

### MODÉLISATION DES INTERACTIONS NATURE/SOCIÉTÉ

La modélisation des interactions entre nature et société est abordée depuis plusieurs années par les chercheurs en sciences humaines et sociales et a favorisé le développement d'approches novatrices et interdisciplinaires, tant sur le plan de la conception des modèles que de leurs applications thématiques (Jollivet *et al.*, 1993 ; Legrand *et al.*, 1994 ; Cuq, 2000 ; Bousquet *et al.*, 1996). Ce numéro spécial a pour objectif de présenter un large éventail des apports méthodologiques et thématiques des recherches conduites dans ce domaine. Il s'inscrit en prolongement du colloque international *Interactions nature/société : analyses et modèles* organisé par l'UMR 6554 LETG (Littoral Environnement Télédétection Géomatique) à La Baule en mai 2006 (<http://letg.univ-nantes.fr/colloque/>).

La commission 2 de ce colloque, spécifiquement dédiée à la modélisation des interactions nature/société, a montré un fort ancrage méthodologique des approches développées. Les géographes étant à l'initiative de cette manifestation, les modèles sous contraintes spatiales sont clairement privilégiés avec un intérêt marqué pour les approches à bases d'automates cellulaires et de systèmes multi-agents. La finalité de ce type de modèles est double :

- d'une part, améliorer la prise en compte des échelles spatiales et temporelles dans l'étude des interactions entre les dynamiques naturelles et sociales. L'objectif étant de pouvoir étudier les continuités, les ruptures, les bifurcations et évidemment les processus d'émergences à la fois dans le temps et dans l'espace ;
- d'autre part, mieux rendre compte du fonctionnement des processus étudiés afin d'apporter une aide significative à la gestion partagée et concertée d'espaces sous contraintes, qu'elles soient d'origine anthropique ou qu'elles relèvent du milieu.

Cet article introductif précise les contours de ce numéro spécial en abordant les principaux fondements scientifiques des recherches traitant de la problématique de la modélisation des interactions nature/société sous un angle spatialisé.

#### ***Des approches résolument systémiques***

La prise en compte des interactions et des rétroactions entre les différents éléments qui composent un système de référence est au cœur de l'approche systémique. Cette caractéristique explique que la modélisation des interactions nature/société relève le plus souvent d'une démarche systémique. L'analyse et la

compréhension des relations entre les dynamiques naturelles et sociales nécessitent en effet de considérer les différentes composantes physiques et anthropiques comme systèmes et sous-systèmes d'un modèle global (Bertrand, 2000). En s'intéressant à l'imbrication de phénomènes opérant à différentes échelles spatiales et temporelles, les recherches menées en géographie intègrent pleinement le concept de récursivité des systèmes (Popper, 1981 ; Heylighen, 1992). Ce constat explique que la plupart des modèles spatialisés développés dans ce domaine soient construits sur une structure hiérarchique et récursive.

Les contributions rassemblées dans ce numéro montrent notamment que la composante spatiale des systèmes étudiés est à la fois un élément structurant des modèles et une résultante des processus modélisés (Gaillard *et al.*, 2008 ; Houet *et al.*, 2008 ; Le Tixerant *et al.*, 2008 ; Overmars *et al.*, 2008). Ce constat traduit une réelle évolution des approches qui ont longtemps privilégié une description figée des interactions nature/société. Le basculement vers des méthodes de modélisation spatialisées et dynamiques a été rendu possible par l'uniformisation des langages de spécification, l'introduction de la composante spatiale dans les modèles objets et les progrès considérables des outils de traitement de l'information géographique numérique. L'émergence des approches à base d'automates cellulaires et de modèles multi-agents a également largement contribué à l'essor de la modélisation dynamique des systèmes complexes (Ashan *et al.*, 2000 ; Langlois *et al.*, 2002 ; Dubos Paillard *et al.*, 2003 ; Daudé, 2005 ; Manson, 2005 ; Agbossou, 2007).

Les démarches mises en œuvre ne sont donc plus seulement analytiques, elles deviennent exploratoires notamment *via* le développement de modèles contraints capables de restituer la dynamique des interactions nature/société à partir de boucles de rétroaction. L'organisation et l'échange d'informations spatialisées mais surtout la mise en cohérence des échelles spatiales et temporelles dans les modèles représentent donc un enjeu méthodologique majeur.

