

Du couplage de systèmes à l'intégration spatio-temporelle dans les systèmes d'aide à la décision spatiale

From Systems Coupling to Spatiotemporal Integration in Spatial Decision Support Systems

Eric Maillé

Cemagref Aix-en-Provence,
Unité de Recherche Ecosystèmes Méditerranéens et Risques,
BP 31, Le Tholonet,
13612 Aix en Provence,
France
tel : +33 (0)4 42 66 99 32
fax : +33 (0)4 42 66 99 71
E.mail : eric.maill@aix.cemagref.fr

Bernard Espinasse

LSIS (Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes)
UMR CNRS N° 6168,
Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille,
Domaine universitaire de St Jerome,
F-13397, Marseille Cedex 20
France.
tel: +33 (0)4 91 05 60 56
fax: +33 (0)4 91 05 60 33
E.mail : bernard.espinasse@univ.u-3mrs.fr

Résumé

La gestion environnementale des territoires doit s'appuyer sur une connaissance approfondie de la dynamique de nombreux systèmes spatialisés. La gestion de l'espace géographique lui même constitue d'ailleurs l'un des enjeux principaux du développement durable. Les systèmes d'information géographique (SIG) sont largement utilisés pour l'aide à la décision spatiale. Cependant, ces systèmes donne une vision statique alors que la planification environnementale nécessite des outils de simulation, basés sur des modèles dynamiques. Dans ce papier nous proposons une revue de la modélisation spatiotemporelle individu mettant en oeuvre des systèmes multi-agents (SMA) et nous étudions différents types de couplage entre SIG et MAS. Deux exemple de tels couplage sont présentés.

Abstract

Environmental management should be funded on knowledge of many spatial systems functioning. Management of space itself is a key aspect of sustainable development, and requires spatial decision support systems. Geographical Information Systems are widely used as SDSS. However, they give a static point of view on land cover, while environmental planning requires simulation tools, based on dynamic models. In this paper, we propose a

review of individual-based spatio-temporal modeling using multi-agent systems (MAS) and different kinds of couplings between GIS and MAS. Then we give two examples of such coupling.

Mots-clés : SIG, simulation, couplage

Keywords: GIS, simulation, coupling

1. Introduction

La gestion environnementale des territoires doit s'appuyer sur une connaissance approfondie de la dynamique de nombreux systèmes spatialisés. La gestion de l'espace géographique lui-même, ressource non renouvelable par définition, constitue d'ailleurs l'un des enjeux principaux du développement durable. Les outils d'aide à la décision spatiale (SDSS) constituent aujourd'hui des supports incontournables pour la gestion territoriale. Parmi ceux-ci, les systèmes d'information géographiques (SIG) sont des outils privilégiés. Mais ils offrent aux gestionnaires et aux décideurs des représentations qui peuvent parfois se révéler trop statiques, quand les politiques de gestion se raisonnent sur le moyen terme. Les outils d'aide à la décision spatiale par la simulation sont alors plus efficaces. Ces outils requièrent l'élaboration de modèles de dynamiques spatio-temporelles, et la mise en synergie de systèmes de modélisation spatiale et de modélisation dynamique. Le Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes et le Cemagref ont engagé une collaboration portant sur la démarche d'intégration spatio-temporelle et la mise en synergie de ces deux types de systèmes, dont les premières expériences et les premiers résultats sont exposés dans cet article.

Nous examinons, dans une première partie, la problématique de la modélisation de dynamiques spatialisées, et les principales solutions communément adoptées. Parmi ces solutions, le couplage du système de modélisation avec un Système d'Information Géographique (SIG) est assez fréquemment utilisé. Nous en examinons les différents types dans la deuxième partie. Enfin, nous illustrons notre propos par deux applications, l'une concernant l'hydrosystème Camarguais, l'autre concernant la modélisation de la dynamique des structures spatiales périurbaines de la conurbation d'Aix-Marseille.

