
Pyroxène: un système d'aide à la décision territoriale par intégration de simulateurs spatiaux.

Application à l'évolution de la carte du risque d'incendie de forêt.

Eric Maillé* — Bernard Espinasse** — Sébastien Fournier**

**Cemagref, Unité de Recherche Ecosystèmes Méditerranéens et Risques
Département Gestion des Territoires, CS40061, Le Tholonet
13182 Aix en Provence cedex 5. Email : eric.maillé@cemagref.fr*

***Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS)
UMR CNRS 6168, Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III)
Domaine Universitaire de Saint-Jérôme, Avenue Escadrille Normandie-Niemen
13397 Marseille cedex 20. Email : bernard.espinasse@lsis.org, sebastien.fournier@lsis.org*

RESUME. La gestion à moyen terme de l'accroissement des risques territoriaux requiert des moyens de représentation et de simulation des dynamiques spatiales. Pour le cas du risque d'incendie de forêt, des modèles de dynamiques spatiales de zones combustibles et des zones vulnérables, à différentes échelles, existent. Pour assurer l'intégration des simulateurs de ces dynamiques de différentes thématiques et opérant à des niveaux d'échelle différents, nous proposons une infrastructure logicielle d'intégration à base d'agents spatiaux dans un environnement de système d'information géographique nommée Pyroxène.

ABSTRACT. Medium term management of territorial risk increase requires means to represent and simulate spatial dynamics. For forest fire risk, models of spatial dynamics of fuel zones and vulnerable zones exist. In order to integrate simulators of spatial dynamics of different thematic at different scale levels, we propose a spatial agent based and GIS based software infrastructure called Pyroxene.

MOTS-CLES : systèmes d'aide à la décision, systèmes multi agents, systèmes d'information géographique, couplage, intégration à base d'agents, dynamiques spatiales, risque d'incendie de forêt.

KEYWORDS: decision support systems, multi-agent systems, geographical information systems, coupling, agent based integration, spatial dynamics, forest fire risks.

1. Introduction

Les changements environnementaux actuels induisent l'émergence ou l'amplification de nombreux risques naturels tels que le risque d'inondation, d'incendie de forêt, etc. L'aide à la décision de gestion des risques environnementaux requiert la modélisation de l'interaction entre les dynamiques d'écosystèmes combustibles et la dynamique des systèmes anthropiques vulnérables. La représentation de « l'anthropo-écosystème » dans un modèle global unique se heurte tant à la complexité du système qu'à la distribution des connaissances nécessaires dans des disciplines très différentes. Par ailleurs, la décision de gestion territoriale est aussi multi-scalaire, puisqu'elle se réfère à des diagnostics et des champs d'intervention d'échelle spatiale différente.

Nous proposons une solution conceptuelle et opérationnelle d'un outil d'aide à la décision de gestion du risque lié à l'incendie de forêt fondée sur l'intégration de simulateurs de dynamiques spatiales existants, dans l'objectif de simuler l'évolution du risque lié à l'incendie de forêt au cours du temps. Ce système d'intégration présente deux caractéristiques majeures : il est multi-thématique, car il permet l'intégration de simulateurs qui implémentent des modèles se référant à des champs ontologiques différents : celui des écosystèmes, celui des dynamiques anthropiques et celui des risques naturels ; il est aussi multi-scalaire, en permettant l'interopérabilité de simulateurs dont les modèles représentent le système territorial à des niveaux d'échelle différents.

En section 2 de cet article nous proposons une présentation générale de la modélisation de la dynamique du risque lié à l'incendie de forêt par intégration multi-thématique et multi-scalaire de modèles disciplinaires. La section 3 est consacrée au cadre conceptuel d'un système d'intégration de modèles. Enfin, en section 4, nous présentons l'implémentation de ce cadre sous la forme d'une plateforme d'intégration de modèles à base d'agents appelée PYROXENE.

2. Multi-modélisation des dynamiques spatiales à l'origine de l'évolution du risque d'incendie par intégration de modèles

L'augmentation du risque d'incendie émane de la confrontation de deux dynamiques spatiales très différentes : la *dynamique des espaces combustibles*, principalement des espaces forestiers, et la *dynamique des espaces vulnérables*, en particulier des espaces « urbains discontinus » (Jappiot & al., 2000). Ces dynamiques sont contrôlées par un système anthropique de régulation, au travers de plans d'aménagement. La figure 1 explicite le lien entre les dynamiques spatiales et la dynamique du risque, ainsi que la limite du système modélisé.

