Développement durable et territoires

Économie, géographie, politique, droit, sociologie

Vol. 1, n° 2 | Septembre 2010

Paysage et développement durable

Revue critique de trois outils de modélisation intégrée du territoire et de l'environnement pour la planification en Amérique du nord

*A critical review of three modeling tools for regional and environmental
planning : A 25 years research experience in North America*

Jean-François Guay et Jean-Philippe Waaub

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/developpementdurable/8566>

DOI : 10.4000/developpementdurable.8566

ISSN : 1772-9971

Éditeur

Association DD&T

Référence électronique

Jean-François Guay et Jean-Philippe Waaub, « Revue critique de trois outils de modélisation intégrée du territoire et de l'environnement pour la planification en Amérique du nord », *Développement durable et territoires* [En ligne], Vol. 1, n° 2 | Septembre 2010, mis en ligne le 23 septembre 2010, consulté le 02 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/developpementdurable/8566> ; DOI : 10.4000/developpementdurable.8566

Ce document a été généré automatiquement le 2 mai 2019.

Développement Durable et Territoires est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 4.0 International.

Revue critique de trois outils de modélisation intégrée du territoire et de l'environnement pour la planification en Amérique du nord

A critical review of three modeling tools for regional and environmental planning : A 25 years research experience in North America

Jean-François Guay et Jean-Philippe Waaub

- 1 *Sensu lato*, on entend par *gestion*, la direction et le contrôle des affaires humaines (Lang et Armour, 1980). Il s'agit d'un processus qui englobe quatre fonctions connexes : (1) la *planification* soit la formulation d'objectifs en vue d'atteindre des buts, l'élaboration et la sélection de plans d'action possibles pour cette atteinte ; (2) l'*organisation* des activités, des relations, des opérations ; (3) la *direction* permettant de mobiliser, informer ; et (4) le *contrôle* servant l'évaluation et le suivi des projets, la rétroaction. Comme fonction de base de la gestion, la planification peut être considérée comme étant l'ajout de rationalité à la prise de décisions collectives aux échelles infranationales de l'État central (Proulx, 2008).
- 2 La planification territoriale est l'objet de débats nombreux. Si traditionnellement le processus est centré sur la gestion réglementaire de l'espace et la maîtrise de la croissance urbaine, cette approche plus radicale ne fait aujourd'hui plus recette (IGU, 2008). D'un autre côté, la planification stratégique (Caron et Martel, 2005 ; Simard et Gagnon, 2007) fixe comme objectif le positionnement essentiellement économique des métropoles. À cet égard, elle se voit reprocher la faible prise en compte des impératifs de préservation de l'environnement et de développement durable bien que éléments soient mieux intégrés que par le passé dans le processus. La planification participative (Margerum et Born, 1995 ; Slocombe, 1998) d'une facture plus récente, intègre mieux que par le passé, les différents champs sectoriels de l'action publique (déplacement, urbanisme, environnement, paysage...). Toutes ces « mutations » se sont traduites par la

recherche de nouvelles façons de penser et de traiter un espace. Aujourd'hui, la planification territoriale est synonyme d'approches plus négociées, plus souples, plus intégrées et plus évolutives.

- 3 La planification environnementale par ailleurs est une branche de la planification territoriale qui, depuis les années 1970, s'est préoccupée de l'intendance collective d'une société donnée sur ses ressources (Selman, 2000). Les objectifs de planification environnementale englobent de manière générale l'intégration des considérants traditionnels du développement urbain (transport, localisation spatiale, distribution des services) avec celle des réserves biophysiques à l'origine de la production des biens et services attribuables aux écosystèmes et qui constituent le capital naturel (Boumans et al. 2002). Cette forme de planification vise le développement futur de l'espace géographique selon des visions autres que celles, purement économiques, concernant la localisation et la gestion, et traditionnellement considérées par les urbanistes.
- 4 Globalement, le processus de planification doit produire des idées et non pas uniquement de l'information. Cela est particulièrement vrai en planification « participative » où tout le processus de planification doit être intégré, un dessein qui passe par une compréhension, par les acteurs, par des outils et procédés, et menant à la décision. La légitimité des experts est directement tributaire de cet apprentissage social, lequel par ailleurs ne remet pas du tout en cause l'expertise, mais la rend davantage intelligible. L'utilisation de la connaissance scientifique demeure toutefois prescrite en planification bien que celle-ci doit être cadrée en fonction d'enjeux bien définis. La dérive d'une planification davantage communicationnelle serait d'évacuer les outils de connaissance et d'évaluation pour donner toute la place aux « discussions ». Ainsi, la réalisation d'études mandatées par des parties prenantes et ciblées prioritairement sur des enjeux doit être privilégiée, plutôt que de viser à ce que toute l'information soit connue a priori comme dans le « comprehensive planning ».
- 5 Une planification participative mais qui utiliserait à bon escient les outils de connaissance et d'évaluation, se positionnerait vraisemblablement dans le même courant que la démarche que Berke et al. (2006) nomment « intelligence planning » et au sein de laquelle l'information est structurée en concomitance avec des outils informatiques d'analyse, de synthèse et de simulation afin de permettre au praticien de générer une « intelligence » i.e. déterminer les enjeux qui seront ultimement sollicités par les parties prenantes au cours du processus de prise de décision. Le processus n'a pas pour but de se substituer aux décideurs en leur proposant des solutions « toutes faites » mais plutôt à les éclairer et à les guider vers des décisions dont ils conservent la responsabilité (Jallas et Cretenet, 2002).
- 6 Qu'il s'agisse d'aide à la décision *sensu stricto*, de négociation ou de concertation territoriale, le processus aboutissant à la décision est très fortement transdisciplinaire et fait appel aux sciences de l'environnement, à l'ingénierie ainsi qu'aux sciences sociales et à la gestion de projet (Graillot et Waaub, 2006). Il en résulte une complexité tant aux niveaux conceptuel que méthodologique qui impose l'usage d'outils et de méthodes nombreux et variés : méthodes d'enquêtes et de statistiques, systèmes d'information géographique, aide multicritère à la décision, modèles physiques et/ou conceptuels, méthodes de gestion participative. Les systèmes les plus évolués intègrent aujourd'hui des représentations spatiales, les SIG, les outils multicritères ainsi que les systèmes multiagents (SMA).

