. and M. Palmer (1995). The {EOS} Project: Integrating Two Models of Paleolithic Social Change. In N. Gilbert and R. Conte, editors, *Artificial societies: The computer simulation of social life*, pp. 103-125. UCL Press.
- [10] Drogoul A. (1996). *De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agent*, Thèse de l'Université Paris 6.
- [11] Gardner M. R. and W. R. Ashby (1970). Connectance of large dynamic cybernetic systems: critical values for stability. *Nature* 228(784).
- [12] Gilbert N. (1995). Emergence in social simulation. In N. Gilbert and R. Conte, editors, *Artificial societies: The computer simulation of social life*, pp. 144-156. UCL Press.
- [13] Ginot V. and C. Le Page (1998). Mobydic, a generic multi-agents simulator for modelling populations dynamics. In A. Pasqual del Pobil, J. Mira and A. Moonis, editors, *Tasks and methods in applied artificial intelligence, Lecture Notes in Computer Sciences 1416*. Springer.
- [14] Grimm V. (1999). Ten years of individual-based modelling in ecology: what we have learned and what could we learn in the future?, *Ecological modelling*, 115: 129-148.
- [15] Grimm V., T. Wyszomirski, et al. (1999). Individual-based modelling and ecological theory: synthesis of a workshop. *Ecological modelling*, 115: 275-282.
- [16_a] Gutknecht O. and J. Ferber(1997). {MadKit}: *Organizing heterogeneity with groups in a platform for multiple multi-agent systems*. Rapport Interne LIRMM.
- [16_b] Hill D. (1995). Verification & validation of ecosystem simulation models., *Proceedings of SCS '95*, Ottawa, Ontario.
- [16_c] Keitt T. (1997). Stability and complexity on a lattice : coexistence of species in an individual-based food web model. *Ecological modelling*, 102: 243-258.
- [17] Kreft J. U., G. Booth, et al. (1998). BacSim, a simulator for individual-based modelling of bacterial colony growth, <http://www.eeb.yale.edu/ginger/bacillus/node1.html>.
- [18] Lomnicki A. (1999). Individual-based models and the individual-based approach to population ecology. *Ecological modelling*, 115: 191-198.
- [19] Marcenac P. (1997). Modélisation de systèmes complexes par agents, *TSI*, 16(8): 1013-1038.

- [20] Ménard C. (1995). *L'économie des organisations*. Editions La découverte.
- [21] Minar N., R. Burkhart, et al (1996). The swarm simulation system : a toolkit for building multi-agent simulations, <http://www.santafe.ed/project/swarm>.
- [22] O'Neill R. V., D. DeAngelis, J. Waide and T. F. H. Allen (1986). *A Hierarchical concept of ecosystems*. Princeton University Press.
- [22] Rouchier J., F. Bousquet, et al. (2001). A multi-agent model for transhumance in North Cameroon. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 25: 527-559.
- [23] Savage M. and R. Bell., *Arborgames*, <http://margay.sscnet.ucla.edu/~reb/arbweb/arbormain.html>.
- [24] Shin Y (2000). *Interactions trophiques et dynamiques des populations dans les écosystèmes marins exploités. Approche par modélisation individu-centrée*. Thèse de l'Université Paris 7.
- [25] Théraulaz G. (1994). Du super organisme à l'intelligence en essaim : modèles et représentations du fonctionnement des sociétés d'insectes. Dans E. Bonabeau and G. Théraulaz, éditeurs, *Intelligence collective*, pp. 29-109. Hermès.
- [26_a] Uchmanski J. and V. Grimm (1996). Individual-based modelling in ecology: what makes the difference?. *TREE*, 11: 437-441.
- [26_b] Van Dyke Parunak H., R. Savit, et al. (1998). Agent based modelling vs equation based modelling: a case study and user's guide. In J. Sichman, R. Conte and N. Gilbert, editors, *Multi agent systems and agent based simulation, Lecture Notes in Computer Science 1534*. Springer.
- [27] Weinberg G. M. (1975). *An introduction to general systems thinking*, John Wiley and Sons, New York.
- [28] Weisbuch, G., A. Kirman, et al. (1997). *Market Organization. Lecture notes in Economics and Mathematical Systems 456*.