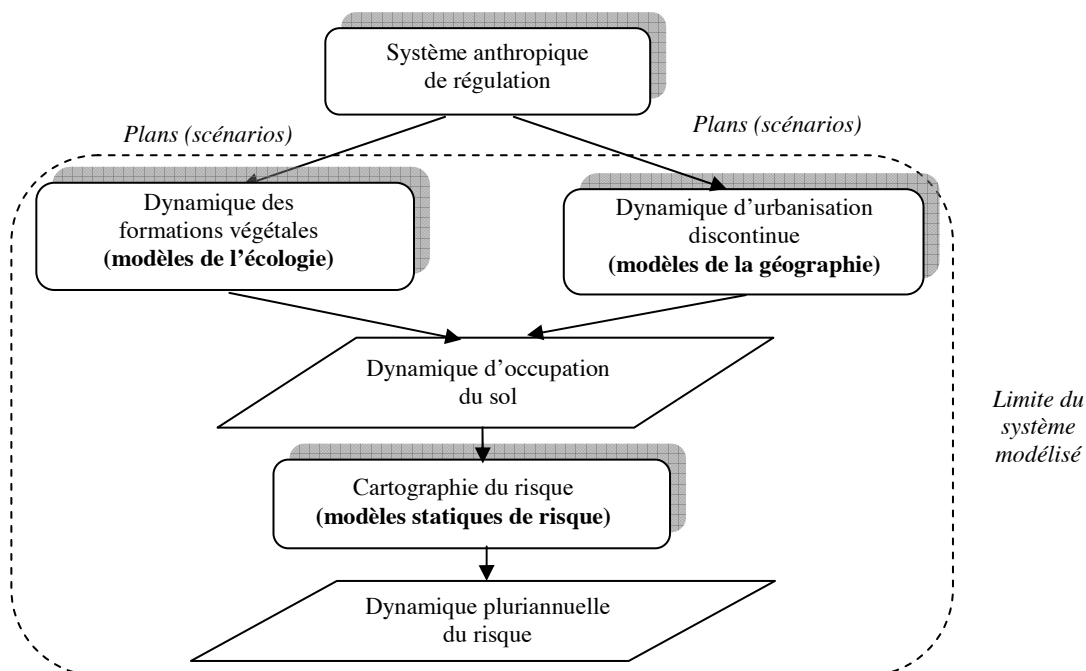


Figure 1. Intégration de modèles de dynamique d'occupation du sol pour la représentation de la dynamique du risque lié à l'incendie de forêt

Dans une perspective d'aide à la décision pour la planification de la gestion de l'espace, on ne cherche pas à modéliser le système anthropique de régulation, qui est en fait précisément l'utilisateur final (ou l'ensemble des utilisateurs finaux) auquel s'adresse l'outil envisagé. En revanche, cet utilisateur doit être en mesure de formuler et de tester des scénarios de plans d'aménagement, afin d'en évaluer l'impact sur l'évolution du niveau de risque tout au long de la durée du plan. Ce sont donc les processus sous-jacents à l'origine de cette évolution du risque qu'il convient de représenter.

2.1. Trois thématiques

Ce sont donc trois ensembles de connaissances thématiques qui doivent être formalisées en modèles opératoires puis intégrés pour la spécification d'un système de représentation spatialisée de la dynamique du risque : la thématique de la dynamique des écosystèmes, de la dynamique d'urbanisation discontinue et la thématique du risque d'incendie :

- la modélisation de la progression du combustible relève essentiellement de l'écologie qui fournit des modèles performants capables de représenter la dynamique des formations végétales, à différentes échelles. Certains modèles comme AFFORSIM (Prevosto & al., 2003) ou CAPSIS (de Coligny, 2006) tentent de représenter de façon individus-centrée le comportement spatial d'entités végétales (arbres). Ils se fondent sur les résultats de l'écologie fonctionnelle, décrivant en particulier les mécanismes de la reproduction des végétaux (dispersion des graines, compétition entre individus, etc.). Ils sont généralement appliqués à des extensions spatiales très limitées (de la parcelle au petit massif forestier). D'autres modèles, tels que SIERRA (Mouillot & al., 2001) ou LANDIS II (Scheller & al., 2006) considèrent plutôt le comportement global des formations végétales à l'échelle paysagère. Ils se fondent notamment sur les résultats de l'écologie du paysage, et sont applicables à des extensions spatiales plus grandes (du massif forestier à la région forestière).
- La modélisation de la dynamique des zones vulnérables, et de l'extension urbaine en particulier relève principalement de la géographie. Les modèles sont le plus souvent des automates cellulaires pour la représentation du phénomène de diffusion spatiale, modulés ou non par les caractères géographiques des espaces sur lesquels la diffusion se produit (Batty & al., 2000, Langlois & al., 1997, Dubos-Paillard & al., 2003, Ellerkamp, 2001).

Mais les travaux portant spécifiquement sur la modélisation du processus d'urbanisation discontinue, en zone périurbaine et à l'échelle des territoires locaux sont bien moins nombreux. Nous avons développé le modèle MACROPOLIS, qui est un automate cellulaire implémenté sur un système d'information géographique matriciel, spécialisé dans la représentation de la dynamique des espaces mixtes, associant les espaces naturels et les espaces urbains. Les fonctions de transition des classes d'automates sont fondées sur l'évaluation de la relation spatiale entre les différentes composantes des espaces mixtes, par le calcul d'indices de l'analyse spatiale matricielle.