### ***Intégration des dimensions spatio-temporelles***

Le développement de modèles approchant dynamiquement les interactions nature/société nécessite de prendre en compte le caractère multiscalair de ces interactions, tant sur le plan spatial que temporel. Cette variabilité des échelles de temps et d'espace agit directement sur la nature et l'intensité des interactions. De ce fait, les échelles spatiales et temporelles sont intimement connectées à partir du moment où chaque pas de temps suggère un état physiologique de l'espace et des objets qu'il englobe.

De nombreux auteurs ont montré que la difficulté d'intégration des dimensions spatiales et temporelles dans les modèles s'intéressant aux interactions homme/milieu était principalement due à l'absence de synchronisation entre les dynamiques naturelles et anthropiques (Gould, 1987 ; Stonebraker *et al.*, 1990 ; Allen, 1991 ; Muxart *et al.*, 1992 ; Snodgrass, 1992 ; Cheylan *et al.*, 1994 ; Peuquet

*et al.*, 1995 ; Claramunt *et al.*, 1999 ; Parent *et al.*, 1999 ; Legay, 2000 ; Jacquez *et al.*, 2005).

A cet égard, les enjeux du développement de modèles spatio-temporels résident dans la capacité des méthodes développées à lier deux niveaux d'échelles :

- l'un temporel, alimenté par les différents cycles des processus modélisés, décomposés en autant de pas de temps de durée variable ;
- l'autre spatial, où l'évolution des entités géographiques à un niveau d'agrégation donné est déterminée par la conjonction de phénomènes anthropiques et naturels, chacun d'eux étant contraints par des temporalités spécifiques.

Dans ce contexte, les systèmes d'information géographique sont de plus en plus fréquemment inscrits dans la démarche globale de conceptualisation des modèles et jouent un rôle prépondérant dans la construction d'un espace de simulation (Tissot *et al.*, 2004). Ainsi, le couplage de SIG avec des modèles tend à se développer dans une double perspective : l'intégration de la dimension spatiale dans les plates-formes de modélisation d'une part (Tissot, 2003) et, d'autre part, la nécessité de la prise en compte du temps dans les SIG (Cheylan *et al.*, 1994 ; Langran, 1992).

Les articles de ce numéro mettent en évidence que les SIG interviennent à deux niveaux dans la modélisation (Gaillard *et al.*, 2008 ; Le Tixerant *et al.*, 2008). L'information géographique est utilisée dans l'étalonnage des modèles afin de garantir un forçage pertinent et des résultats vraisemblables. Puis l'information géographique numérique intervient en phase de validation des modèles car le SIG peut gérer des séries de données spatiales nécessaires à l'analyse de l'évolution du système étudié (Tissot *et al.*, 2006).

Cette structuration peut ainsi évoluer vers un véritable interfaçage modèle/SIG permettant d'établir une relation rétroactive entre modèles temporels et forçages spatiaux (Tissot *et al.*, 2004). Les plates-formes de modélisation à l'architecture très intégrée permettent de réaliser des simulations en tenant compte des propriétés récursives des interactions nature/société. Combinées à des technologies innovantes comme les systèmes multi-agents, ces plates-formes offrent des approches beaucoup plus opérationnelles construites sur la base de modélisations scénarisées et prospectives.

### ***Vers des approches scénarisées et prospectives***

L'émergence d'une forte demande de la société civile en termes d'outils de modélisation associés à la gestion durable des ressources et des activités anthropiques balise un cadre de recherche propice aux développements d'approches scénarisées et prospectives. Les démarches de modélisation spatialisées conduites par les sciences humaines et sociales à l'interface nature/société s'orientent donc de plus en plus vers la production « d'outils de gestion de l'environnement » (Kieken, 2005). Ces outils répondent à deux objectifs complémentaires : il s'agit d'une part

de développer des Interfaces Homme/Machine (IHM) conviviales pouvant être utilisées par les gestionnaires avec ou sans l'assistance de supports techniques et, d'autre part, de promouvoir les approches participatives où la démarche de modélisation résulte d'une véritable collaboration entre chercheurs et gestionnaires, celle-ci pouvant aller jusqu'à la coconstruction du modèle (réflexion conceptuelle, formalisation des hypothèses, définition des cas d'utilisation, formalisation des scénarios). Des équipes de recherche ont ainsi travaillé à l'élaboration d'une véritable méthodologie de modélisation participative (Collectif COMMOD, 2006).