2. La problématique de la modélisation individu-centrée de dynamiques spatialisées

La modélisation individu-centrée des dynamiques spatialisées connaît actuellement un essor remarquable [Parker 2001]. Les modèles sont souvent à base d'automates cellulaires et de systèmes multi-agents [Batty 1999]. L'automate cellulaire implémente généralement un modèle très

agrégé de dynamique que l'on peut qualifier d'autonome [Koch 2002], représentant en particulier les divers processus de diffusion spatiale. Il se fonde sur l'évaluation de relations spatiales simples (distance, voisinage). Le système multi-agents, quant à lui, implémente généralement un modèle plus « explicatif », qui représente soit une dynamique spatialisée particulière (dynamique d'intérêt), soit divers systèmes qui l'influent ou la déterminent (système décisionnel anthropique de régulation, par exemple).

Le recours à des données spatiales en modélisation individu-centrée impose l'utilisation d'un modèle de données capable de représenter cette information. Celui-ci peut être très simple. En se fondant sur la parenté morphologique entre la représentation graphique des automates cellulaires et les modèles matriciels d'information géographique (raster), plusieurs systèmes de modélisation spatialement explicites décrivent l'espace géographique directement au moyen du graphisme de l'automate [Bousquet 2001].

Mais dans certains cas, les potentialités du modèle d'information spatiale élémentaire se révèlent insuffisantes. Le recours à un modèle d'information complet et à un système spécialisé dans la manipulation de ce type de données, c'est-à-dire un SIG, doivent être envisagés [Koch 2001]. Les motivations d'un rapprochement entre les SIG et les systèmes de modélisation dynamique sont soit liées à l'implémentation des modèles produits soit à leur utilisation dans une perspective d'aide à la décision. Parmi ces dernières, on cite la particularisation de modèles généraux à un territoire spécifique qui doit s'appuyer sur des informations géographiques réelles généralement extraites d'un SIG ; ou encore la valorisation des fonctionnalités des représentations de l'information spatiale des SIG pour visualiser la simulation ou ses résultats et ainsi faciliter l'appropriation du modèle par l'utilisateur. Pour ce qui est de l'implémentation du modèle lui-même, c'est la valorisation de l'existant et l'optimalité des algorithmes des deux systèmes qui motive leur rapprochement : dans le cas où des relations spatiales complexes interviennent dans la dynamique, telles que les relations structurales, leur coût de traitement décuple les ressources requises pour l'exécution du modèle, d'autant plus que la particularisation du modèle aura nécessité des volumes de données importants. Le recours à un SIG, doté d'un modèle d'information adapté et d'algorithmes optimisés s'impose alors.

Le degré de rapprochement d'un système de modélisation et d'un SIG peut aller du couplage lâche à l'intégration totale des systèmes. Nous examinons les différents types de couplages avant d'exposer deux exemples de réalisations.

3. Différents types de couplages entre systèmes de modélisation individu-centré et SIG

Aux couplages de bas niveau, purement syntaxiques, s'opposent des couplages plus élaborés pour lesquels la dimension sémantique est susceptible d'intervenir dans la dynamique des échanges entre systèmes. Nous examinons ces deux situations.

3.1. Typologie de couplages syntaxiques

Mandl (1996) propose une typologie de couplage de système inspirée des types de couplage de modèles :

- *Le couplage lâche (ou couplage faible)*, dans lequel les deux systèmes restent indépendants et où seules les données sont échangées. Le niveau de complexité des programmes des deux systèmes rend peu opérationnels les échanges dynamiques massifs de données. Le couplage lâche n'autorise donc généralement que le couplage statique et la représentation spatiale des états initiaux et finaux. Il ne s'envisage généralement pas pour la visualisation de la dynamique spatiale du système. Des états intermédiaires peuvent cependant être mémorisés et transmis au SIG soit périodiquement, soit à l'occasion d'événements d'intérêt particulier au cours de la session (Zunga 98). Lieurain (1998) préconise l'utilisation de liens du standard DDE (dynamic data exchange) pour le transfert de couches d'information géographique depuis le système de gestion d'information géographique ESRI ArcView, vers la plate-forme multi-agents CORMAS (Cirad, France).
- *Le couplage étroit (ou couplage fort)*, où des fonctionnalités de traitement de l'information spatiale sont implantées dans un SMA ou réciproquement, des fonctionnalités de modélisation à base d'agents sont implantées dans les SIG. Le couplage étroit remédie aux inconvénients du premier, en autorisant, en particulier, le couplage dynamique. Mais les fonctionnalités implantées dans l'un ou l'autre des systèmes ne peuvent être que limitées, car nécessitant des développements redondants dans un environnement peu adapté : il n'est donc applicable qu'à la résolution d'un sous-ensemble de problèmes ne nécessitant pas, soit des traitements de l'information géographique trop complexes, soit l'implantation d'agents trop élaborés ou spécialisés.
- *Le couplage coopératif direct*, dans lequel les deux systèmes restent indépendants et utilisent une liaison clients/serveurs pour communiquer, l'utilisateur intervenant sur l'interface du système client. Ce couplage peut être dynamique mais nécessite une bonne