Certains des processus anthropiques à l'origine de ces dynamiques peuvent aussi être représentés (Napoléone, 2005) et formalisés de façon analytique ou individus-centré : nous avons développé le système multi-agents MICROPOLIS (Maillé & al., 2007), dans lequel interagissent des agents sociaux, qui représentent des acteurs économiques du système territorial (propriétaires, acheteurs, aménageurs) et qui s'échangent des portions de l'espace (parcelles constructibles) afin de simuler le processus d'urbanisation discontinue en zone périurbaine.

- Enfin, L'évaluation du risque d'incendie en fonction de l'occupation de l'espace se fait grâce aux modèles cartographiques statiques de risque. Quatre grandes approches de modélisation du risque d'incendie de forêt peuvent être distinguées (Maillé & al., 2006) : la modélisation analytique attributaire permet le calcul d'un niveau de risque en chaque point de l'espace en fonction d'attributs géographiques de ce point (pente, couvert végétal, etc.) ; la modélisation spatiale agrégée évalue le niveau de risque en un point de l'espace en fonction de

l'occupation du sol de l'environnement (voisinage) de ce point ; la modélisation spatiale analytique évalue le risque en un point en fonction des aléas d'éclosion et des probabilités de propagation dans l'environnement de ce point ; enfin, la modélisation statistique est fondée sur l'étude statistique des résultats de simulation multiples de propagation des incendies. Toutes ces approches de modélisation conduisent à l'élaboration, pour un territoire donné, d'une carte du risque. Les modèles de risques sont toujours implantés sur Système d'Information Géographiques.

2.2. Deux niveaux d'échelles

Tant les dynamiques d'occupation du sol que la cartographie du risque d'incendie peuvent s'appréhender à des échelles diverses. Deux niveaux d'échelle sont pourtant privilégiés, dans une perspective d'aide à la décision pour la planification : l'aide à la décision pour la planification opérationnelle requiert l'intégration de modèles à grande échelle, pour laquelle sont appréhendés les entités géographiques élémentaires : parcelles, bâtis individuels, entités végétales (bosquet, voire arbre). L'extension sur laquelle opèrent les modèles va de la parcelle au quartier de commune, voire à tout l'espace communal. Les modèles de type individu-centrés sont souvent bien adaptés à ce niveau d'échelle. Nous appelons ce niveau d'échelle le niveau « micro » ; c'est aussi le niveau d'échelle auquel nous faisons référence par le terme « grande échelle ».

L'aide à la planification stratégique s'accommode d'échelles plus petites pour lesquelles les phénomènes peuvent être appréhendés par des modèles plus agrégés. Les modèles de diffusion à base d'automates cellulaires sont bien adaptés à ce niveau d'échelle. Concrètement, les entités géographiques élémentaires susceptibles d'être discriminées à ce niveau d'échelle sont la « zone agricole », le « petit massif forestier », la petite agglomération. L'extension sur laquelle les modèles sont mis en œuvre va de la commune jusqu'à un périmètre pluri-communal ou un grand massif forestier et ses abords. Nous appelons ce niveau d'échelle le niveau « macro » et c'est aussi le niveau d'échelle auquel nous faisons référence par le terme d'« échelle moyenne ».

L'articulation des deux échelles se situe à deux niveaux de perspectives différents :

- Au niveau de l'utilisation de l'outil d'aide à la décision il s'agit de contribuer à répondre à deux niveaux de questionnement différents : aide à la planification opérationnelle pour les modèles à grande échelle (micro), aide à la planification stratégique pour les modèles à échelle moyenne (macro). Dans cette perspective, il n'y a pas de réelle intégration des modèles.
- Au niveau du fonctionnement global du SADE, il s'agit pour les modèles micro de « localiser » les zones de la mise en œuvre du système des modèles « micro ». La « rencontre » des modèles à échelle moyenne permet la définition

des zones critiques ou des zones d'intérêt, à l'intérieur desquelles peuvent être initiées des sessions de simulation à l'échelle macro.

3. Le cadre conceptuel de l'intégration et la mise en cohérence des modèles.

Dans cette section, nous décrivons succinctement le cadre conceptuel général du système d'intégration ainsi qu'un cadre de spécification des modèles d'intégration assurant la mise en cohérence sémantiques des modèles à intégrer.

3.1. Le cadre conceptuel général

Nous disposons donc d'un total de 6 modèles, tous ayant une composante spatiale explicite, 4 étant des modèles dynamiques. Trois des six modèles s'appliquent aux grandes échelles, alors que les trois autres s'appliquent aux échelles moyennes. La production d'un outil d'aide à la décision intégré pour la gestion de l'évolution du risque d'incendie de forêt en lien avec la dynamique d'occupation de l'espace relève donc d'une problématique d'intégration de modèles fondée en premier lieu sur la spécification de différents types de **modèles d'intégration de modèles** (Maillé, 2008). La figure 2 récapitule le cadre de modélisation global.

