

Un cadre de modélisation pour la simulation de dynamiques spatiales complexes.

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

Eric Maillé*, Bernard Espinasse**

**Cemagref, Unité de Recherche Ecosystèmes Méditerranéens et Risques
Département Gestion des Territoires,
CS40061, Le Tholonet
13182 Aix en Provence cedex 5*

***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*

RESUME. Avec un objectif d'aide à la décision pour la planification territoriale, nous proposons un cadre de modélisation pour la simulation de l'évolution du risque lié à l'incendie de forêt. L'évolution du risque émane de deux dynamiques d'occupation du sol : la dynamique des écosystèmes combustibles et la dynamique des zones urbaines discontinues vulnérables. Le cadre prend en compte deux niveaux d'échelle. Pour chacune des dynamiques considérées et chacun des niveaux d'échelle, un modèle type est proposé et décrit. Le cadre définit aussi un type de modèle spatial statique de risque pour chaque niveau d'échelle. Enfin, les conditions de l'intégration des divers modèles sont envisagées.

ABSTRACT. With the aim of decision support for land planning, we propose a modelling framework to simulate forest fire risk level change. Forest fire risk change stems from two kinds of land cover change: fuel ecosystems dynamic and scattered vulnerable urban zones dynamic. The framework considers two scale levels. For each dynamic and each scale level, a typical model is proposed and depicted. The framework also defines, for each scale level, a kind of static spatial risk model. Finally, integration conditions of these models are studied.

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

De nombreux territoires locaux européens subissent des transformations radicales et de plus en plus rapides de leur paysage. L'urbanisation et la périurbanisation induisent des transformations spatiales peu réversibles. Ainsi, de plus en plus de gestionnaires considèrent l'artificialisation radicale des espaces comme la consommation d'une ressource non renouvelable.

En zone méditerranéenne, la dynamique d'urbanisation est doublée d'une dynamique de progression de l'espace forestier sur les espaces abandonnés par une agriculture en déclin. Parmi les conséquences directes de cette double évolution, l'augmentation du risque lié à l'incendie de forêt résulte de la rencontre de zones combustibles, les espaces forestiers, et des zones vulnérables, les espaces urbains ou périurbains.

La maîtrise du risque et de son évolution est l'une des priorités de l'aménagement des territoires locaux méditerranéens en voie d'artificialisation. La planification territoriale doit pour cela s'appuyer sur des outils prospectifs permettant l'anticipation de l'évolution du risque. Dans cette perspective nous proposons un cadre de modélisation logiciel pour l'implémentation et l'intégration de modèles disciplinaires permettant de simuler l'évolution du risque d'incendie liée aux dynamiques d'occupation du sol.

Dans la section 2 de cet article, nous détaillons la problématique de la modélisation des dynamiques spatiales complexes et de l'évolution du risque d'incendie. En section 3, nous proposons un cadre de modélisation composite, fondé sur l'intégration de modèles disciplinaires aptes à fournir chacun une représentation de l'une des dynamiques intervenant dans la problématique globale. La section 4 décrit chacun des modèles disciplinaires élémentaires, avant d'en expliciter l'articulation. En conclusion est envisagée la perspective d'une architecture d'intégration des modèles pour l'implémentation d'un outil d'aide à la décision intégré.

2. Démarche de 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, qui sont en particulier des espaces « urbains discontinus ». Ces dynamiques sont contrôlées par un système anthropique de régulation, au travers de plans d'aménagement. Le cadre de modélisation que nous proposons doit permettre aux décideurs de tester différents scénarios de plans, afin d'en évaluer l'impact, à terme,

sur le risque. La figure 1 explicite le lien entre les dynamiques spatiales et la dynamique du risque, ainsi que la limite du système à modéliser.

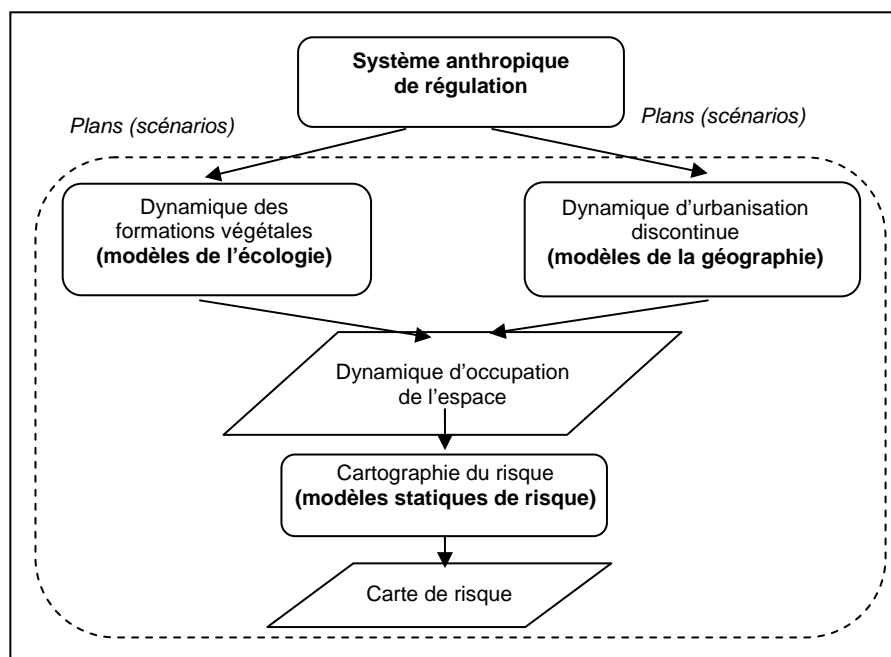


Figure 1. La limite (en pointillés) du méta-système à modéliser

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.