compatibilité des modèles de données entre les deux systèmes. Il répond aux limites du couplage étroit, en conservant l'intégralité du potentiel fonctionnel des deux types de systèmes, tout en autorisant la dynamique des échanges par la liaison client/serveur. Il nécessite aussi des travaux de développement au niveau de l'interface utilisateur du système client afin de disposer des outils de pilotage du système serveur.

- *Le couplage coopératif indirect* utilise également des liaisons client/serveur mais rajoute un système médian assurant notamment la mise en compatibilité des données, et portant l'interface utilisateur. Le couplage coopératif indirect est assez lourd et requière de gros efforts de développement pour l'élaboration du troisième système médian. La prise en charge par le système médian de la mise en compatibilité des modèles de données, pallie à la principale limite du couplage coopératif direct.

3.2. Les couplages de haut niveau à base d'agents

D'autres formes élaborées de couplages existent. Sengupta [Sengupta 1996] propose un « couplage intelligent » à base d'agents médiateurs [Shariari 2002]. Ces agents sont capables de manipuler de l'information géographique et sont à ce titre des agents spatiaux, dotés d'un modèle d'information géographique et capables de moduler leur comportement en fonction des données spatiales dont ils disposent [Rodriguez 1997]. L'utilisation des agents spatiaux au niveau du couplage lui-même permet donc de bénéficier des propriétés cognitives des agents pour parvenir à un couplage intelligent, susceptible d'accroître à la fois les performances et les capacités fonctionnelles du système global. Cette perspective se replace dans la lignée des développements actuels des agents spatiaux pour le traitement de l'information géographique à l'intérieur ou en collaboration avec les SIG.

Ces formes avancées de couplages sont donc proches du degré ultime de rapprochement qu'est l'intégration de systèmes. A la différence du couplage étroit, dont nous décrivons un exemple de réalisation en partie 3, l'intégration de systèmes utilise un modèle d'information unique capable de représenter à la fois les caractères spatiaux et les caractères d'agents des entités du système résultant. La démarche d'intégration que nous avons choisie, exposée en partie 4, utilise un système d'information géographique comme point de départ. La perspective d'intégration repose alors sur un processus d'agentification d'objets spatiaux est d'implantation d'un langage agent au sein du SIG.

4. Un exemple de couplage étroit : le modèle de fonctionnement hydraulique de la Camargue

L'expérience de couplage étroit que nous avons menée vise à améliorer le potentiel d'aide à la décision, pour la gestion de l'écosystème Camarguais, d'un système multi-agents qui modélise le fonctionnement global du système hydraulique de la Camargue, y compris sa régulation anthropique [Fanchesquin 2001].

4.1. Le « modèle Camargue »

La dynamique de l'écosystème Camarguais est déterminée par le fonctionnement de son système hydraulique. Le niveau de l'eau dans les étangs et leur salinité conditionnent en grande partie la dynamique des espèces présentes. La valeur instantanée de ces variables dépend de facteurs naturels (précipitations, niveau de la mer, etc.) et anthropiques, au travers des pratiques de gestion hydraulique décidées individuellement ou collectivement, de façon concertée, par différents groupes d'acteurs locaux (agriculteurs, pêcheur, gestionnaire d'espace naturels, etc.).