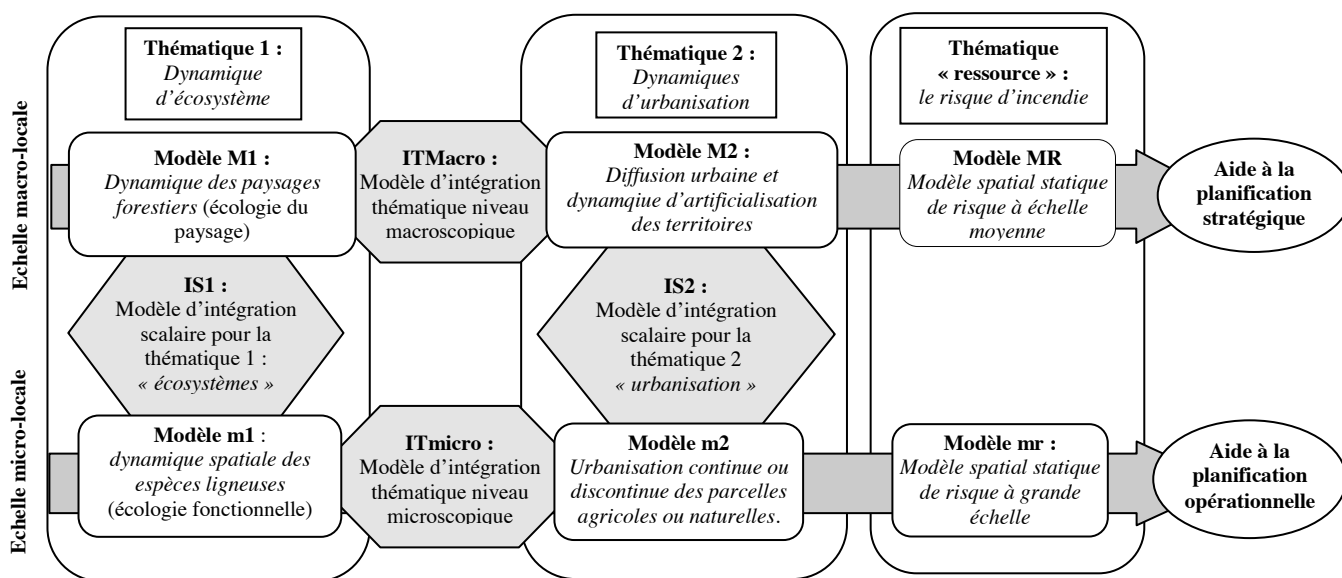


Figure 2. Cadre conceptuel de l'intégration : l'organisation des modèles d'intégration de modèles

Les modèles d'intégration de modèles ont pour but la mise en compatibilité sémantique de l'information produite par les différents modèles. Quatre modèles d'intégration de modèles doivent être spécifiés :

- deux modèles d'intégration thématique, soit un pour chaque niveau d'échelle (ITMacro et ITmicro).
- deux modèles d'intégration scalaire, soit un pour chaque thématique (IS1 et IS2).

Les modèles d'intégration de modèles doivent être spécifiés par l'utilisateur, en utilisant un cadre de spécification proposé par le système.

3.2. Le cadre conceptuel de spécification des modèles d'intégration

Un *cadre conceptuel de spécification* des modèles d'intégration est proposé (Maillé, 2008), organisé selon les trois vues du cadre conceptuel générique de représentation des systèmes spatio-temporels appelé triade de Peuquet, proposé par cet auteur en 1994 (Peuquet, 1994). Celui-ci propose la représentation du système selon trois vues : la vue sémantique, la vue spatiale et la vue temporelle. Par exemple, la vue sémantique d'un modèle d'intégration de deux modèles M1 et M2 peut être formalisée sous forme propositionnelle, comme illustré ci-après [1] :

$$\text{classeCI}_{\text{sémantiqueSM1}} \wedge_{\text{MI}} \text{classeC2}_{\text{sémantiqueSM2}} \rightarrow \text{classeCI}_{\text{sémantiqueSM1}} \quad [1]$$

Cette proposition s'interprète comme suit : lorsqu'une entité de classe C1 produite par le modèle M1 entre en interaction avec une entité de classe C2 produite par le modèle M2, une entité de classe CI est créée, appartenant à la sémantique (ensemble des classes) du modèle intégré. L'opérateur \wedge_{MI} , spécifique au modèle d'intégration, possède les propriétés de la conjonction. La vue spatiale permet de spécifier la dimension spatiale de l'interaction (en particulier les caractères spatiaux de l'entité générée en fonction des caractères spatiaux des entités initiales). La vue temporelle permet de spécifier la temporalité de l'interaction, en particulier l'impact de la chronologie des événements ayant affecté les entités initiales (notamment leur date d'instanciation) sur l'entité générée. Dans cet article, nous ne développons pas plus avant le cadre conceptuel de spécification des modèles d'intégration de modèles, qui fait l'objet de publications spécifiques (Maillé, 2008).