Fournir une représentation agrégée de ces différentes dynamiques dans le but de simuler l'évolution globale résultante se heurte à la nature très différente des processus à l'origine de ces dynamiques. Nous examinons les différents types de modèles disponibles pour la représentation des dynamiques spatiales en cause dans cette problématique.

2.1 Modélisation de la progression des zones combustibles

La progression du combustible relève essentiellement de processus écologiques. L'écologie fournit des modèles performants capables de représenter la dynamique des formations végétales combustibles, tant dans leurs structures que dans leur extension spatiale. Ces deux composantes relèvent d'ailleurs de deux types de modèles écologiques différents : les modèles dits « reproductifs » de l'écologie fonctionnelle, qui cherchent à représenter le processus de dispersion des graines autour de semenciers, et leur implantation en fonction des caractéristiques du milieu, sont bien adaptés à la représentation de l'extension spatiale des espèces (Prevosto *et al.*, 2003). Les modèles de séries écologiques, qui décrivent en un lieu donné, la succession des formations végétales, toujours en fonction du milieu, depuis le stade de pelouse herbacée jusqu'à la forêt constituée sont plus adaptés à la représentation de la dynamique d'un couvert végétal au cours du temps. Ils ne sont généralement pas implémentés sous la forme de véritables modèles dynamiques, mais formalisés en bases de connaissances. Enfin, l'écologie du paysage propose des modèles plus agrégés d'évolution spatiale d'écosystèmes « composites ». Ces derniers modèles s'appliquent le plus souvent à des échelles plus petites, s'approchant des échelles moyennes. Citons à titre d'exemple le modèle SIERRA (Mouillot *et al.*, 2001).

2.2 Modélisation de la dynamique des zones vulnérables

Pour ce qui est de l'artificialisation des espaces, les modèles dont l'objectif est la représentation de l'extension urbaine sont principalement produits par la géographie. Ils sont le plus souvent fondés sur la représentation du phénomène de diffusion spatiale, modulés ou non par les caractères géographiques des espaces sur lesquels elle se déroule. Les automates cellulaires sont particulièrement bien adaptés à l'implémentation de tels modèles de diffusion, notamment à échelle moyenne (Batty, 99). De très nombreux travaux les utilisent, tels que, à titre d'exemple, Dubos-Paillard (Dubos-Paillard, 2003) sur l'agglomération Rouennaise. L'approche fractale, bien que statique, est également utilisée, par la reproduction qu'elle permet d'une « figure initiale » (Frankauser *et al.*, 2006).

Les travaux portant spécifiquement sur la modélisation du processus d'urbanisation discontinue, en zone périurbaine et à grande échelle sont moins nombreux. L'économie spatiale nous propose certains modèles statiques susceptibles d'être utilisés dans une perspective dynamique : Napoléone (Napoléone, 2005) identifie des zones préférentielles d'implantation du bâti au travers de la variable « prix du foncier », élaborées à partir de caractères géographiques. Il envisage un modèle d'urbanisation diffuse fondé sur la « variable médiatrice prix » qui permettrait de hiérarchiser les zones d'urbanisation préférentielles à venir en fonction de leur potentialité en termes de prix.

2.3 Modèles de risques

L'évaluation du risque d'incendie en fonction de l'occupation de l'espace se fait grâce aux modèles cartographiques de risques. Quatre grandes approches de modélisation du risque d'incendie de forêt peuvent être distinguées (Maillé *et al.*, 2006a) : la modélisation analytique attributaire, la modélisation spatiale agrégée, la modélisation spatiale analytique et la modélisation fondée sur l'étude statistique des résultats de simulations multiples de propagation des incendies. Toutes ces approches de modélisation conduisent à l'élaboration, pour un territoire donné, d'une carte du risque. Il s'agit, dans tous les cas, de modèles statiques.

3. Le cadre de modélisation pour une représentation de la dynamique du risque

La modélisation de la dynamique du risque lié à l'incendie de forêt est une œuvre de longue haleine, dont la progression est intimement liée aux progrès des modèles thématiques produits notamment par l'écologie, la géographie ou la cyndinique. Notre objectif n'est donc pas la production d'un modèle définitif mais d'un cadre logiciel qui, sans être générique, facilite l'implantation de modèles thématiques particuliers susceptibles de contribuer à la résolution de notre questionnement. Ce cadre définit notamment les niveaux d'échelle considérés et les types de modèles à intégrer.

3.1. Deux niveaux d'échelles pour deux types d'aide à la décision

Tant les dynamiques d'occupation du sol que la cartographie du risque d'incendie peuvent s'appréhender à des échelles variées : le choix de l'échelle dépend de l'usage qui sera fait du modèle. En ce qui nous concerne, l'usage se situe au niveau de l'aide à la décision relative à la planification de l'occupation du sol. On peut en ce domaine distinguer deux types de planification se référant à des échelles spatiales et temporelles différentes : la planification stratégique et la planification opérationnelle.

L'aide à la *planification stratégique* (par exemple, pour l'élaboration des Schémas d'Orientations Territoriales – SCOT) s'accommode d'échelles assez petites pour lesquelles les phénomènes peuvent être appréhendés par des modèles 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 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 faisons référence à ce niveau d'échelle par le terme d'« échelle moyenne ».