- 7 Trouver les modalités d'une articulation fonctionnelle entre ces outils nécessite une réflexion théorique sur (1) l'objet d'étude lui-même, soit l'environnement, le territoire, le paysage considérés ici comme des systèmes complexes, (2) le potentiel d'intégration des interactions et des contingences environnement/société par l'outil de modélisation, et (3) le potentiel de synthèse de l'information géographique, en terme d'enjeux soutenant l'aide à la décision. Notre contribution vise à présenter trois outils de modélisation de l'espace utilisés en planification territoriale et environnementale au cours de ces 25 dernières années en Amérique du Nord et qui permettent, à notre avis, de détailler cette articulation fonctionnelle : (1) la modélisation cartographique, d'inspiration naturaliste et axée sur les notions développées en écologie du paysage ; (2) la modélisation visuelle ou géovisualisation, portée sur une « virtualisation » du territoire ; et (3) la modélisation spatiale proprement dite, plus intégrée, qui regroupe les automates cellulaires, les approches orientées-individus et multiagents. Chaque approche constitue isolément une tentative de formalisation d'un aspect du système spatial étudié. Ainsi, la cartographie écologique constitue selon nous un pré-requis absolu en planification et qui répond à un besoin particulier, soit celui de comprendre la structure du milieu physique, support aux activités anthropiques. Cependant, cette objectivation du milieu naturel ne doit pas occulter la question du paysage comme processus et foyer d'intégration des interactions entre la société et son environnement. La valeur sémantique que nous lui accordons est celle de la portion visible de l'espace géographique constituée d'artéfacts et de structures naturelles et à partir desquels s'établira un ensemble de relations, beaucoup moins tangibles en terme matériel, entre un observateur et son environnement. Ces relations subjectives mais tout aussi porteuses de sens, s'élaborent en vertu d'une chaîne cognitive complexe mettant en relation plusieurs processus propres aux individus : perception spatiale, mémoire, appartenance, affectivité, etc. Aussi, une importance réelle doit être attribuée à cette valeur « visuelle » du paysage, une exigence à laquelle la géovisualisation et les SIG permettent de répondre. Enfin, la compréhension des changements d'état du système, de leurs significations et de leurs impacts sur la dynamique globale du territoire et du milieu devient une préoccupation majeure qui confère au praticien toute la légitimité de son message auprès des acteurs. Cette étude prospective du territoire (Mermet, 2005) introduit l'acteur dans le système et c'est ici qu'interviennent les SMA, de facture plus récente, destinés à la modélisation des interactions fines entre les individus, et entre les individus et leur territoire.

La modélisation cartographique : l'espace naturel

- 8 Collectivement, la décennie 1970 a été marquée par l'émergence d'une conscience environnementale dont l'expression la plus tangible a été l'établissement d'un rapport de force entre les tenants de visions opposées du développement mettant aux prises une philosophie davantage tournée vers les impératifs de croissance perpétuelle du modèle productiviste et la vision « écologique » du développement, soutenant implicitement que le maintien de la qualité de vie des collectivités repose sur le maintien de l'intégrité des écosystèmes. Si les premiers adhèrent à l'idéologie classique de la croissance économique dans laquelle le capital construit se substitue au capital naturel, les seconds plaident pour un développement durable pour lequel cette substitution n'a pas lieu d'être mais prend plutôt la forme d'une complémentarité, sans perte de capital naturel.

- 9 Selon Rougerie et Beroutchachvili (1991), cette période est également marquée par une rupture avec les discours déterministe et possibiliste classique, et par l'émergence d'une nouvelle approche de l'espace davantage fondée sur l'actualisation des potentiels du territoire pour un meilleur usage social de l'espace. Dans ce contexte, les premières expériences de caractérisation visuelle du territoire de K. Lynch avec ses description des paysages urbains, font apparaître la notion de paysage. C'est aussi avec les travaux de MacHarg notamment dans « Design with nature » paru en 1969 que se confirme cette vision « écologique » du milieu par l'usage d'une méthode qui repose d'une part sur des séries de cartes des caractéristiques écologiques, paysagères et culturelles, superposables et permettant d'évaluer les aptitudes et les contraintes du territoire selon les usages souhaités, et leurs incidences sur le milieu. Le « land suitability » fait ainsi reposer son concept sur la mise en correspondance de l'utilisation du sol avec les attributs physiques du territoire. C'est à l'époque les premières tentatives pour faire émerger les potentiels d'utilisation rationnelle des ressources du milieu et pour identifier les contraintes limitant cette utilisation. L'information dérivée par le croisement de ces couches thématiques permet de localiser les meilleurs emplacements i.e. les sites les mieux adaptés et les plus viables aux divers scénario d'utilisation des ressources physiques du milieu. Dès lors, on parle de planification écologique et l'essentiel de cette approche mise en œuvre par McHarg et Lynch s'est répandu en moins d'une décennie un peu partout dans le monde anglo-saxon. Dès ce moment, partout où on se préoccupe d'aménagement, les notions de paysage et d'écologie deviennent associées l'une à l'autre et ce, dans la continuité des intuitions de Dansereau quelques années auparavant (Dansereau, 1957).
- 10 Par ailleurs, la cartographie écologique, approche qui s'est imposée comme outil d'inventaire du capital naturel des territoires nordiques au Québec (Jurdant et al. 1977 ; Ducruc, 1985), mais aussi ailleurs en Amérique du Nord (Rowe et Sheard, 1981 ; Robitaille et Saucier, 1996), s'inscrit dans un courant similaire, dans la mesure où il est intégrateur, mais davantage axé cette fois sur une conception naturaliste du milieu (Zonneveld, 1989). Conceptuellement, la démarche repose sur les préceptes fondamentaux de l'écologie du paysage à savoir que la configuration visuelle du milieu –ses caractéristiques permanentes à un niveau de perception de l'espace donné, telles que la topographie, le modelé, le relief – révèle en fait une mosaïque d'écosystèmes dont les limites virtuelles sont fondées sur la répartition et la nature de ces éléments permanents (Forman et Godron, 1986). La structure, la composition puis le fonctionnement (implicite) des écosystèmes terrestres sont ainsi déduits à partir de ces formes de terrain lesquelles forment des « limites » écologiques immuables fortement dépendantes de la structure géologique et de la répartition des dépôts de surface (Bailey, 1980 ; Rowe 1992). De nombreuses applications de la cartographie écologique, telle que développée au Québec, ont été réalisées pour un spectre très diversifié d'usages allant de la connaissance du territoire (Gerardin et Ducruc, 1990), à l'aménagement du territoire, la gestion des bassins versants, ainsi que la planification des activités sylvicoles (Beauchesne et al. 1996). Dans ce cas d'application, les unités de paysage sont décrites par un ensemble de variables permanentes et de variables dynamiques (i.e. dépôts de surface, drainage, pente, etc.) auxquelles sont associées des caractéristiques écologiques comme la texture du sol, la granulométrie, l'humidité, etc. Ces facteurs sont en partie déterminants dans la distribution et la croissance des essences commerciales et sont également fortement corrélés avec certaines contraintes opérationnelles liées aux opérations forestières. Il devient possible avec cette information de dériver des indicateurs écologiques utiles pour