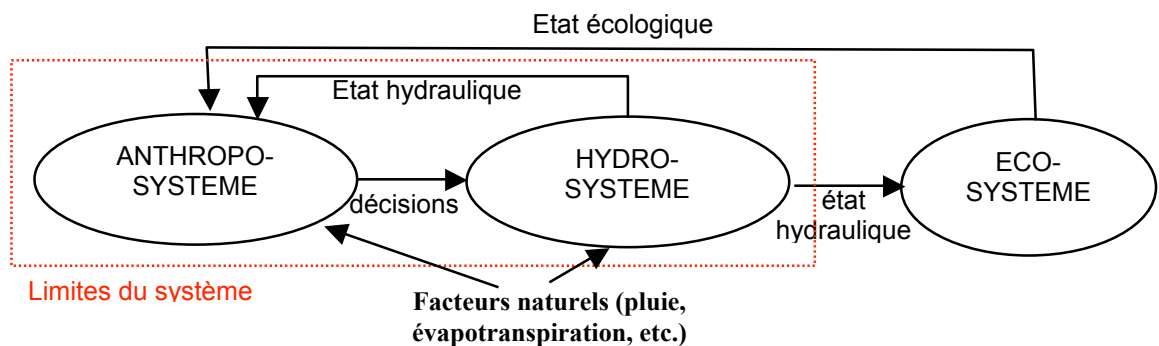


Figure 1 : Limites du système modélisé.

Le modèle de régulation anthropique du fonctionnement hydraulique de la Camargue [Fanchesquin 2001] simule le processus de concertation entre ces différents groupes d'acteurs, puis la mise en œuvre des objectifs fixés en fonction des conditions climatiques et de priorités individuelles.

Le modèle conduit finalement, via un modèle de fonctionnement hydraulique, à prévoir l'évolution des variables d'intérêts : niveau d'eau et salinité des étangs. Le schéma suivant précise les limites du système modélisé.

Ce modèle est initialement spatialement implicite. Plusieurs de ses entités sont localisables et susceptibles d'être décrites spatialement (étangs,

bassins versant, aménagements hydrauliques, etc.), mais ne font pas l'objet de description dans un modèle d'information géographique. Toutefois, certains de leurs caractères spatiaux ou relations spatiales nécessaires au fonctionnement du modèle sont décrits dans un modèle relationnel simple (connectivité hydraulique par exemple).

4.2. L'objectif et la démarche de couplage

L'objectif du couplage est l'explicitation de la dimension spatiale du modèle spatialement implicite. La finalité n'est pas « fonctionnelle » (en ce sens que le couplage n'intervient pas directement pour modifier le fonctionnement du modèle durant la session de simulation) mais bien « représentative » : il s'agit de représenter l'évolution du système au cours de la simulation dans un objectif d'interactivité du pilotage et de meilleure interprétation du résultat (ainsi que de meilleure appropriation du modèle par les utilisateurs). Le couplage doit aussi permettre à l'utilisateur de paramétrer l'état initial.

De cet objectif, décliné en besoins, sont déduits les cas d'utilisation du couplage dans la démarche de tests de scénarios successifs de l'utilisateur potentiel du modèle. Ceci nous conduit à la rédaction de la spécification fonctionnelle et à la définition d'un modèle « minimal » d'information géographique capable d'assurer ces fonctions. Les fonctionnalités requises sont principalement centrées autour de la représentation visuelle de l'information spatiale, notamment de la gestion de la sémiologie graphique pour l'affichage des cartes et l'affichage dynamique des valeurs des variables d'intérêt produites par le simulateur.

Le codage se fera dans le langage Java, en utilisant les ressources disponibles, en particuliers les bibliothèques d'objets géométriques.

4.3. Le modèle d'information géographique

Dans une logique de couplage étroit, nous avons choisi de développer un modèle simplifié d'information géographique dans l'environnement du modèle de simulation. Le champ des fonctionnalités utilisant ce modèle se cantonne à la représentation visuelle, si bien que le modèle de données reste très sommaire, centré principalement sur la classe graphique « polygones » de l'environnement Java. Celle-ci est étendue pour lui permettre de recevoir les attributs des objets géographiques à représenter. La couche d'information géographique se résume globalement à une liste de polygones spatiaux. Le diagramme de classes suivant donne une idée de la structure du modèle de données.

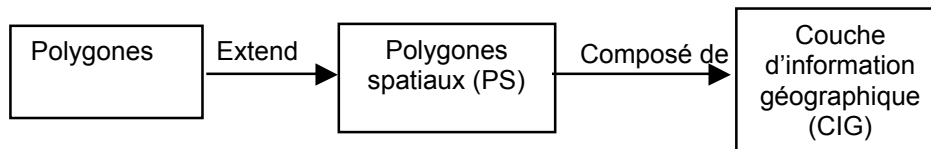


Figure 2 : Diagramme des classes du modèle de données spatiales.