La *planification opérationnelle* (typiquement l'élaboration des Plans Locaux d'Urbanisme - PLU, ou des Plans de Prévention des Risques - PPR) requière

l'intégration de modèles à grande échelle, pour laquelle sont appréhendées 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, susceptibles d'implémentation sous forme de systèmes multi-agents (Bousquet *et al.*, 2001), sont souvent bien adaptés à ce niveau d'échelle. Nous y faisons référence par le terme « grande échelle ».

3.2 Les types modèles à mettre en œuvre et leur articulation

La production d'un outil d'aide à la décision intégré, fondé sur la simulation, pour la gestion de l'évolution du risque d'incendie de forêt en lien avec la dynamique d'occupation du sol relève donc d'une problématique d'intégration de modèles. Le croisement des deux échelles requises pour une aide à la décision à deux niveaux, avec les trois champs thématiques impliqués dans la problématique nous conduit donc à un total de six modèles nécessaires, tous ayant une composante spatiale explicite, et quatre étant des modèles dynamiques. La figure 2 illustre ce cadre de modélisation global.

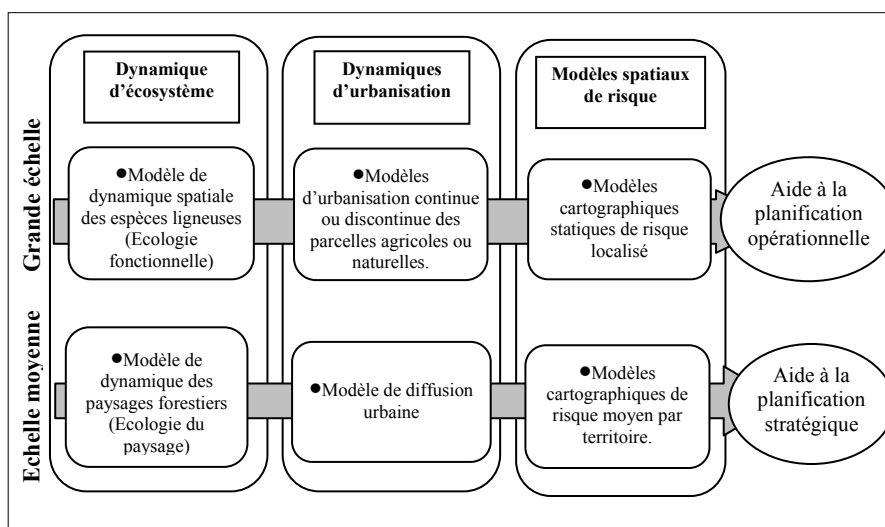


Figure 2. Le cadre de modélisation global

Nous examinons dans les sous-sections suivantes les principales composantes de ce cadre.

3.2.1 Représentation des dynamiques à grande échelle

Les modèles de dynamiques d'écosystèmes à grande échelle ont pour but de représenter la progression des formations végétales combustibles sur des parcelles agricoles ou des espaces pastoraux abandonnés initialement ouvertes ou semi-ouvertes. En situation de parcellaire complexe et morcelé, il n'y a pas de progression frontale de l'espèce ligneuse, mais plutôt une extension aréolaire autour de semenciers distribués au sein de la parcelle par les mécanismes de projection des graines. La situation de chaque individu a donc potentiellement une importance particulière, si bien que les approches de modélisation individus centrés sont souvent privilégiées.

Face à ce processus de progression des ligneux sur les parcelles abandonnées, un modèle d'urbanisation discontinue vise à représenter l'implantation du bâti individuel au sein ou à proximité de ces zones combustibles. Ce processus est régulé par la planification urbaine qui fixe les modalités de l'urbanisation, en termes notamment de localisation et de densité. A l'intérieur de ce cadre réglementaire, la dynamique est susceptible d'emprunter des trajectoires d'évolution très variées. C'est la rencontre entre cette évolution et la dynamique des ligneux combustibles qui détermine le niveau de risque. Celui-ci est évalué, à chaque pas de temps, en utilisant un modèle spatial de risque.

La planification opérationnelle de la gestion du risque requière des modèles à grande échelle capables de fournir une estimation du risque en tout point de l'espace. Les modèles de risque ne sont pas des modèles dynamiques mais permettent simplement d'évaluer un niveau de risque en fonction des caractères spatiaux d'un lieu géographique. Les variables intervenant dans ce calcul sont des variables spatiales durables (les variables à période courte, telles la température ou le niveau de dessiccation de la végétation n'entrent pas en ligne de compte dans cette perspective). Il s'agit soit d'attributs géographiques spécifiques du point (pente, exposition, etc.), soit d'indicateurs synthétiques de l'environnement du point (indices de l'analyse spatiale contextuelle notamment).

3.2.2 Représentation des dynamiques à échelle moyenne

A échelle moyenne, la dynamique spatiale à représenter, pertinente vis-à-vis du risque, est une dynamique de diffusion frontale de formations végétales ligneuses pluri-spécifiques. On ne s'intéresse plus aux individus mais aux associations végétales dans leur globalité et aux entités paysagères. Les modèles utilisés sont plus agrégés, en ce sens que leur dynamique se fonde sur les caractéristiques moyennes des peuplements forestiers ou des associations végétales.

A cette dynamique de diffusion des formations forestières s'oppose directement une dynamique de diffusion des espaces urbains. Les mécanismes fondamentaux sous-jacents à une telle diffusion sont assez difficiles d'accès, mais le processus peut être représenté par les formalismes pour lesquels la dynamique est uniquement déterminée par la relation de voisinage, de type automates cellulaires. Naturellement

la dynamique est modulée en tout point par la valeur de diverses variables spatiales (pentes, proximité de voies de communication, etc.)