le choix de solutions de gestion des écosystèmes forestiers : identification des unités les plus productives, unités les plus sensibles aux opérations forestières, etc. La cartographie écologique a généré un intérêt considérable dans le sillage duquel plusieurs méthodologies et approches ont été développées (Marshall et Schut, 1999 ; USDA, 2002 ; Loveland et Merchant, 2004). Des applications récentes continuent toujours d'être produites (MacMillan et al. 2005 ; Huetttman et Diamond, 2006) principalement dans le domaine de la planification écologique des aires protégées où les questions d'échelles spatiales sont fondamentales pour les communautés animales.

La modélisation virtuelle : l'espace visible

- 11 Batty et al. (2000 ; 2004) définissent la géovisualisation comme les représentations et les procédés de représentation de données géoréférencées, de photographies, de vidéos et autres artéfacts qui accentuent la communication non textuelle d'information. Or, nous l'avons vu en introduction, une des interprétations du concept de paysage est celle de la portion visible de l'espace constitué de structures naturelles et anthropique à partir desquelles s'établiront un ensemble de relations, beaucoup moins tangibles en terme matériel, entre un observateur et son environnement. Ces relations subjectives mais tout aussi porteuses de sens s'élaborent en vertu d'une chaîne cognitive complexe mettant en relation plusieurs processus : perception spatiale, mémoire, sentiment d'appartenance, affectivité, valeurs, etc. Aussi, c'est par ce regard et cette perception que s'établiront certaines des interactions parmi les plus solides entre les communautés, leur territoire et leur milieu, et c'est sur ce postulat que repose la pertinence de la géovisualisation en planification territoriale et environnementale.
- 12 L'approche du Visual Resources Management a émergé au début des années soixante-dix dans les pratiques de planification des opérations forestières. Cette approche de modélisation du territoire prend assise sur deux théories en architecture du paysage nommément l'esthétique scénique (Carlson, 1977) et l'esthétique écologique (Gobster 1999). C'est toutefois surtout dans le contexte de ce que Sheppard (2001 ; 2003) appelle l'intendance visible (« visible stewardship ») que la géovisualisation prend un sens plus stratégique. Dans son principe, l'intendance visible fait référence à des techniques qui permettent aux gestionnaires des ressources naturelles d'illustrer concrètement la valeur qu'ils accordent à l'environnement et ce, en accord avec les perceptions du public, lesquelles sont par ailleurs généralement à l'opposé des enjeux économiques de l'exploitation d'une ressource. Ces pratiques, dont les effets sont directement perceptibles sur le terrain par des configurations particulières du paysage (un parterre de coupe forestière par exemple) constituent un symbolisme qui équivaut, dans l'esprit du public, à une bonne gestion des ressources (Hull et al. 2009). En d'autres termes, toutes interventions dans un milieu, pour qu'elles soient rendues acceptables par la société, devraient clairement refléter un respect pour cet environnement. À certains égards, l'acceptabilité sociale d'un projet dont l'empreinte écologique est importante pourra être fonction, en partie, de la capacité du public de voir les preuves tangibles que ce projet est écologiquement durable et soigneusement planifié par des individus qui partagent avec eux, le même engagement envers un milieu naturel sain.
- 13 Techniquement, la modélisation « visuelle » du territoire et de l'environnement s'est avérée, depuis une vingtaine d'année, une approche de modélisation largement utilisée pour évaluer les impacts visuels des prises de décision à composante spatiale (Appleton et

Lovett, 2005) et les états actuels et futurs d'un territoire (Sheppard, 1986 ; Sheppard et Meitner, 2003 ; MacFarlane et al. 2005). Une distinction doit être établie entre la préparation de l'information à des fins de géovisualisation, soit l'extraction de l'information, et son rendu. Si l'extraction concerne davantage l'exploitation des moyens techniques et de l'information géographique pour identifier les éléments structuraux, les patrons texturaux et le positionnement des entités dans l'espace géographique, le rendu, fait plutôt appel à la représentation et à la diffusion de cette information. C'est sur cet aspect que nous nous attarderons.