Les limites d'un tel modèle de données sont nombreuses, la première étant son incompatibilité avec les modèles utilisés par les systèmes d'information géographique courants. Une autre de ses limites est son inaptitude (ou sa très mauvaise aptitude) à représenter des informations géographiques matricielles, nous privant des avantages du raster en modélisation dynamique, en particulier, son adaptation à la modélisation de processus spatiaux continu utilisant les automates cellulaires. Enfin, la topologie des polygones est perdue. Cette limite peut se révéler pénalisante dans la perspective de l'utilisation de la relation spatiale entre les objets géographiques comme paramètre entrant du modèle dynamique.

4.4. Architecture et relations entre les entités spatiales et les agents

Bien que le module de traitement de l'information spatiale soit développé au sein de la plateforme de simulation, les entités du package spatial et du simulateur initial restent distinctes. Les agents implicitement spatiaux (tels que les agents « bassins versant ») possèdent un objet spatial « miroir » (polygones Java, pour les objets surfaciques), dans le package spatial. Il n'y a pas de communication directe entre ces entités mais un échange d'information à deux niveaux. Le premier niveau de communication se fait par l'intermédiaire d'une base de données du simulateur (dite « historique », car elle est conçue pour stocker les simulations successives), en particulier pour la définition de l'état initial des entités spatiales, et la représentation de leur état final. La base de données est également interrogeable en phase de post-analyse pour permettre la re-visualisation de la simulation sur une représentation cartographique. Les interrogations de la base de données utilisent les liens SQL/ODBC. Le deuxième niveau de communication est dynamique : il consiste à intercepter les valeurs des variables d'intérêt au moment de la mise à jour de la base de données historique. Il permet une visualisation dynamique spatialisée de la variation des valeurs de ces variables (niveau d'eau, salinité). Nous décrivons cette architecture par le schéma suivant (fig 3) :

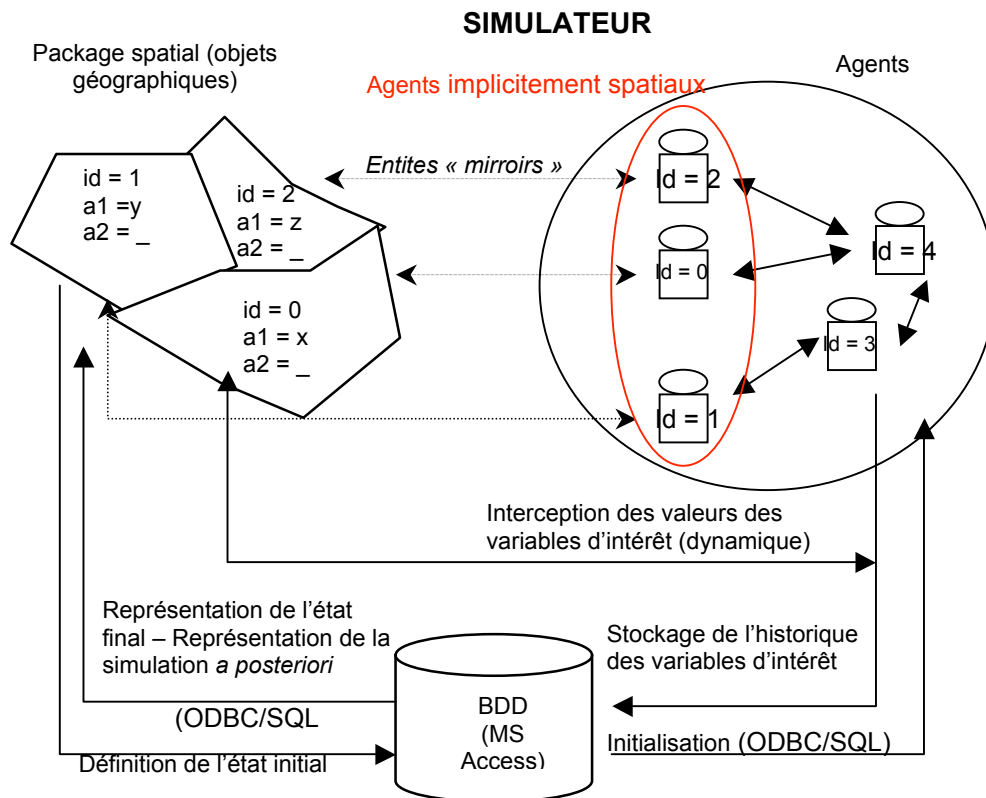


Figure 3 : Architecture du couplage.