Sur les couches d'information géographique résultant de ces deux types de dynamiques, est appliqué un modèle cartographique de risque. Dans la perspective d'aide à la décision pour la planification stratégique (non opérationnelle), on ne s'intéresse pas à un niveau de risque en tout point de l'espace mais à un niveau de risque moyen par territoire. Le calcul d'un risque moyen par territoire nécessite la définition d'un modèle de risque spécifique à l'échelle et à l'objectif d'aide à la décision poursuivi.

3.2.3 *Articulation entre les modèles thématiques*

Pour un même niveau d'échelle, la relation entre les modèles thématiques dynamiques, c'est-à-dire entre les modèles d'écosystèmes et d'urbanisation, est, par hypothèse, de type concurrentielle. Les deux types de modèles opèrent de façon concurrente sur une même ressource : l'espace géographique. L'ensemble des modalités de cette relation concurrentielle doivent être définies pour chacun des niveaux d'échelle dans le cadre de nouveaux modèles que l'on peut appeler « *modèles d'intégration thématique* ». Dans une première approche de prototypage, on peut émettre l'hypothèse d'un modèle d'intégration très simple, dans lequel les dynamiques d'urbanisation sont absolument surdéterminantes des dynamiques d'écosystèmes. Ainsi, une parcelle agricole abandonnée ne peut devenir forestière que si elle n'est pas urbanisée « entre temps ». Mais il sera nécessaire, à terme, d'envisager des modèles d'intégration thématiques beaucoup plus complexes, prenant en compte, notamment, la perturbation « à distance » induite par l'un des processus sur l'autre. C'est en particulier le cas de la perturbation, bien connue des écologues, de la dynamique des écosystèmes forestiers induite par la proximité de zones urbaines (due, par exemple, au piétinement lié à la sur-fréquentation) : les milieux sur lesquels opèrent les modèles écologiques doivent être modifiés autour des zones urbanisées, alors qu'il ne s'agit pas là d'une sortie « standard » des modèles d'urbanisation. Un modèle médian plus complexe « d'intégration thématique » est donc bien nécessaire.

3.2.4 *Articulation entre les niveaux d'échelle*

Répondant à deux niveaux d'aide à la décision différents - aide à la décision pour la planification stratégique dans le cas des échelles moyennes, aide à la décision pour la planification opérationnelle dans le cas des grandes échelles - les deux niveaux scalaires peuvent rester relativement indépendants. Pourtant l'intégration des deux niveaux d'échelle est requise pour des raisons pratiques. Il est en effet peu réaliste et surtout inutile de mettre en œuvre des modèles individus-centrés, nécessairement coûteux en ressources de calcul, sur des grandes extensions géographiques, ou simplement sur des zones inadaptées (inconstructibles, déjà forestières, etc.). Au contraire, ces sessions de simulation doivent être concentrées sur des zones critiques en termes de risque d'incendie. Ainsi, les simulations aux échelles moyennes sont-elles nécessaires à la définition de zones critiques

d'interface sur lesquelles peuvent être mis en œuvre les modèles aux grandes échelles. Là aussi, la définition de *modèles de localisation* (définition des zones critiques, prise en compte de la constructibilité) est requise.

3.2.5 Temporalité

Tant les processus écologiques que de dynamique urbaine sont lents, leurs effets n'étant réellement mesurables que d'une année sur l'autre. Le pas de temps annuel est privilégié, pour l'ensemble des modèles. Pour l'aide à la décision, la durée pertinente des sessions de simulation doit rester compatible avec la durée moyenne d'un plan d'aménagement, c'est-à-dire de l'ordre de la décennie. Naturellement, dans une perspective cognitive d'étude du comportement des modèles thématiques et des interactions entre modèles, l'utilisateur « chercheur » opérera des sessions de simulation beaucoup plus longues.

4. « Instanciation » du cadre de modélisation : prototypes de modèles et intégration

Le cadre de modélisation présenté en section 3 est en cours d'implémentation en utilisant quatre modèles dynamiques adaptés à la problématique. Les deux modèles de dynamique d'écosystème sont des modèles pré-existants, alors que les deux modèles d'urbanisation ont été spécifiquement développés pour l'application. Dans ces deux derniers cas, il ne s'agit pas de véritables modèles aboutis mais de « prototypes de modélisation » pour lesquels une partie de la structure interne du modèle et l'ensemble calibrage et de la validation doivent être réalisés par les chercheurs thématiques. Notre cadre de modélisation ainsi prototypé demeure un outil d'aide à la modélisation thématique intégrée, pluri-disciplinaire, s'adressant d'abord aux chercheurs avant un transfert ultime vers les décideurs.

4.1 Modèles types à échelle moyenne.

A l'échelle « macro » nous proposons le prototype de modélisation MACROPOLIS pour représenter les dynamiques de changement d'usage des sols, et le modèle LANDIS pour représenter la progression de l'espace forestier. Il s'agit dans les deux cas de modèles stochastiques, fonctionnant sur des plateformes différentes. Le risque est évalué par des indices de structures topologiques. La figure 2 résume l'articulation entre les différents modèles de moyenne échelle.