- 14 Appleton et al. (2002) recensent trois grandes catégories de rendus 3D du paysage. Le drapage est une technologie fréquemment utilisée. Elle consiste en une superposition d'images ou une combinaison d'images satellitaires ou d'orthophotographies sur une surface 3D, générée par un modèle numérique d'élévation. Le principal intérêt de ce type de visualisation réside dans le fait qu'il ne requiert pas d'importants volumes de données et qu'il permet la visualisation de vastes superficies de territoire, principalement si une image satellite est utilisée plutôt qu'une orthophotographie. Le rendu photoréaliste offre une visualisation haute-fidélité du territoire. Ce type de rendu confère au modélisateur un contrôle sur tous les paramètres du modèle visuel du paysage : couleur, texture et taille des artefacts, luminosité, éclairage de l'environnement, etc. À cet égard, la compilation du rendu peut-être onéreuse en temps, notamment si un grand nombre d'effets visuels est requis. Par ailleurs, les réalités virtuelles constituent des représentations tridimensionnelles et immersives d'espaces réels ou fictifs. L'avantage principal de ces technologies sur les autres types de rendu est de permettre d'intégrer l'univers visuel généré, notamment à l'aide d'interfaces sensorielles et de sonomètres. Les gants de données, lunette de navigation et plus récemment les DBCI (« direct brain-computer interface ») constituent des interfaces homme-machine qui permettent actuellement de naviguer dans des environnements virtuels (Appleton et Lovett, 2003 ; Sang Cho et al. 2007).
- 15 On ne peut pas aborder la géovisualisation en oblitérant la place des systèmes d'information géographiques (SIG) dans ce contexte. Ces systèmes déploient des fonctionnalités de capture, de manipulation, de stockage, d'extraction, de manipulation, d'analyse et de visualisation de données géoréférencées (Aronoff 1989) qui cadrent adéquatement dans les enjeux opérationnels de la géovisualisation. Ainsi, en gestion puis en planification territoriale et environnementale, les SIG ont ouvert d'immenses perspectives pour l'identification des enjeux et l'étude prospective. Ils permettent l'analyse spatiale des interactions, la cartographie numérique, facilitent la modélisation et la communication. En foresterie par exemple, l'intégration de l'imagerie aérienne dans les SIG matriciels puis un peu plus tard de l'imagerie satellitaire ont révolutionné le traitement, la manipulation et l'interprétation d'une information visuelle qui jusque là s'effectuait de manière analogique (Iverson et al. 1989 ; Gustafson et al. 1998 ; White et al. 2006). En outre, les données d'imagerie provenant de capteurs de troisième génération comme le LIDAR (Renslow et al. 2000) permettent aujourd'hui d'évaluer la structure et le volume de biomasse des surfaces forestières en 3D (St-Onge et al. 2004 ; Van Aardt et al. 2008). Il existe toutefois une limite au potentiel de ces outils et elle est directement liée à la qualité du processus de validation terrain de l'information qu'ils permettent de générer. En outre, les extraits typiques du SIG – la carte, les diagrammes et les flux de données – ne sont pas toujours accessibles, cognitivement parlant, pour les acteurs impliqués dans le processus de planification. Une translation sur un support de

visualisation constitue la façon adéquate de communiquer « l'intelligence » issue de la modélisation territoriale et environnementale par SIG.

- 16 Le collectif « Collaborative for Advanced Landscape Planning (CALP) » de l'Université de Colombie-Britannique explore depuis quelques années le potentiel de la géovisualisation en planification environnementale l'intégrant dans un système d'aide à la décision en gestion forestière, lequel permet d'évaluer divers scénarios de coupe (Sheppard et Meitner, 2004). À partir de critères et d'indicateurs, développés en consultation avec le public, il devient possible de synthétiser les objectifs économiques, écologiques et sociaux, d'optimiser l'activité de coupe tout en minimisant son impact. La géovisualisation a servi notamment pour induire la discussion, dégager les points de vue des acteurs et faciliter la comparaison des impacts visuels des différents scénarios de coupe.

La modélisation spatiale : l'espace intégré

- 17 Le spectacle d'un assortiment d'objets dans l'espace et de la manière dont ceux-ci sont organisés est, intrinsèquement, neutre. Il ne devient paysage que lorsqu'intervient, chez l'individu une finalité quant à l'usage de ce paysage (Rougerie et Beroutchachvili, 1991). C'est initialement ce type de regard que le praticien doit porter sur le milieu au moment de « planifier » l'espace. Au sein des systèmes à forte composante sociale, la phénoménologie comme expérience de la conscience intentionnelle des individus, des groupes, des institutions et de la culture, constitue un paradigme qui fait dire à Walliser (2006) que (1) tout acteur humain est doté d'intentionnalité lui permettant de se forger des croyances primaires sur son environnement mais aussi sur les autres acteurs et sur lui-même ; (2) tout acteur humain est doté de réflexivité au sens où il peut analyser sa propre intentionnalité tout comme celle d'autrui. L'intention et la finalité deviennent les corollaires des croyances et des valeurs, des désirs et des objectifs de l'individu ou du groupe. Ce sont la nature puis l'organisation de ces valeurs intrinsèquement subjectives que la planification territoriale et environnementale doit permettre d'apprécier avant de générer « l'intelligence » requise dans la prise de décision.
- 18 Dans un contexte de planification territoriale et environnementale, le problème est généralement de savoir comment simuler les interactions entre les individus, les groupes et la dynamique d'une ressource. Il existe bien sûr plusieurs méthodes empiriques qui conviennent à cette fin, mais une en particulier nous intéresse et permet d'adresser trois questions fondamentales : quel est le lien entre la perception des individus, leur représentation du territoire et de l'environnement et leurs actions ? Quelles sont les relations hiérarchiques qui existent entre les agents, sont-elles synchronisées ou non ? La planification territoriale et environnementale, avant de constituer son « intelligence », sur laquelle repose la décision, doit initier un regard sur ces questions par l'analyse prospective deux catégories d'interaction celles qui s'établissent (1) entre les individus, et (2) entre les individus et leur espace.
- 19 Par ailleurs, la dynamique des systèmes « socioenvironnementaux » que sont le territoire et le milieu est souvent tributaire d'une classe particulière de phénomènes non-prévisibles, souvent contre-intuitifs, qualifiés d'émergents. Ces manifestations peuvent prendre la forme (1) d'une singularité statistique (un regroupement d'individus en cluster sous l'influence d'une distribution aléatoire de facteurs d'incidence), (2) structurelle (l'apparition spontanée d'un réseau de relations nouvelles qui s'établissent entre des