Cette architecture montre une dualité maintenue entre le package spatial et le monde des agents, quant à la structure et au fonctionnement du système ainsi qu'en termes de modèle d'information. Cette dualité, si elle justifie l'appellation de couplage, n'en induit pas moins de sérieuses limites, qui s'ajoutent à celles émanant du caractère minimal des fonctionnalités spatiales développées.

4.5. Les limites du couplage étroit

Le package spatial n'a pas de véritable autonomie en tant que système d'information géographique. En particulier, il doit être alimenté par un « SIG Camarguais » global, éventuellement réparti dans les différentes institutions intervenant dans la gestion du territoire ou utilisatrices du simulateur. Le couplage « complet », reliant ce Système d'Information Géographique global et le Système Multi-Agents préexistants, est en réalité

un couplage à deux niveaux utilisant deux modèles d'information géographique, et que l'on peut schématiser comme suit (fig 4) :

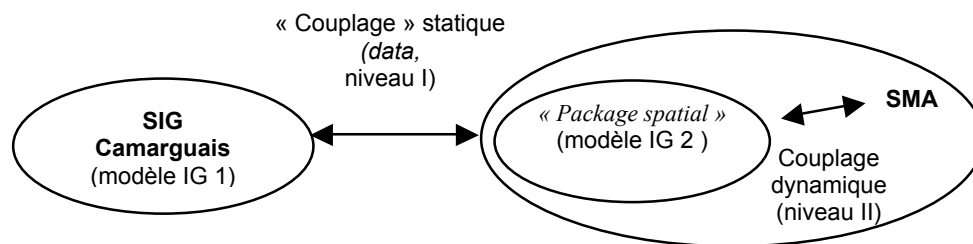


Figure 4 : Couplage complet à deux niveaux.

Le premier niveau de couplage utilise un modèle de données générique de bas niveau d'abstraction destiné aux échanges de données avec les produit des principaux acteurs commerciaux important de l'information géographique, et dont les spécifications sont extrêmement simples (il s'agit en fait du modèle « GENERATE », implémenté sur le système ArcInfo de la société ESRI, complété de spécifications permettant l'échange de l'information attributaire). Le niveau 1 du couplage complet n'est donc pas un véritable couplage mais un protocole statique d'échange de données.

De cet ensemble architectural complexe émane naturellement des limites évidentes de performance, d'opérationnalité et de coût. Celles-ci sont notamment liées à la redondance fonctionnelle, à la dégradation de l'information géographique au cours de la traduction de l'information d'un modèle à l'autre, (perte de la topologie en particulier), à la perte de la structure habituelle en couche de l'informations géographiques (le couplage étroit ne permet de traiter simultanément qu'une seule couche d'informations), au caractère statique du couplage global malgré un couplage étroit dynamique, à la propriété privé de certains formats de données, etc.

Afin pallier à ce type de limites, nous avons engagé, sur une application très différente, des travaux visant à dépasser le problème du couplage par une démarche de véritable intégration de système de modélisation à base d'intelligence artificielle distribuée aux systèmes d'information géographique fondée sur le paradigme des agents spatiaux.

5. Intégration spatio-temporelle pour la modélisation de la dynamique de structures

La structuration des espaces, comprise comme l'agencement des unités d'occupation du sol, se révèle déterminante de nombreux enjeux de la gestion territoriale : activités économiques et fonctionnement des écosystèmes sont partiellement déterminés par ces structures. En zone méditerranéenne, les recherches récentes montrent que le risque d'incendie de forêt est très directement déterminé par les structures, au point que les méthodes d'évaluation du risque essentiellement fondées sur l'analyse spatiale sont en cours de développement [Jappiot 2003].

Ces structures évoluent, selon des processus très complexes, et l'aide à la décision de gestion, qui s'appuie généralement sur une démarche de planification à moyen terme, ne peut se contenter d'une vision statique de la structuration spatiale. Les travaux de cartographie diachronique constituent une première étape pour l'introduction du temps dans la description des structures spatiales. Au-delà, la modélisation dynamique semble naturellement appelée à devenir un outil privilégié d'aide à la décision pour la planification.