Les SIG jouent dans ce cadre un rôle prépondérant dans la mesure où ils fournissent une « légitimité spatiale » aux modèles et contribuent fortement à leur appropriation par les gestionnaires<sup>1</sup>. Cette « légitimité spatiale » reste néanmoins difficile à atteindre car elle est conditionnée par la vraisemblance des résultats de simulation. Or, de nombreuses études ont montré que les informations spatialisées (issues de traitements d'images, d'analyses spatiales ou d'acquisitions d'informations sur le terrain) ne sont que très rarement exactes (Heuvelink et Burrough, 2002 ; Corgne, 2004). Ce constat pose le problème de l'incertitude dans les modèles et renforce l'intérêt des approches scénarisées qui permettent d'aborder de manière probabiliste cette incertitude.

Dans ce contexte, le couplage modèle/SIG s'avère particulièrement pertinent car il permet de conserver une relation espace/temps cohérente quels que soient le pas de temps et l'échelle spatiale choisis. De nombreux auteurs ont ainsi montré que la cohérence entre la segmentation temporelle et le niveau scalaire des objets manipulés par les modèles conditionne la qualité et la vraisemblance des résultats de simulation (Kemp, 1993 ; Fisher *et al.*, 1996 ; Kemp, 1996 ; Piotr *et al.*, 1996 ; Tissot, 2003 ; Le Tixerant, 2004). Les contributions de ce numéro spécial abondent en ce sens et montrent qu'une intégration des SIG au cœur même de la démarche de modélisation constitue une voie méthodologique pertinente pour la réalisation de simulations scénarisées et prospectives (Houet *et al.*, 2008 ; Le Tixerant *et al.*, 2008 ; Mathevet *et al.*, 2008).

Au total, les contributions de ce numéro spécial illustrent bien la diversité des approches actuellement développées et mises en œuvre pour modéliser les interactions nature/société, en mettant en particulier en évidence :

– d'une part, la prise en compte, dans les modèles, des relations spatiales et temporelles qui structurent les interactions entre les dynamiques naturelles et anthropiques est une étape fondamentale pour la compréhension des systèmes complexes à l'interface nature/société. La mise en place de couplages entre modèles

---

1. On peut citer l'exemple du modèle SENEQUE développé dans le cadre du Piren-Seine où l'intégration du modèle RIVERSTRAHLER au sein d'un logiciel SIG permet de bénéficier d'une interface transférable aux gestionnaires en charge des questions hydrologiques (Ruelland, 2004).

et SIG répond à ce besoin en proposant un environnement de modélisation permettant de modéliser des systèmes sous contraintes spatio-temporelles ;

– d'autre part, les apports combinés des modèles à intelligence artificielle distribuée et des SIG ouvrent dans ce contexte de nouvelles perspectives, avec le développement de plates-formes de simulations capables de restituer la dynamique et le caractère récursif des interactions nature/société.

Enfin ces contributions montrent également qu'en devenant plus interactifs, c'est-à-dire en favorisant la collaboration entre concepteurs et utilisateurs finaux, ces modèles spatialisés deviennent également plus opérationnels et peuvent donc constituer un support pour l'aide à la décision *via* des approches scénarisées et prospectives.