entités), ou (3) qualitative, s'il se manifeste sous la forme de propriétés nouvelles acquises par les entités : normes sociales, consensus, comportements, etc. (Dessalles et Phan, 2005 ; Dignum et Dignum, 2009). Un des aspects fondamentaux de ces processus est le pouvoir d'adaptation qu'ils possèdent en vertu des aléas et changements de l'environnement. Ces processus puisent donc leur nature intrinsèque dans l'interaction dynamique avec l'environnement duquel ils ne sont pas totalement dépendants ni auquel ils ne sont restreints. Ils s'en détachent par des propriétés et des régularités génériques applicables dans d'autres environnements. L'environnement est là pour paramétrer des règles comportementales et structurales de base conduisant à l'émergence du phénomène global (Jean, 1997). C'est sur ces considérants que nous orientons notre réflexion sur des modèles qui doivent permettre d'appréhender, d'une manière dynamique et visuelle, le comportement de ces systèmes à forte composante anthropique. Nous avons identifié deux approches dans cette catégorie dont le formalisme est adapté à ces fins : les automates cellulaires et les modèles orientés-agents.

- 20 L'automate cellulaire est un modèle spatial à deux dimensions qui s'appuie sur la propriété topologique de connectivité entre les entités d'un environnement donné (Shirabe, 2005). Initialement introduit par Von Neumann au milieu des années soixante, les automates cellulaires ont été utilisés à ce jour en planification territoriale et environnementale, en foresterie ainsi qu'en urbanisme (White et Engelen, 1993 ; Batty, 1999 ; Torrens et Nara, 2007). Dans sa forme la plus schématique, l'automate cellulaire est formalisé par un ensemble (i) de cellules formant une grille ; chaque cellule possède un voisinage Ω , constitué minimalement des 4 (voisinage de Neumann) ou 8 (voisinage de Moore) cellules cardinales. Chaque cellule est caractérisée par un état, fonction des états des cellules de son voisinage. Un assemblage de cellules et d'états détermine une configuration du système. Cette configuration est mise à jour à intervalles spécifiques lorsque certaines ou toutes les cellules voient leur état modifié en vertu de règles de transition qui prennent habituellement la forme de structures logiques imbriquées du genre « If (état $\Omega = x$) Then (état $i = y$) ». Selon le phénomène étudié, ces règles de transition seront plus ou moins complexes.
- 21 Le projet iCity (Stevens et al. 2007) constitue un exemple type d'utilisation d'automates cellulaires destinés à la planification territoriale. Dans ce modèle, l'espace urbain est discrétisé en parcelles (cellules) d'utilisation du sol. Ce découpage est basé sur le cadastre et chacune des cellules est caractérisée par l'affectation territoriale sous-jacente : résidentielle, commerciale, industrielle, réseau routier, espace vert, notamment. La variable d'état de la cellule est le niveau de développement atteint par celle-ci (totalement non-développé $\leftrightarrow$ totalement développé). À chaque itération du modèle, cet état est modifié en vertu de 4 phénomènes déterministes : (1) la croissance prévue de la population ; (2) un indice d'attractivité résidentielle ; (3) le nombre de logements requis pour supporter la croissance prévue de la population, et (4) le stock existant de logement. C'est la coordination entre ces phénomènes d'échelle supra-parcellaire – reposant sur des critères objectifs mais également sur des schèmes perceptuels et des représentations – qui va impulser la dynamique globale au système socio environnemental. Chaque changement d'état d'une cellule (totalement non-développé $\leftrightarrow$ totalement développé) induit un changement d'état des cellules adjacentes en vertu de règles décisionnelles particulières ; par exemple, SI le seuil de la population atteint un certain niveau ALORS sélectionner les parcelles à développer dans d'autres affectations.

- 22 L'automate cellulaire répond adéquatement aux exigences méthodologiques induites par la structure naturelle de certains processus ou conditions ponctuels ou continus qui ont cours dans un territoire ou un milieu : diffusion, dispersion, transition, migration, affectation, isotropie, etc. Il permet de simuler l'évolution spatiale d'un territoire à partir de ses conditions intrinsèques i.e. l'état de cellules qui le composent. Mais qu'arrive-t-il si ces conditions initiales sont conférées, non pas par un état statique et ponctuel d'une grille de cellules immobiles, mais plutôt par l'interaction entre des agents qui se meuvent dans un environnement donné comme le font normalement des populations humaines ? C'est ce postulat qui oriente l'usage des modèles multiagents. Cette approche de modélisation est exploitée depuis quelques années pour la modélisation des systèmes complexes à forte composante anthropique. Au sens strict, l'agent est l'équivalent d'un robot logiciel. C'est un programme qui accomplit des tâches en fonction de ce que lui a demandé son auteur (Wooldridge, 2002). Toutefois, leur comportement est caractérisé par des modalités d'interaction avec leur environnement, beaucoup plus sophistiquées que celles qui émergent dans un automate cellulaire (Franklin et Graesser, 1997 ; Wooldridge, 2002). Ils peuvent être réactifs, réagissant simplement aux stimuli environnementaux. Ils peuvent « percevoir » cet environnement. Les agents les plus évolués pourront adopter un comportement proactif leur permettant d'entreprendre des actions orientées vers un but (Table 1). Ces interactions peuvent être formalisées selon plusieurs types d'architecture et de protocoles (Bousquet et Le Page, 2004). Les architectures basées sur les réseaux neuronaux dans lesquels l'emphase est mise sur les capacités d'apprentissage des agents, les architectures à fonctions paramétriques reposant sur un rationnel économique déterministe (Deffuant, 2001), et le modèle BDI ou « belief – desire – intention » (Haddadi et Sundermeyer, 1996 ; Fasli, 2003 ; Mathevet et al. 2003) sont les plus couramment utilisées dans l'élaboration des modèles multiagents. Les protocoles d'interactions entre agents seront établis à partir de modèles communicationnels (Carlsson et Johansson, 1997) ou encore d'interactions sociales (Moulin, 1997).