Nos travaux portent sur la démarche d'intégration de systèmes pour la modélisation des dynamiques structurales et sont appliqués à la zone périurbaine méditerranéenne. Ils considèrent, par hypothèse, l'évolution des structures comme résultant de la confrontation deux types de dynamiques principales : des transformations spatiales d'origine anthropique, et des dynamiques d'écosystèmes, toutes deux régulées par le système de gestion territoriale. Des modèles, de nature très différentes et issus de disciplines très variées (écologie, géographie, économie spatiale, etc.), sont disponibles pour décrire ces deux types de dynamiques. Nous utilisons le modèle de dynamique forestière AFFORSIM [Prévosto & al. 2003], capable de représenter la progression de peuplements arborés sur un espace ouvert, après abandon par l'agriculture. Il s'agit d'un modèle objets individus-centré, qui utilise un modèle élémentaire de représentation spatiale, indépendant d'un SIG. Par ailleurs, la dynamique d'origine anthropique, étant donnés certains scénarios de régulation (zonage), est décrite par des modèles courants de l'analyse spatiale en géographie : modèles gravitaires de Markov, modèle de diffusion, etc., intégrant ou non la dimension structurale. Ceux-ci n'ont pas de pouvoir explicatif fort, mais reposent sur l'hypothèse courante de la détermination de la dynamique par des relations spatiales simples (distance, contiguïté, voisinage, etc.). Enfin, les structures, qui constituent la ressource à évaluer, sont décrites, à un instant donné, par des modèles

statiques de l'analyse spatiale en géographie, soit vectoriels, soit matriciels (analyse contextuelle) [Jappiot 2003], mais toujours implémentés sur un SIG.

L'intégration de systèmes passe donc par une intégration de modèles. Le choix du paradigme agents répond à un objectif valorisation des aptitudes reconnues des SMA à la modélisation individus-centrée des systèmes complexes [Ferrand 2000]. Mais il répond aussi à un objectif d'unification des paradigmes et de valorisation des aptitudes des agents à la mise en oeuvre de couplages élaborés (dits « intelligents ») de systèmes et/ou de modèles [Fianyo 2001].

La démarche d'intégration que nous proposons et qui se focalise autour du concept « d'agents spatiaux », se décompose en trois étapes principales :

- *La première étape a pour objectif l'intégration au SIG du modèle objet individus-centré de dynamique écologique. Cette première étape pose la question du modèle d'information géographique capable de transcrire de façon optimale le modèle dynamique.*
- *La deuxième étape procède à l'agentification, en agents spatiaux, de certaines des entités géographiques issus des divers modèles. Elle vise à conférer aux objets géographiques les qualités d'autonomie, de proactivité et d'interactivité propre aux agents spatiaux. Pour cela il est nécessaire d'implanter au sein du SIG un « langage agent » doté de formalismes pour la représentation de l'information spatiale. Dans une première approche, deux types principaux d'entités doivent être agentifiées : les individus « arbres » du modèle écologique, et les polygones d'une couche d'occupation de l'espace caractérisant le milieu sur lequel ils évoluent. Les agents du couplage doivent être également des agents spatiaux.*
- *Enfin, la troisième étape vise l'introduction des relations spatiales, et notamment structurales, comme paramètre comportemental des agents spatiaux. Les modalités d'intégration des indices de structures dans les comportements des agents, en particulier, l'interaction entre les moteurs d'analyse spatiale du SIG et les agents, la distribution des tâches spatiales entre les différents agents, et entre les agents et le SIG restent des questions à résoudre dans l'état actuel de la recherche.*

6. Conclusion

La limite entre un couplage étroit et une intégration de systèmes peut être sujette à caution : l'unicité du modèle d'information, l'unicité du paradigme de modélisation constituent pourtant des objectifs à rechercher pour la production d'un système d'aide à la décision spatiale « utilisable » dans

tous les sens de ce terme. A l'objectif de validité, s'ajoute en effet, pour de tels systèmes, l'objectif d'appropriation du modèle par les utilisateurs. Celle-ci repose sur des critères objectifs d'ergonomie, de temps d'exécution, ou plus subjectifs de familiarité de l'environnement, ou de fidélité de la représentation du territoire de l'expert, etc. Familiers des systèmes d'information géographique, les utilisateurs le sont quelquefois moins des systèmes de modélisation. L'unicité du système résultant d'une démarche d'intégration peut constituer à la fois une réponse à certains prérequis techniques, tels que les traitements complexes d'information spatiale, et un facteur facilitateur du transfert du modèle à l'utilisateur.