### **Bibliographie**

- Agbossou I., Modélisation et simulation multi-agent de la dynamique urbaine. Application à la mobilité résidentielle, Thèse de géographie, THEMA, Université de Franche-Comté, 2007.
- Aschan C, Mathian H., Sanders L., Mäkilä K., "A spatial microsimulation of population dynamics in Southern France: a model integrating individual decisions and spatial constraints", in Ballot and Weisbuch (eds.), *Applications of Simulation to Social Sciences*, Hermes, Paris, 2000, p. 109-125.
- Allen J.F., "Time and time again: the many ways to represent time", *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 6, 1991, p. 341-355.
- Bertrand C., Bertrand G., « Le géosystème : un espace-temps anthropisé, esquisse d'une temporalité environnementale », in Barrue-Pastor M. et Bertrand G., *Les temps de l'environnement*, Presses universitaire du Mirail, Toulouse, 2000, p. 65-76.
- Cheyran J.-P., Lardon S., Mathian H., Sanders L., « Les problématiques liées au temps dans les SIG », *Revue internationale de géomatique*, vol. 4, 1994, p. 287-305.
- Collectif ComMod, « Modélisation d'accompagnement », in Amblard F. et Phan D. (eds), *Modélisation et simulation multi-agent : applications aux sciences de l'homme et de la société*, Londres, Hermes Sciences, 2006, p. 217-228.
- Corgne S., Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensif : application à la couverture hivernale des sols en Bretagne, Thèse de géographie, Université de Rennes 2, 2004.
- Cuq F., « Systèmes d'information géographique et gestion intégrée des zones côtières », *Actes du Colloque CoastGIS'99 : Geomatics and Coastal Environment*, IFREMER, SHOM, Actes de colloques n° 25, 2000, p.18-29.
- Daudé E., « Systèmes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une Géographie artificielle », in Y. Guermont (dir.), *Modélisation en Géographie : déterminismes et complexités*, Chap. 13, Hermès, Paris, 2005.
- Debreu G., *Theory of Value, an Axiomatic Analysis of Economic Equilibrium*, John Wiley, New York, 1959.

- Dubos-Paillard E., Guermond Y., Langlois P., « Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire. Le modèle SpaCelle », *L'Espace géographique*, 4/2003, 2003, p 357-378.
- Fisher M.M., Scholten H.J., Unwin D., "Geographic information systems, spatial data analysis and spatial modelling : an introduction", in: Scholten H.J. Fisher M.M., Unwin D., (coord.), *Spatial Analytical Perspectives on GIS*, Taylor and Francis, 1996, p. 3-19.
- Gaillard D., Delahaye D., Douvinet J., Langlois P., « Modélisation du ruissellement érosif par automate cellulaire : du diagnostic à l'aménagement concerté », *Revue internationale de géomatique*, 3/2008, 2008.
- Gould S.J., *Time's Arrow, Time's Cycle: Myth and Metaphor in the Discovery of Geological Time*, Harvard University Press, Cambridge, 1987.
- Heuvelink G.B.M, Burrough P.A, Guest Editorial, "Developments in statistical approaches to spatial uncertainty and its propagation", *International Journal of Geographical Information Science*, 16/02, 2002, p. 111-113.
- Heylighen F., "Principles of systems and cybernetics: an evolutionary perspective", *Cybernetics and Systems*, 1992, p. 3-10.
- Houet T., Hubert-Moy L., Tissot C., « Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique. Application à la gestion de l'eau en Bretagne », *Revue internationale de géomatique*, vol. 18, n° 3, 2008, p. 345-373.
- Jacquez G.M., Goovaerts P. and Rogerson P., "Space-Time intelligence systems: Technology, applications and methods", *Journal of Geographical Systems*, 7(1), 2005, p. 1-5.
- Jollivet M., Pavé A., « L'environnement : un champ de recherche en formation », *Nature-Sciences-Sociétés*, 1, 1993, p. 6-20.
- Kieken H., « Les prospectives environnementales fondées sur des modèles. Quelles dialectiques entre modélisation et forum de débat ? », in Mermet L. (editor), *Etudier des écologies futures. Un chantier ouvert pour les recherches prospectives environnementales*, P. I. E.-Peter Lang, Bruxelles, 2005, p. 209-238.
- Kemp K.K., *Environmental Modeling with GIS: A strategy for dealing with spatial continuity*, National Center for Geographic Information and Analysis, University of California, Santa Barbara, 1993.
- Kemp K.K., "Managing spatial continuity for integrating environmental models with GIS", in : Stayaert L. T., Goodchild M. F., Parks B. O., Johnston C., Maidment D., Crane M., Glendinning S., (coord.), *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, Fort Collins, CO, GIS World Books, 1996, p. 339-343.
- Langlois P., Delahaye D., RuiCells, « Automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface » *Revue internationale de géomatique*, vol. 12, n° 4, 2002, p. 461-487.
- Langran G., "Time in geographic information systems", *Technical Issue in GIS*, Taylor and Francis, London, 1993.
- Legay J.-M., « Les temps de l'environnement », in : Barrué-Pastor M. and Bertrand G. (coord), *Les Temps de l'environnement*, Presses universitaires du Mirail, Toulouse, 2000, p. 19-32.