Propriétés	Qualités	Signifiants
Réactif	Stimulable	Réagit aux modifications de son environnement.
Autonome	Régulation	Exerce un contrôle sur ses actions.
Efficience	Proactivité	Répond et modifie son environnement.
Communicatif	Diffusion	Communique avec d'autres agents.
Cognitif	Adaptation	Modifie son comportement sur la base d'expériences antérieures.
Mobilité	Mouvement	Capacité de se déplacer dans un environnement
Labilité	Individualité	« Personnalité » de l'agent, état émotionnel.

Tableau 1 : Nature et fonction des agents (Adapté de Franklin et Graesser 1997).

- 23 L'utilisation des modèles multiagents à des fins de planification est bien documentée (Gimblett et al. 2000 ; Gimblett et al. 2005 ; Anwar et al. 2007). Le *Recreation Behaviour Simulator* (RBSim) est un progiciel développé pour analyser les impacts environnementaux des activités de plein-air en milieu naturel. RBSim fait le lien entre les SIG, pour la représentation de l'environnement physique, et la technologie multiagent

pour la simulation du comportement des individus. Dans RBSim, l'environnement est modélisé par un SIG matriciel. Chaque cellule possède un état déterminé par des variables de terrain (pente, érosion, etc.). Les agents (randonneurs) sont de deux types. Ils ont été statistiquement agrégés à partir d'un échantillonnage fait sur les fréquentations du secteur : randonneurs experts et randonneurs sociaux. Ces deux types d'agents possèdent des capacités cognitives. Ils peuvent aussi percevoir leur environnement, prendre des décisions sur les informations obtenues et modifier leur comportement selon les conditions qui se présentent à eux dans le terrain virtuel : pente, présence de point de vue, densité de la fréquentation, etc. Ces paramètres contribuent à la mise en action de règles de décision, lesquelles modulent le comportement des agents. Ces règles ont été établies à partir d'un échantillonnage permettant de faire ressortir les préférences des deux types, et ainsi gérer et planifier adéquatement la circulation des randonneurs afin de minimiser les impacts de leurs activités sur le milieu naturel.

Discussion

- 24 L'information colligée au cours de la planification territoriale et environnementale est exploitée à divers moments durant les différentes phases du processus afin de réduire au minimum les incertitudes relatives au milieu (structure, dynamique), les incertitudes relatives aux « valeurs » à sauvegarder, valeurs aussi bien factuelles que perceptuelles (biens et services des écosystèmes, symbolisme, etc.), et les incertitudes relatives au chevauchement des impacts des décisions dans des secteurs connexes (Lang et Armour, 1980). Cette démarche heuristique d'aide à la décision s'articule autour de ces trois axes et peut être accomplie par l'usage des trois outils de modélisation que nous avons analysés ici. La cartographie écologique constitue une approche de modélisation du milieu dont la validité, sous ses aspects purement théoriques, est bien fondée (Jurdant et al. 1977 ; Allen et Starr, 1982 ; Forman et Godron, 1986). Se situant à mi-chemin dans l'esprit du « land use » et de l'optique écologique, et utilisée en gestion et en planification environnementale, la cartographie écologique fournit un cadre d'analyse comparatif permettant de faire face à des problèmes environnementaux complexes (Loveland et Merchant, 2004 ; Huettmann et Diamond, 2006). Le découpage structurel du milieu selon ses lignes de forces permanentes et l'identification d'un ou des processus dominants à un niveau d'échelle donné, permet d'inférer une dynamique d'ensemble de l'écosystème sous-jacent à l'unité de paysage. Les interprétations écologiques que cette méthode fournit, constituent une assise adéquate pour la planification de l'utilisation des ressources. Il s'agit d'une approche « a priori » qui permet une réelle intégration des interactions entre les variables abiotiques et biotiques sans le biais de l'obligatoire planification qui caractérise les approches qui s'apparentent au « land suitability » (CANADA, 1967). Elle autorise mais uniquement « a posteriori » des typologies et des classifications écologiques plus fonctionnelles. En comparaison, ce degré d'intégration ne nous apparaît pas avoir été atteint par les démarches « land suitability » et selon lesquelles l'architecture physique du milieu n'est pas réellement prise en compte, l'emphase étant mise davantage sur les potentiels et les contraintes actuelles du milieu. Or, les effets de cette façon de comprendre le milieu naturel sont souvent d'autant plus questionnables que les indicateurs utilisés par cette méthode concernant la classification des potentiels et contraintes ne sont pas d'une impartialité rigoureuse mais plutôt établis par l'expert (Rougerie et Beroutchachvili 1991). Après une collecte plus ou moins orientée

de l'information, le modèle auquel on parvient se trouve réduit à une expression numérique, matricielle ou cartographique.