7. Bibliographie

Batty M. and Jiang B. (2000), Multi-agent Simulation: Computational Dynamics within GIS, in: Martin D. and Atkinson P. (eds.) Innovation in GIS VII: Geocomputation, Taylor & Francis, pp. 55 – 71.

Bousquet F., Le Page C., Müller J.P., 2001, Modélisation et simulation multi-agent, CIRAD, Montpellier.

Claramunt C. and Jiang B. (2001), An Integrated Representation of Spatial and Temporal Relationships between Evolving Regions, Geographical Systems, Springer-verlag, Vol. 3, pp. 411 - 428.

Duchêne C., 2001, Multi-niveaux pour la cartographie automatique de routes, LIP6 IGN, Laboratoire COGIT
<http://miriad.lip6.fr/seminaire/Royaumont2001/supports/espace/Compte-rendu.pdf>

Fianyo Yawa Edem, 2001, Couplage de modèles à l'aide d'agents : le système OSIRIS, thèse de doctorat,
<http://www.bondy.ird.fr/~fianyo/these/these.pdf>

Ferrand N. (Coord.), 2000, SMAGET: Modèles et Systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires, Colloque, 5-8 Octobre 1998; Cemagref; ENGREF Clermont-Ferrand, France.

Grueau C., Rodriguez A., 2002, Simulation tools for transparent decision making in environmental planning, Centro Nacional de Informacao Geografica, Portugal.

Huang B. and Jiang B. (2002), AVTOP: a full integration of TOPMODEL into GIS, Environmental Modelling & Software, Elsevier, Vol. 17, No. 3, pp. 261-268.

Jappiot M, Philibert-Caillat C, Borgniet L, Dumas E, Alibert N, 2003. Wildland/urban interfaces spatial analysis", *Ingenieries- Eau agriculture*

territoires, Numero special Risques naturels et aménagement du territoire pages 69-81.

Koch Andreas, 2001, Linking MultiAgent System and GIS. Modelling and Simulating Spatial InterActions. Department of Geography RWTH, Aachen (Allemagne).

Lieurain M., 1998, Couplage SIG-SMA, rapport technique, CIRAD TERA Montpellier, France, 27 p.

Maillé, 2003, Couplage entre Systèmes Multi-Agents et Systèmes d'Information Géographique en modélisation et simulation de systèmes complexes spatialisés, Mémoire de DEA, DEA MCAO, LSIS UMR CNRS 6168.

Prévosto B., Hill D., Coquillard P., 2003, Individual-based modelling of *Pinus sylvestris* invasion after grazing abandonment in the French Massif Central, 121 Plant Ecology 168: 121137, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.

Rodriguez A., Grueau C., Raper J., Neves N., 1997, Research on spatial Agents, Centro Nacional de Informacao Geografica, Lisboa, Portugal.

Rodriguez A., Grueau C., Raper J., Neves N., 2002(a), Environmental planning using spatial agents, in Carver, S. (Editor) Innovations in GIS 5, Taylor and Francis, London, pp. 108-118.

Rodriguez A., Raper J., 2002(b), Defining spatial agents, Centro Nacional de Informacao Geografica, Lisboa, Portugal, In Spatial Multimedia and Virtual Reality Research Monograph to be published by Taylor and Francis.

Sengupta R.R., Bennett D.A., Wade G.A., 1996, Agent Mediated Links Between GIS and Spatial Modeling Software using a Model Definition Language. GIS/LIS'96, Annual Conference and Exposition Proceedings; xv+1284 pp. 295-309. American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, Bethesda, MD, USA.

Shahriari N., Tao C.V., 2002, GIS applications using agent technology : Symposium on Geospatial Theory, Processing and Application, Ottawa 2002, Canada.

Thériault M., Claramunt C., 1999, La représentation du temps et des processus dans les SIG : une nécessité pour la recherche interdisciplinaire, In. Revue internationale de Géomatique, Volume 9 – n°1/1999, Représentation de l'espace et du temps dans les SIG, page 67 à 99.