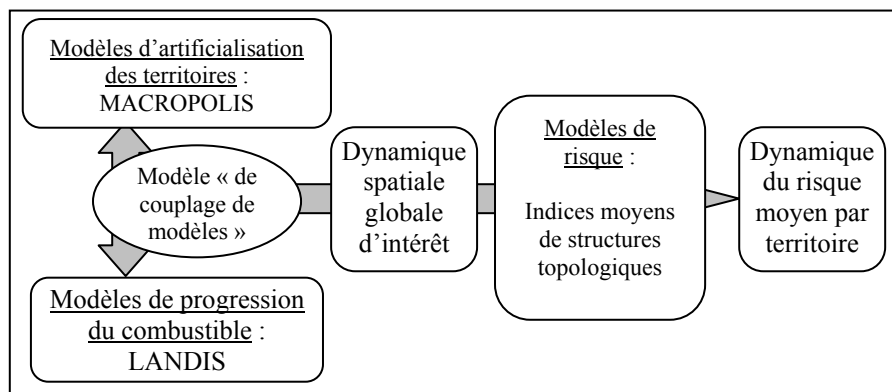


Figure 2. Articulation des modèles types à échelle moyenne

4.2.1 Le cadre logiciel MACROPOLIS

Il s'agit d'un cadre logiciel, développé dans un environnement de système d'information géographique, pour la modélisation de l'artificialisation de l'espace à moyenne échelle. Il est dédié à l'implémentation de modèles diffusifs globaux fondés sur la notion de probabilité de transition. Il a été spécifiquement développé pour l'application. Il nécessite une carte matricielle d'occupation du sol établie selon une nomenclature en un nombre fini de postes. Chacun des postes représente un état potentiel de la cellule. La cellule est par ailleurs caractérisée par une liste d'attributs invariants.

A chaque pas de temps, est calculée une probabilité de transition d'état en fonction :

- de l'état de la cellule, résumé par le seul attribut d'occupation du sol
- d'attributs géographiques invariants (qui ne dépendent pas et ne définissent pas l'état de la cellule), en particulier la constructibilité, ou d'autres caractères géographiques invariants (pente, orientation, etc.).
- de l'état des cellules de son environnement, dans un rayon de voisinage déterminé.

Pour chacun des états, une matrice de probabilité de transition vers un autre état doit être calibrée par l'utilisateur. Ces probabilités affectées à chacune des cellules sont pondérées par la valeur des attributs géographiques locaux invariants. En particulier, la couche d'information géographique représentant les plans locaux d'urbanisme permet d'interdire les transitions vers les états urbains de zones non constructibles.

On obtient ainsi des probabilités de transitions d'état « intrinsèques », liées seulement aux attributs de la cellule elle-même. Celles-ci sont ensuite modulées par des indices de l'analyse spatiale contextuelle, caractérisant l'environnement spatial de la cellule dans un rayon de voisinage déterminé : par exemple, pour calculer la probabilité de transition d'un état « agricole pérenne » vers un état « urbain

continu », on cherchera la fréquence des cellules « urbain continu » dans un environnement donné. D'autres indices matriciels sont utilisés tels que l'agrégation ou l'indice d'entropie de Shannon. Il est aussi possible de définir des indices de relations spatiales avec des entités géographiques vectorielles tels que la proximité aux axes de communication.

Chacun des indices est affecté d'un poids qui permet d'en régler l'effet sur la probabilité de transition globale. La transition la plus probable est ensuite randomisée afin de déterminer de façon non déterministe la transition qui aura effectivement lieu, si elle a lieu. Enfin, un tirage aléatoire est effectué pour déterminer l'effectivité de la réalisation de la transition la plus probable, à chaque pas de temps.

Ce cadre logiciel demeure un outil d'aide à l'élaboration de modèles de dynamique spatiale fondé sur l'analyse contextuelle. Un prototype démonstrateur a été développé, utilisant une nomenclature en 13 postes¹. Un pré-calibrage du modèle est réalisé grâce à des travaux de cartographie diachronique réalisés sur la période 1988-1999 sur l'extension de la Communauté du Pays d'Aix-en-Provence (Maillé *et al.*, 2005). MACROPOLIS est développé sous le SIG GRASS et doté d'une interface de pilotage en langage Java.

4.2.2. Le modèle LANDIS-II

Le modèle LANDIS-II (Scheller *et al.*, 2006) permet la simulation de la progression spatiale d'une forêt pluri-spécifique à échelle moyenne. Il se fonde principalement sur la notion de succession écologique.

L'espace est divisé en cellules carrées d'égale dimension, dont certaines sont actives, celles où la forêt peut s'installer, et d'autres sont inactives (surfaces en eau, surfaces agricoles, surfaces artificialisées). Les cellules actives appartiennent à un « type de milieu » (land type), caractérisé un coefficient d'installation potentielle pour chaque espèce.

Les noyaux forestiers initiaux sont alors installés sur la grille. La population de chacune des espèces est caractérisée par des critères physiologiques simples, tels que la longévité, l'âge de maturité sexuelle, le rayon de distribution des semences, etc., et surtout par la distribution en classe d'âge. Le modèle LANDIS permet aussi l'introduction de perturbations telles que les feux de forêt, les événements climatiques ou la récolte du bois.

LANDIS est un modèle autonome (indépendant de tout autre applicatif), écrit dans le langage C# et fonctionne dans un environnement Microsoft Windows® .NET Framework®.

¹ Urbain continu, Urbain discontinu périphérique, Zone Industrielles et Commerciales, Routes, Chantier, Espace Agricole Annuel, Espace Agricole Pérenne hors vigne, Vignes, Friche et Espace Agricole Complexe, Forêt, Espace Naturel Semi-Ouvert, Interface, Surfaces en Eau.