- 25 La question du traitement des aspects objectifs et subjectifs de la connaissance intégrée du milieu demeure donc centrale et il faut donc chercher ailleurs la complémentarité entre ces deux aspects. L'utilisation de la visualisation 3D repositionne un peu plus le processus de planification territoriale et environnementale autour de cette intégration en introduisant la cognition spatiale des individus comme élément de structuration du territoire et de l'environnement. Considérant cette dimension, il apparaît que l'étape de la visualisation doit être un passage obligé pour évaluer les impacts visuels des scénarios de planification territoriale. En contexte opérationnel, la simulation prospective par géovisualisation consistera à modifier la composition et la structure du paysage par l'ajout ou le retrait d'éléments naturels ou anthropiques, et de déterminer comment la perception des individus s'en trouve modifiée. C'est sans doute à cet égard que la réelle utilité de la géovisualisation se trouve justifiée, le spectre des diverses perceptions individuelles et collectives servant ici à constituer une base de données qui pourra nourrir une autre forme de modèle. Le choix d'une démarche et d'un outil de géovisualisation requièrent toutefois une analyse minutieuse, à la mesure de la complexité de la planification notamment participative. Elle nécessite de la créativité mais également beaucoup d'expérimentation afin d'établir son seuil réel d'utilité.
- 26 Les approches spatiales (automates cellulaires, systèmes multiagents) offrent un formalisme adapté au caractère spatio-temporel de la planification et de la gestion du territoire et de l'environnement : les automates cellulaires permettent de modéliser avec beaucoup d'acuité l'évolution spatiale du territoire ou de l'environnement, principalement l'utilisation du sol. Le formalisme de cette approche, qui repose notamment sur une discrétisation de l'espace, est en adéquation avec les structures et les dynamiques intrinsèques des phénomènes à la base du processus d'utilisation du sol, pour un territoire : transition, diffusion, migration, affectation, etc. Nous parlons ici de processus matériels inhérents à la dynamique du territoire et du milieu. L'utilité de cette approche se trouve concentrée dans l'effet de voisinage, la dynamique de chaque portion du territoire ayant une incidence sur la portion adjacente. Toutefois, les processus perceptuels davantage subjectifs et plus élaborés tels que ceux qui sont à la base des interactions socio-paysagères comme la valorisation, les jugements et les choix doivent être pris en compte d'une manière beaucoup plus élaborée. C'est par les approches multiagents qu'il devient possible de formaliser ce spectre le plus raffiné d'interactions société/environnement. Ces approches reposent en effet sur des notions de choix, d'intention, de décisions prises par des acteurs et de leurs impacts sur la dynamique entre acteurs et sur la dynamique territoriale. Ces approches nous apparaissent particulièrement indiquées en planification et en gestion du territoire et de l'environnement et, plus particulièrement, pour l'évaluation environnementale notamment lorsque les protocoles d'interactions entre agents ou individus sont fondés sur un schéma de type BDI (belief – desire – intention) et sur un ensemble de considérants dont la nature relève de besoins préalablement identifiés et qualifiés a priori d'importants par les acteurs. Nous sommes d'avis toutefois, que c'est la structure de modélisation (bottom-up) de ces approches qui constitue un critère discriminant. En effet, une démarche de type hypothético-déductive i.e. qui va du général au particulier et qui implique l'existence d'une théorie de portée générale précédant la vérification, ne semble pas totalement adéquate (Damboise, 1996) dans un contexte opérationnel de

planification territoriale. Il n'existe pas en effet de théories préalables, disponibles et admises pour expliquer le comportement des systèmes d'interface société et environnement. Les « lois » qui régissent ces systèmes ne permettent tout simplement pas d'établir adéquatement leur phénoménologie. Une approche davantage inductive i.e. qui va du particulier au général, et qui débute par l'observation de phénomènes particuliers pour ensuite essayer de dégager une théorie plus générale de ces observations, s'impose ici et les approches multiagents sont particulièrement intéressantes dans ce contexte. D'une part, elles reposent sur la façon dont les composants du système sont organisés et interagissent entre eux, plutôt que sur une approche qui tente de recréer et de simuler le comportement du système étudié. Ces approches présentent à cet égard un avantage sur les autres courants de modélisation. La combinaison des modèles multiagents aux filtres multicritères ouvre de nouveaux horizons en lien avec la théorie du choix social.

Conclusion

- 27 Susciter parmi les individus, un regard plus précis et une compréhension accrue des enjeux constitue un aspect fondamental de la planification et partant, du choix des actions à entreprendre pour le praticien. Mais au-delà de ces aspects méthodologiques, c'est à un problème en particulier que nous devons répondre dans cette contribution à savoir comprendre les modalités d'une articulation fonctionnelle entre trois outils de modélisation utilisés dans un contexte opérationnel de planification du territoire et de l'environnement. En filigrane, cette tâche imposait d'amorcer ou de continuer une réflexion théorique sur (1) l'objet d'étude lui-même, soit l'environnement, le territoire, le paysage considérés ici comme des systèmes complexes, (2) le potentiel d'intégration des interactions et des contingences environnement/société par l'outil de modélisation choisi, et (3) le potentiel de sublimation de l'information en terme d'enjeux soutenant l'aide à la décision. À cet effet, nous avons retenu 3 grands courants de modélisation qui se prêtent ou qui présentent un potentiel d'utilisation dans ce contexte : la modélisation cartographique par le biais de l'approche de la cartographie écologique, la modélisation visuelle ou géovisualisation axée sur la « virtualisation » de l'espace et la modélisation spatiale permettant une intégration plus poussée des interactions environnement-société.
- 28 À la lumière de nos constatations, chacun de ces courants de modélisation permet une formalisation adéquate d'un aspect du système étudié : emphase mise sur la structure et le fonctionnement (implicite) dans la modélisation cartographique, sur la structure et sur la cognition spatiale dans la géovisualisation, et sur la dynamique et les interactions systémique en modélisation spatiale. Ainsi, la cartographie écologique offre un avantage qui nous apparaît concurrentiel sur l'approche utilitariste du « land suitability ». À notre avis, elle favorise une approche beaucoup plus rigoureuse du milieu naturel ; elle se positionne davantage dans la mouvance de l'approche de l'écologie du paysage dont les fondements scientifiques sont universellement reconnus. La complexité organisationnelle du milieu est plus facilement concevable avec cet outil, et le fonctionnement du système, même s'il demeure implicite, peut être évalué, ce qui ouvre du même coup sur les aptitudes de cette approche à mieux saisir l'impact des décisions sur la dynamique d'ensemble du milieu. Au final, cette approche demeure pour nous la plus objective en

termes de connaissance, le milieu étant considéré ici comme un système aux structures bien définies. Elle vise à minimiser les biais de subjectivité.