Mais outre ce niveau conceptuel, qui a pour but essentiel la levée des contraintes sémantiques de l'intégration, la spécification du système d'intégration recouvre aussi l'ensemble des éléments devant être spécifiés afin d'assurer l'interopérabilité des simulateurs en tant que systèmes logiciels, afin de permettre le développement d'un simulateur intégré composite mais cohérent, apte à répondre aux questions de l'utilisateur de façon efficace et fiable. Nous parlons, à ce niveau, d'intégration opérationnelle, dont l'objectif est la levée des contraintes syntaxiques de l'interaction entre les simulateurs, c'est-à-dire leur mise en interopérabilités, pour permettre le développement d'un outil opérationnel.

4. Implémentation, mise en œuvre et validation de la plateforme d'intégration Pyroxène.

Pyroxène est un prototype d'implémentation du système d'intégration thématique et scalaire de modèles de dynamique d'occupation du sol pour la simulation de l'évolution au cours du temps du risque d'incendie de forêt.

4.1. Principales caractéristiques générales du système d'intégration

Le système Pyroxene présente plusieurs caractéristiques majeures :

- Il s'agit d'un *système multi-agents d'intégration* développé en langage JAVA, sur la plateforme de développement de systèmes multi-agents cognitifs Tilab JADE, répondant à la norme FIPA (FIPA, 2001). L'intégration est réalisée au moyen d'agents adaptateurs, encapsulant les simulateurs spatiaux existants.
- Il s'agit d'un système distribué, partiellement architecturé selon la norme HLA (IEEE, 2000) autour d'une infrastructure de médiation centrale à base d'agents et de fédérés périphériques constitués par les simulateurs et les systèmes supports des fonctions de l'intégration.
- L'intégration se fonde sur l'exécution des modèles d'intégration thématiques et scalaires sur les systèmes d'information géographique matriciel GRASS ou vectoriel topologique ESRI ArcGIS ArcInfo Workstation.

L'implémentation de *Pyroxène* possède ainsi une structure figée permettant l'intégration des trois thématiques (écosystèmes, dynamiques urbaines et risque) et de deux niveaux d'échelle (micro-local et macro-local) (figure 3)

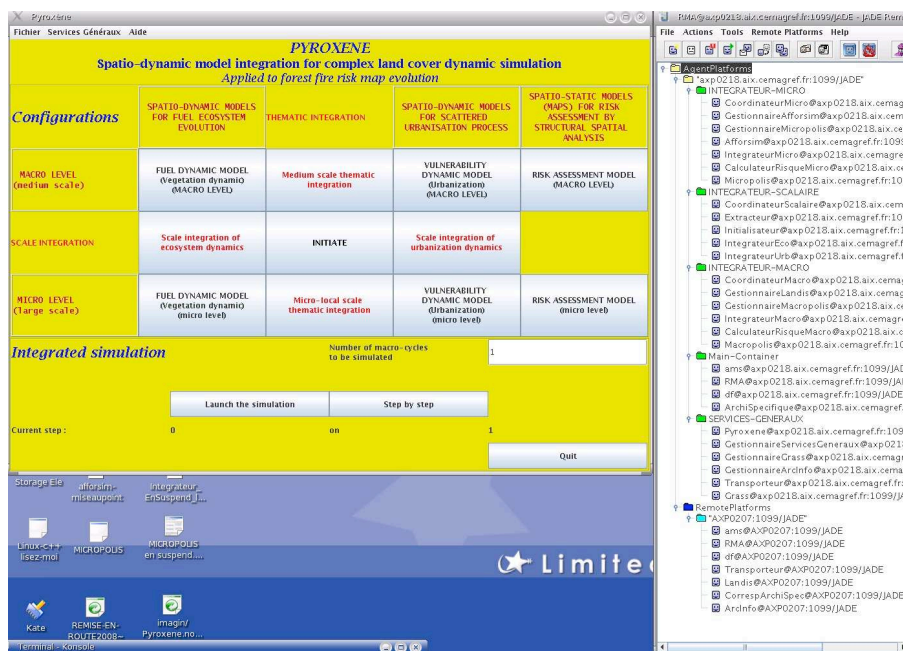


Figure 3. L'interface utilisateur de PYROXENE et modules du SMA d'intégration sous Tilab JADE

Pyroxene permet l'intégration de simulateurs de dynamiques spatialisées répondant à deux contraintes principales :

- ils doivent admettre en entrée et produire en sortie des couches d'information géographique « sémantiques », matricielles (classes) ou vectorielle.
- Ils doivent admettre en paramètre le nombre de cycles à simuler.