4.2.3 Modèle de risque à échelle moyenne

A échelle moyenne, dans une perspective d'aide à la planification stratégique, l'objectif est l'évaluation globale moyenne du risque d'un territoire local telle une commune ou un quartier de commune, dans une démarche de comparaison des territoires. Nous posons l'hypothèse que l'estimation du risque peut se fonder sur une estimation globale de la structure spatiale du territoire (Maille *et al.*, 2005). On utilise pour cela une approche vectorielle pour le calcul d'indicateurs structuraux du territoire. Trois types d'indices vectoriels sont considérés : les indicateurs surfaciques, qui estiment les taux de surfaces combustibles par rapport aux taux de surface vulnérables sur un territoire, les indicateurs morphologiques, qui visent à estimer la complexité moyenne de la forme des entités géographiques (exemple : indice de Miller ou de Patton), et les indicateurs topologiques qui ont pour objet la mesure de la complexité moyenne de la relation topologique existant entre les entités (par exemple l'indice d'imbrication des espaces combustibles et des espaces vulnérables). Bien que les modèles reliant formellement ces indicateurs structuraux au niveau précis de risque d'incendie soient encore très loin d'être aboutis, la théorie de la « modélisation globale » du risque (Jappiot *et al.*, 2003) nous conduit à considérer ces différents indices de l'analyse spatiale vectorielle comme des indicateurs candidats du niveau de risque à moyenne échelle. Ces modèles de risque sont toujours implantés sur système d'information géographique.

4.2. Modèles types à grande échelle.

Nous proposons l'intégration de 2 modèles types permettant une simulation des dynamiques spatiales déterminant l'évolution du risque d'incendie, à grande échelle : le Système Multi-Agents MICROPOLIS, pour représenter la dynamique d'urbanisation discontinue, et le modèle AFFORSIM (Prevosto *et al.*, 2003), pour représenter la dynamique d'enforestation. Le risque est estimé par des indices de l'analyse spatiale contextuelle (raster). La figure 3 montre l'articulation entre ces trois types de modèles.

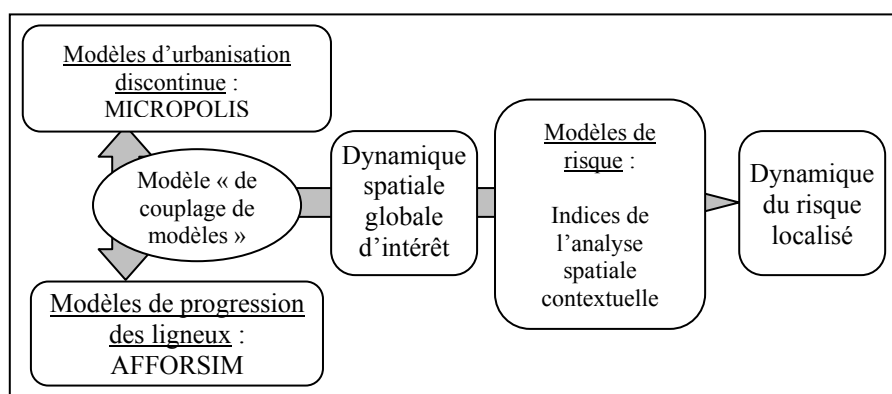


Figure 3. Articulation des modèles types à grande échelle

4.2.1 Le Système Multi-Agents MICROPOLIS

Le Système Multi-Agents MICROPOLIS, spécifiquement développé pour notre application (non publié), est un prototype représentant une métaphore du système social qui conduit à la formation des structures urbaines discontinues qui caractérisent les espaces complexes d'interface. Il tente de reproduire, d'une part les transactions foncières aboutissant à l'implantation du bâti sur les parcelles constructibles, et d'autre part le morcellement des parcelles initialement agricoles ou forestières pour la mise sur le marché de lots de surface adaptée à la construction.

A l'instant t_0 , l'espace est représenté par deux couches d'informations géographiques, l'une représentant l'occupation du sol, l'autre la propriété foncière (cadastre). Sur cet espace interviennent alors cinq classes d'agents sociaux et deux classes d'agents spatiaux (Rodriguez *et al.*, 2002) différents.

Les principaux rôles des agents sociaux sont les suivant :

- *l'agent Aménageur* a principalement un rôle de coordination,
- *les agents Propriétaire* mettent en vente des parcelles ou des fractions de parcelles,
- *les agents Acheteur* négocient avec les propriétaires puis bâtissent,
- *les agents Lotisseur*, sont des intermédiaires possibles entre les propriétaires et les acheteurs. Ils lotissent les parcelles initiales, et pratiquent la spéculation.
- *les agents Géomètre* découpent les parcelles à bâtir en fonction des règlements d'urbanisme, sur demande d'un propriétaire ou d'un lotisseur.

Les agents spatiaux sont chargés de l'optimisation des opérations spatiales demandées par les agents sociaux :

- *les agents Parcelle* (il en existe plusieurs classes) assurent l'optimisation de la fonction spatiale qui leur est assignée : optimisation de la forme des parcelles découpées, optimisation de la dissolution de limites entre parcelles pour aboutir à une surface la plus proche possible de celle requise par le plan d'urbanisme.
- *les agents Bâti*, enfin, constituent une classe qui assure l'optimisation du positionnement géographique des bâtis individuels en fonction de la position des autres bâtis et d'un cahier des charges fourni par le constructeur (qui est soit un acheteur soit un lotisseur).

L'objectif de l'intégration de ce SMA dans un cadre de modélisation plus large est la possibilité du calcul, à chaque pas de temps, d'indices de structures susceptibles d'intervenir dans les modèles de risque.