- Legrand P., Perrier A., « Une politique de l'environnement à l'INRA - Orientations pour la délégation de l'environnement ». *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 21, 1994, p. 52-58.
- Le Tixerant M., Dynamique des activités humaines en mer côtière. Application à la mer d'Iroise, Thèse de géographie, UBO, Brest, 2004.
- Le Tixerant M., Gourmelon F., Véron G., « Modélisation du déroulement d'activités humaines en mer côtière. Scénarios appliqués à la mer d'Iroise », *Revue internationale de géomatique*, vol. 18, n° 3, 2008, p. 397-414.
- Manson S. M., "Agent-based modeling and genetic programming for modeling land change in the Southern Yucatán Peninsular Region of Mexico", *Agriculture Ecosystems and Environment*, Elsevier, 111, 2005, p. 47-62.
- Mathevet R., Le Page C., Etienne M., Poulin, B., Lefebvre G., Cazin F., Ruffray X., « Des roselières et des hommes. ButorStar : un jeu de rôles pour l'aide à la gestion collective », *Revue internationale de géomatique*, vol. 18, n° 3, 2008, p. 375-395.
- Muxart T., Blandin P., Friedberg C., « Hétérogénéité du temps et de l'espace : niveaux d'organisation et échelles spatio-temporelles », in : Jollivet M. (coord), *Sciences de la nature, sciences de la société. Les passeurs de frontières*, CNRS, Paris, 1992, p. 243-258.
- Overmars K. P., Verburg P. H., Bakker M M., Staritsky I., Hellmann F., "Translating land use change to landscape change for a scenario study in Europe", *Revue internationale de géomatique*, vol. 18, n° 3, 2008, p. 327-344.
- Parent C., Spaccapietra S., Zimanyi E., "Spatio-Temporal conceptual Models: data structures + space + time", Actes du Colloque *Advance in GIS*, Kansas City, November 5-6, 1999, p. 26-33.
- Peuquet D.J., Duan N., "An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data", *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(1), 1995, p 7-24.
- Piotr J., Haddock G., "Integrated nonpoint source pollution modeling system", in: Stayaert L. T., Goodchild M. F., Parks B. O., Johnston C., Maidment D., Crane M., Glendinning S., (coord.), *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. Fort Collins, CO, GIS World Books, 1996, p. 209-212.
- Popper K., *La quête inachevée*, Agora, Paris, 1981.
- Ruelland D., « SENEQUE, logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité de l'eau », *Revue internationale de géomatique*, vol. 14, n° 1, 2004, p. 97-117.
- Snodgrass R.T., « Temporal databases », in: Campari I. Frank A., Fromentini O., (coord) - *Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*, Springer-Verlag, 1992, p. 22-64.
- Stonebraker M., Rowe L., Hirohama M., "The implementation of POSTGRES", *IEEE Transaction of Knowledge and Data Engineering*, vol. 2, 1990, p. 125-142.
- Tissot C., Modélisation spatio-temporelle d'activités humaines à fort impact environnemental. Application à l'étude des pratiques agricoles intensives dans le département du Finistère, Thèse de géographie, UBO, 2003.

Tissot C., Cuq F., « Apport des SIG pour la modélisation spatio-temporelle d'activités humaines », *Revue internationale de géomatique*, vol. 14, n° 1, 2004, p. 83-96.

Tissot C., Gourmelon, F., Cuq F., « Modélisation d'une activité agricole à fort impact environnemental en zone côtière », *L'espace géographique*, n° 2, t. 35, 2006, p. 148-162.

Von Neumann J., Morgenstern O., *Theory of Games and Economic Behaviour*, Princeton University Press, Princeton, 1944.

CYRIL TISSOT

UMR LETG 6554 CNRS, FR 2195 IUEM  
(GEOMER, Technopôle Brest Iroise)

DANIEL DELAHAYE

UMR LETG 6554 CNRS  
(GEOPHEN, Université de Caen Basse-Normandie)

LAURENCE HUBERT-MOY

UMR LETG 6554 CNRS, FR 2116 CAREN  
(COSTEL, Université Rennes 2 Haute-Bretagne)