4.2. Elaboration des scénarios

L'élaboration de scénarios par l'utilisateur consiste en la définition de deux ensembles de données (figure 4) :

- les plans d'aménagements fournis à chacun des modèles sous la forme d'information géographique pour « contrôler le déroulement de la simulation ». Y sont spécifiés, par exemple, des zones d'exclusion pour l'installation de la forêt ou du bâti.
- Les valeurs de paramètres spécifiques à chacun des modèles, représentant l'environnement général (écologique, climatique, économique, etc.) de la simulation

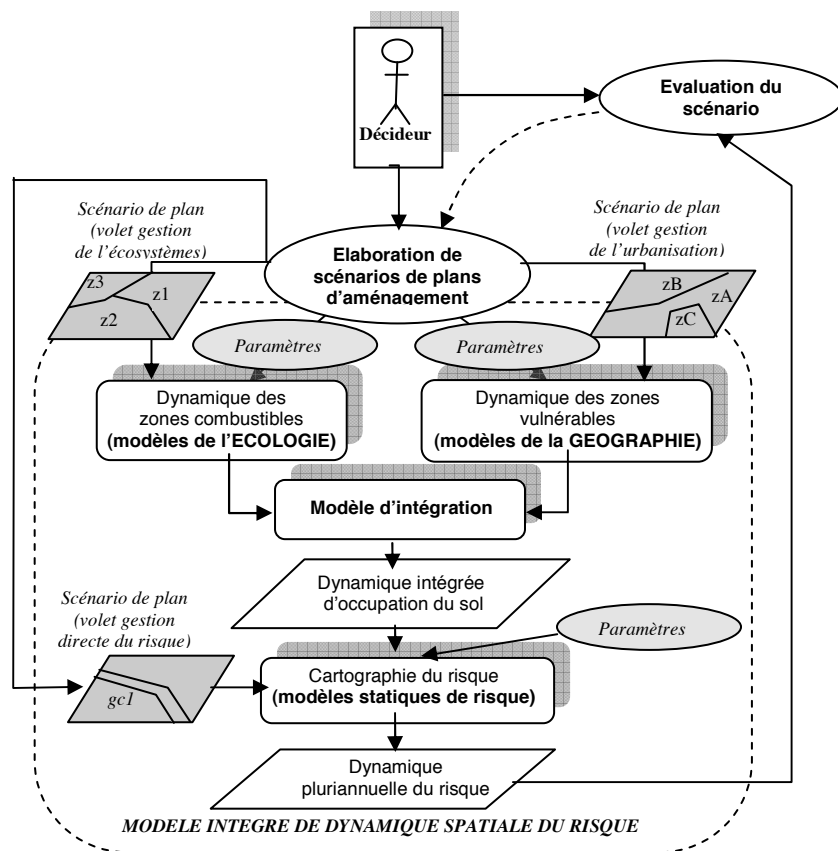


Figure 4. Cycles « élaboration des scénarios, simulation intégrée, évaluation des scénarios ».

Les plans d'aménagement élaborés dans le cadre des scénarios peuvent avoir pour objectif soit l'infléchissement des dynamiques spatiales, soit la limitation directe du risque : ils modifient les données d'entrée initiales des modèles thématiques. Par définition, chacune de leurs modalités sont datées (par exemple, installation d'une coupe de combustible *gc1* à compter de la date *d*).

Les paramètres sont eux strictement spécifiques de chacun des modèles initiaux et sont renseignés selon les modalités requises par leur simulateur respectif.

4.3. Fonctionnement de l'architecture à base d'agents

Outre le choix et la configuration des modèles de simulation, Pyroxene permet la gestion des simulations intégrées mais également la spécification par l'utilisateur des modèles d'intégration scalaire ou thématique.

Lors du lancement de la simulation intégrée, les divers agents échangent leurs messages afin de coordonner l'exécution par les différents systèmes logiciels des différentes tâches requises : simulations (par les simulateurs), exécution des modèles d'intégration (par les SIG), mise en forme syntaxique et échanges (transport) de données (par divers applicatifs ou protocoles), etc (figure 5).

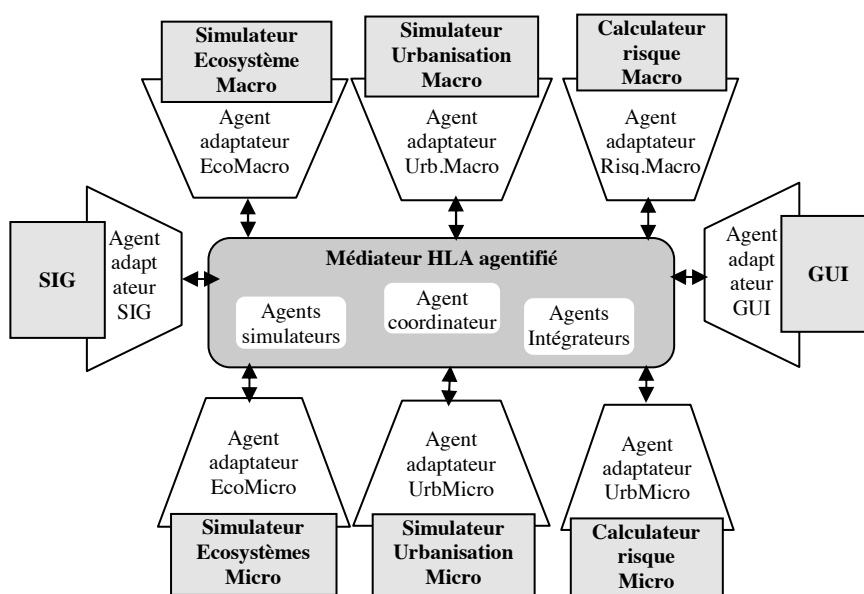


Figure 5. Architecture basée HLA du système multi-agents d'intégration

L'exécution au niveau du système d'information géographique des modèles d'intégration de modèles est opérée sous le contrôle d'agents *Intégrateur* (un agent intégrateur par thématique et par niveau d'échelle).