Au stade actuel de la recherche, MICROPOLIS doit être considéré comme un prototype de modélisation plus que comme un modèle dynamique à part entière. Inspiré de travaux en économie, son instanciation opérationnelle devra être réalisée par les économistes. C'est notamment le cas du protocole de négociation entre les agents sociaux qui devra être élaboré. Il reste par ailleurs un modèle « théorique », en ce sens qu'il n'est pas validé sur un terrain expérimental précis.

Le prototype est développé dans le langage Java, sur la plateforme de développement à base d'agents JADE.

4.2.2. *Le modèle AFFORSIM*

AFFORSIM (Prevosto *et al.*, 2003) est un modèle individus-centré de diffusion des ligneux sur les espaces agricoles abandonnés. Le modèle est conçu comme un laboratoire virtuel permettant d'étudier la distribution spatiale des formations arborées pionnières. Les individus sont des arbres, répartis sur un espace divisés en cellules. Il s'agit d'un modèle écologique fondé sur la description des mécanismes de la reproduction des espèces, en particulier la distribution des gaines autour des semenciers. L'ensemble des paramètres du modèle doivent être adaptés aux espèces d'intérêt et au milieu sur lequel il est utilisé. Pour notre application, il doit en particulier être adapté par les écologues à l'espèce pin d'Alep (*Pinus Alepensis*). AFFORSIM est un modèle autonome (indépendant de tout autre applicatif), développé en langage C++.

4.2.3 *Les modèles de risque « spatiaux agrégés » à grande échelle*

Les modèles de risque les mieux adaptés à l'évaluation de l'évolution du risque d'incendie en fonction des dynamiques spatiales sont les modèles spatiaux agrégés (ou modèles globaux). Ils tentent évaluer en tout point de l'espace la relation existant entre les zones combustibles et les zones vulnérables (Jappiot *et al.*, 2003). Il s'agit en fait de modèles statiques, calculables à chaque pas de temps de la session de simulation, sur une couche d'information géographique matricielle produite par les modèles dynamiques.

Lampin (Lampin *et al.*, 2005) développe un modèle de type multicritères, qui doit permettre une estimation du risque à partir d'une typologie des interfaces habitat-forêt. Cette typologie est fondée sur la combinaison statistique de plusieurs indices de l'analyse spatiale contextuelle, en particulier les mêmes indices d'agrégation habitat/forêt et de diversité de Shannon que les indices utilisés dans le modèle MACROPOLIS. Bien que le modèle soit encore en cours de développement, nous utilisons les indices de l'analyse spatiale contextuelle comme évaluateurs agrégés du niveau de risque, à grande échelle.

4.3 **La mise en œuvre informatique et intégration.**

A partir des différents prototypes et modèles précédemment décrits, notre objectif de proposer un outil informatisé d'aide à la décision multi-échelle pour la gestion du risque d'incendie recouvre donc plusieurs problématiques de multi-simulation. La figure 4 illustre les deux axes principaux d'intégration des modèles à considérer.

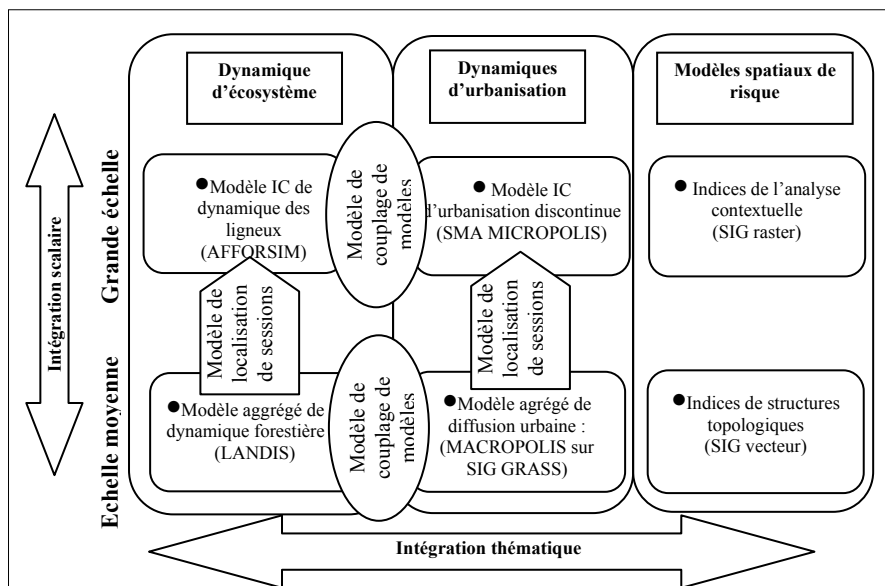


Figure 4. Les deux axes principaux d'intégration des modèles à considérer

Au plan informatique, les deux principaux axes se traduisent par plusieurs composantes de l'intégration à prendre en compte, telles que la « composante système », étant donnée l'hétérogénéité des environnements d'implantation des modèles utilisés, la composante « données », qui se réfère plus spécifiquement à la formalisation du transfert des données d'un modèle à l'autre (Duboz, 2004), la composante scalaire, spécifique à la dimension spatiale, sans référence particulière à la granularité du modèle, et enfin, la composante temporelle qui pose la question de la synchronisation des différents modèles dynamiques (Fianyo, 2001).

La couverture de l'ensemble de ces composantes de l'intégration suppose de s'appuyer sur une architecture apte à prendre en compte les dimensions spatiales, temporelles et sémantiques des différents modèles. Nous proposons de nous appuyer sur la plateforme d'intégration à base d'agents IMAGIN proposée par le LSIS² (Serment, 2006). Fondée sur la combinaison d'une architecture d'interopérabilité par invocation de service, répondant au standard de la FIPA³, et d'une architecture d'interopérabilité par échange de données répondant au standard dédié au couplage de modèles de simulation HLA⁴, cette plateforme facilite la formalisation des échanges sémantiques entre les modèles, la gestion de leurs temporalités et la gestion des conflits susceptibles d'intervenir.

² Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes

³ Foundation for Intelligent Physical Agents

⁴ High Level Architecture

Ainsi, l'outil permet de recouvrir, en l'adaptant à notre problématique spécifique, l'ensemble des composantes de la problématique d'intégration de modèles, en particulier les composantes « système » et « données ». La mise en œuvre concrète de cette intégration est en cours de finalisation, et plus spécifiquement traitée dans l'article (Maillé *et al.*, 2006b).

5. Conclusion

Nous proposons un cadre de modélisation pour la simulation de l'évolution, à moyen terme, du niveau de risque lié à l'incendie de forêt, due aux changements d'occupation du sol. Ce cadre utilise quatre modèles de dynamiques spatiales répartis sur deux niveaux d'échelle. A chaque niveau d'échelle est associé un modèle cartographique statique permettant l'évaluation du risque.

La demande récurrente, exprimée par les aménageurs, d'outils prospectifs d'aide à la décision pour la planification de l'aménagement des territoires locaux ne peut être satisfaite que par le développement de modèles thématiques valides. Ce cadre de modélisation s'adresse avant tout aux chercheurs « thématiciens, » avec pour premier objectif de faciliter l'implémentation de modèles disciplinaires, susceptibles de répondre à notre questionnement spécifique.

Mais ce cadre a aussi pour objectif l'association de plusieurs modèles thématiques nécessaires à la représentation d'un phénomène composite, intégrant plusieurs processus sous-jacents, susceptibles d'être appréhendés à plusieurs niveaux d'échelle. Plusieurs axes d'intégration doivent donc être envisagés (axe thématique, axe scalaire, axe temporel, etc.), au travers de la formalisation de « modèles d'intégration » nécessairement pluri-disciplinaires.

L'intégration informatique de ces modèles et leur mise en œuvre pour la simulation dans leurs environnements spécifiques, requière la maîtrise des échanges syntaxiques et sémantiques d'informations entre les modèles, de leur temporalité respective et leur synchronisation, ainsi que de leur conflictualité éventuelle. Notre démarche d'intégration repose sur la plateforme à base d'agents IMAGIN, qui, par le couplage intelligent de modèles qu'elle autorise, permet de supporter les aspects critiques de l'intégration.

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
- Bousquet F., Le Page C., Müller J.P., *Modélisation et simulation multi-agent*, CIRAD, Montpellier, 2001
- Dubos-Paillard E., Guermond Y., Langlois P., « Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire », 2003, UMR 6063 IDEES, Laboratoire MTG Rouen
- Duboz R., « Intégration de modèles hétérogènes pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes, Application à la modélisation multi-échelle en écologie marine » Thèse de Doctorat, 2004, Laboratoire d'Informatique du Littoral, Université du Littoral Côte d'Opale
- Fianyo Yawa Edem, *Couplage de modèles à l'aide d'agents : le système OSIRIS*, thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne, 2001.
- Frankhauser P. & al., « Morphologie des villes émergentes en Europe à travers les analyses fractales », *Rapport de Recherche*, 2000.
- 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, 2003, p. 69-81.
- Lampin C, Jappiot M, Long M, Borgniet L et Dumas E. SIG, analyse spatiale : Outils de caractérisation et cartographie des interfaces habitat-forêt. Colloque international SAGEO 2005, Avignon
- Maillé E., Bouillon C., « Conosmmation des espaces agricoles et naturels par le processus d'urbanisation discontinue. Diagnostic comparé des territoires du Pays d'Aix », rapport, Cemagref, 2005.
- Maillé E., Espinasse B., « Vers un outil d'aide à la décision pour l'estimation de l'évolution du risque d'incendie par modélisation et simulation de dynamiques spatiales », rapport interne de recherche, LSIS, Cemagref Aix en Provence, 2006 (a).
- Maillé E., Espinasse B., « Decision support for forest fire risk evaluation: Dynamic modelling and Spatio-Temporal Integration », in. IEEE-ISEIM 2006, International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Areas, Corte, France, 2006 (b).
- Mouillot F., Rambal S., Lavorel S. A generic process-based simulator for Mediterranean landscapes (SIERRA): Design and validation exercises. *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.

Prévosto B., Hill D., Coquillard P., Individual-based modelling of *Pinus sylvestris* invasion after grazing abandonment in the French Massif Central, *Plant Ecology* 168:121-137, 2003, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, p. 121-137.

Rodriguez A., Raper J., 2002, « Defining spatial agents », *Spatial Multimedia and Virtual Reality Research*, 2002, Monograph, Taylor and Francis, Centro Nacional de Informacao Geographica, Lisboa, Portugal

Serment J., Espinasse B., Tranvouez E., « Vers une infrastructure d'intégration pour le développement de systèmes d'aide à la décision environnementale », *6^{ième} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation – MOSIM'06*, 3-5 avril 2006, Rabat, Maroc

Scheller M.R., Domingo J.B., « LANDIS-II Core Model Description » & « Landis-II Models v5.1 User Guide », landis.forest.wisc.edu, 2006