4.4. Mise en œuvre et validation

Pyroxene est actuellement mis en œuvre sur une zone expérimentale de la conurbation d'Aix-Marseille, regroupant 43 communes de la Communauté d'Agglomération du Pays d'Aix.

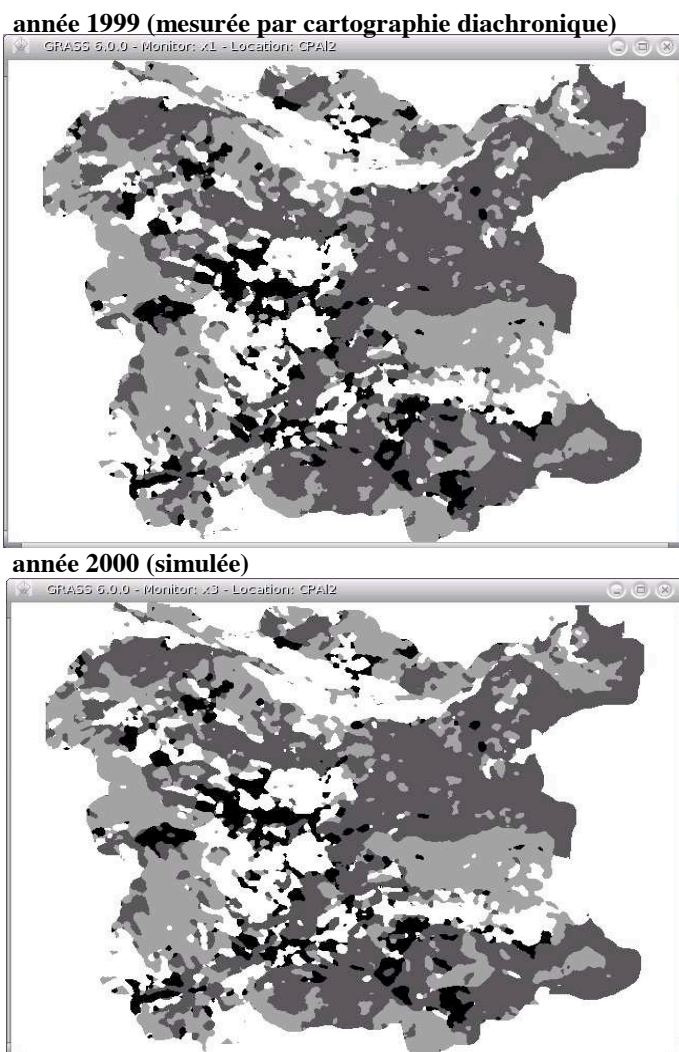
Dans la version actuelle du système, ce sont principalement les simulateurs de dynamique d'écosystème Afforsim (Prévosto & al., 2003), pour l'échelle micro-locale, et Landis II (Scheller & al., 2006), pour l'échelle macro-locale qui ont été testés. Les simulateurs des dynamiques d'urbanisation discontinue testés sont Micropolis et Macropolis (Maillé, 2008).

Les protocoles de validation de la dynamique du niveau de risque étant encore en cours de mise au point par les cindyniciens, la validation porte essentiellement sur la qualité de la représentation intégrée de la dynamique d'occupation du sol. La validation s'appuie sur la comparaison des simulations intégrées des dynamiques passées avec les résultats de travaux de cartographie diachronique à partir d'images télé-acquises (satellites et aériennes) (Maillé & al., 2005).

Il existe deux niveaux de validation : la validation des modèles initiaux, par thématique et par niveau d'échelle, puis la validation des simulations intégrées. Notre objectif actuel est essentiellement l'estimation de l'erreur issue de l'intégration elle-même, en éludant l'erreur des modèles initiaux.

Globalement, si les résultats simulés semblent cohérents avec les résultats expérimentaux d'un point de vue quantitatif agrégé, des écarts beaucoup plus importants sont révélés pour ce qui concerne les distributions spatiales. En particulier, les contours des zones d'extension non contraintes (urbaines ou forestières) semblent difficilement prédictibles. L'outil opérationnel semble donc utilisable dans une perspective d'aide à la décision stratégique agrégée, mais ne pourra probablement pas constituer l'unique outil d'aide à la décision de planification opérationnelle localisée.

Au travers de modèles de risque, Pyroxene permet finalement la représentation de l'évolution de la carte des niveaux de risque en fonction de la dynamique d'occupation du sol simulée (figure 6).



Légende :

□ Risque faible ou nul □ Risque modéré □ Risque moyen ■ Risque fort

Figure 6. Exemple de représentation de l'évolution des niveaux de risque par simulation intégrée

5. Conclusion

La gestion territoriale en général, et la gestion du risque en particulier, se fondent sur des connaissances multi-sectorielles, se rapportant le plus souvent à plusieurs niveaux d'échelles. L'intégration formelle de telles connaissances au sein des systèmes d'information a pour objectif d'assurer la cohérence de l'aide à la décision territoriale fournie par ces systèmes. Dans une perspective dynamique, et en particulier pour la planification territoriale, l'intégration de modèles dynamiques permet la représentation de l'interaction entre des processus représentés par des champs disciplinaires différents.

Nous proposons donc un système d'intégration de simulateurs de dynamique d'occupation du sol et de modèles statiques de risque capable de prendre en charge la mise en cohérence sémantique de modèles issus de champs disciplinaires variés et l'interopérabilité syntaxique de leur simulateur implémenté. Ce système présente la particularité de se fonder sur le paradigme *agents* en valorisant les capacités de traitement de l'information sémantiques des agents, ainsi que leurs capacités interactionnelles essentielles dans les démarches d'interaction.

La validation d'un tel système est une perspective de long terme, nécessitant tout d'abord la validation des modèles initiaux, puis la validation du modèle intégré de dynamique d'occupation du sol, et enfin la validation du modèle dynamique de risque. Ce travail doit s'appuyer sur une démarche expérimentale lourde associant les spécialistes des différentes disciplines mises en jeu et les informaticiens.

D'un point de vue opérationnel, le système n'a pas d'ambition prédictive, mais seulement prospective, en permettant aux aménageurs de comparer l'impact sur l'évolution du risque de différents scénarios de contrôle des dynamiques spatiales et d'aménagement du territoire. Il ne constitue pas l'unique outil d'aide à la décision pour la planification territoriale, mais doit être lui-même intégré dans une panoplie d'outils plus large, incluant des systèmes numériques opératoires aussi bien que des outils cartographiques et textuels traditionnels susceptibles d'intervenir dans l'interprétation globale des résultats.

6. Bibliographie

- Batty M. and Jiang B., « Multi-agent Simulation: Computational Dynamics within GIS », Innovation in GIS VII: Geocomputation, Martin D. and Atkinson P., Taylor & Francis, 2000, p. 55-71
- De Coligny F., "Efficient Building of Forestry Modelling Software with the Capsis Methodology.", In: Proceedings of Plant Growth Modeling and Applications PMA06, IEEE Computer Society, 2006, Fourcaud T, Zhang XP, eds., Los Alamitos, California: pp. 216-222
- Dubos-Paillard E., Guermont Y., Langlois P., « Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire », 2003, UMR 6063 IDEES, Laboratoire MTG Rouen
- Ellerkamp P., Etude de l'extension urbaine autour d'Avignon et de Montpellier de 1936 à 1999 par la simulation de dynamiques spatiales à l'aide de modèles cellulaires d'interaction locale, Thèse de Doctorat, Université d'Avignon, 2001.
- FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents), Agent Software Integration Specification, Doc. number XC00079B, 2001.
- IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1516-2000, Standard for Modeling and Simulation (MetS), High Level Architecture (HLA), 2000.
- Jappiot M., Blanchi R., Alexandrian D., « Cartographie du risque d'incendie de forêt : besoins, méthodes et données, essai de normalisation, *Actes des Journées GIS Incendie de Forêt*, Octobre 2000, Hyères.
- Langlois A., Phipps M., « Automates cellulaires. Application à la simulation urbaine. » Hermes. Paris, 1997.
- Maillé E., Bouillon C., Consommation des espaces agricoles et naturels par le processus d'urbanisation discontinue, Rapport de Recherche, Cemagref, Aix-en-Provence, 2005.
- Maillé E., Espinasse B., Un cadre de modélisation pour la simulation de dynamiques spatiales complexes, in. Actes du Colloque SAGEO07, Rencontres Internationales de Géomatique, 18-19 juin 2007, Clermont-Ferrand.
- Maillé E., Intégration conceptuelle et opérationnelle de modèles spatiaux-dynamique, Thèse de Doctorat, Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, 2008.
- Mouillot F., Rambal S., Lavorel S., A generic process-based simulator for Mediterranean landscapes (SIERRA): Design and validation exercises., in. *Forest Ecology and Management* 147: 75-97. 2001.
- Napoléone C., « Prix fonciers et immobiliers, et localisation des ménages au sein d'une agglomération, urbaine », thèse de Doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), GREQUAM, 2005.
- Peuquet D. J., "It' About Time: A Conceptual Framework for the Representation of Temporal Dynamics in Geographic Information System." *Annals of the Association of American Geographers* 84(3), 1994, Blackwell Publishers, pp.441-461