- 29 En ce qui touche la géovisualisation, les argumentaires sur la pertinence de cette approche en planification territoriale et environnementale demeurent malheureusement contradictoires à ce jour. Plusieurs auteurs prétendent que la véritable utilité de la visualisation 3D reste ambiguë, l'aspect strictement ludique de cette expérience reste toujours un élément questionnable comparativement aux réels avantages opérationnels qu'elle offre (MacFarlane et al. 2005). Certains auteurs suggèrent toutefois que l'utilisation de la visualisation 3D génère des réponses chez les utilisateurs qui sont similaires à celles induites par l'exposition des utilisateurs aux véritables paysages. Mais, c'est sans aucun doute dans la capacité d'explorer visuellement et d'une manière dynamique un scénario de planification et de constater les impacts des décisions en temps réel, qu'elle est particulièrement informative du point de vue des acteurs (Salter et al. 2007) et apparaît très utile comme outil d'aide à la décision (Sheppard et Meitner, 2005 ; Domon et Ruiz, 2009). Par ailleurs, l'usage des SIG dans un contexte de planification territoriale et environnementale est fondamentalement similaire à celui des cartes analogiques, bien qu'ils soient beaucoup plus sophistiqués (Al-Kodmany, 2002). D'importantes questions d'ordres conceptuel et méthodologique demeurent toutefois dans l'usage de la géovisualisation et des extraits des SIG. Elles portent notamment sur la façon dont les individus et les groupes sociaux vont interagir avec la visualisation 3D en fonction de leurs propres expériences et perceptions du paysage, entre autres. Un cadre théorique serait nécessaire pour comprendre la réponse des individus face aux extraits de géovisualisation et pour standardiser les effets de cette approche de modélisation sur les perceptions, les émotions et les comportement des individus, ce que l'on appelle plus justement la cognition spatiale. L'aspect « boîte noire » de l'usage de la géovisualisation est également soulevé. En effet, le choix d'un niveau adéquat de réalisme, la recherche d'un consensus avec les communautés sur les points de vue et les éléments à visualiser, la présentation aux acteurs d'un ensemble de points de vue, d'angles et de directions de vue, et d'incrément de temps pour les fins de la visualisation doivent à cet égard faire partie du « code d'éthique visuel » du praticien.
- 30 Un type d'information nous apparaît avoir une importance particulière en planification et il concerne les phénomènes émergents. Ces manifestations sont relatives à certains aspects structurels et dynamiques du système qui échappent à toute rationalisation a priori en raison du fait qu'ils sont révélés uniquement suite aux interactions entre les composants. Nous sommes d'avis que ces phénomènes constituent une information fondamentale en planification et en gestion du territoire et de l'environnement. Leur importance émane du fait qu'ils renseignent sur le degré de stabilité et de résilience d'un système donné à de nouvelles conditions d'environnement, qu'elles soient naturelles, sociales, économiques ou politiques. En outre, et il s'agit ici sans doute de l'aspect le plus important pour le praticien, ces nouvelles conditions s'expriment souvent par l'apparition – l'émergence – de structures adaptatives dans l'espace : réseaux, processus, etc. À cet égard et à défaut d'être rigoureusement prévisibles, ces phénomènes doivent pouvoir être explorés. Ils constituent selon nous une excellente donnée indirecte prospective que nous devons être en mesure d'exploiter.
- 31 Au final, il nous apparaît clair qu'aucune approche n'est totalement intégrative. L'organisation du territoire est de plus en plus complexe à mesure de la graduation dans l'échelle de la hiérarchie des processus. L'existence de ce gradient de complexité ne peut

pas être évacuée d'une démarche de planification : complexité dans les processus, et les interactions mais aussi complexité dans l'ensemble des idéologies des acteurs. Or, la simple juxtaposition de modèles ne suffit évidemment pas à rendre compte des enjeux d'un système semblable. Ce dernier point est absolument fondamental. Le territoire, vu ici comme un espace d'investissement social, est un système complexe, une « boîte noire » qui a une finalité et qui pour atteindre cette finalité utilise des éléments endogènes et exogènes (forces, potentiels, contexte, acteurs) et les transforme (en leur donnant une valeur ajoutée) par du travail et des outils. Aussi, les approches de modélisation que nous avons détaillées ici doivent être comprises comme des outils d'aide à la décision. Si elles offrent des avantages indéniables du point de vue de la gestion de l'information et de la génération de « l'intelligence » requise pour la planification, il sera toujours du travail du praticien de les juxtaposer à un protocole permettant une négociation en vue d'une décision dont l'intérêt réside dans la convergence entre les croyances, les valeurs, les intentions des acteurs territoriaux.

BIBLIOGRAPHIE

Allen, T. F. H. & Starr, T. B. (1982) *Hierarchy : Perspectives in Ecological Complexity*. Chicago, IL, USA, University of Chicago Press, 344 pages.

Anwar M., Jeanneret C., Parrott L., Marceau D.J. (2007) Conceptualization and implementation of a multi-agent model to simulate whale-watching activities in the St. Lawrence estuary in Quebec, Canada *Environmental Modeling and Software* 22 (12) : 1775-1787.

Appleton, K.J. & Lovett, A.A. (2003) GIS-based visualisation of rural landscapes : defining « sufficient » realism for environmental decision-making. *Landscape & Urban Planning*, 65, 117-131.

Appleton, K.J. & Lovett, A.A. SÜNNENBERG, G. & DOCKERTY, T. (2002) Visualising Rural Landscapes From GIS Databases : a comparison of approaches, options and problems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26, 141-162.

Appleton, K.J. & Lovett, A.A. (2005) GIS-based visualisation of development proposals : reactions from planning and related professionals, *Computers, Environment and Urban Systems*, 29, 321-339.

Aronoff, S. (1989) *Geographic Information Systems : A Management Perspective*. Ottawa, ON. 294 pages

Bailey, R.G. (1980) *Descriptions of the Ecoregions of the United States*. USDA Forest Service Misc. Publ. No. 1391, Washington, DC. <http://www.fs.fed.us/land/ecosysgmt/index.html>

Batty, M. (1999) Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23, 205-233.

Batty, M., Chapman, D., Evans, S., Haklay, M., Kueppers, S., Shiode, N., Smith, A. & Torrens, P. M. (2000) *Visualizing the City : Communicating Urban Design to Planners and Decision Makers*. Center of Advanced Spatial Analysis (CASA) Working Papers Series. London, University College, 38 pages.

Batty, M., Steadman, P. & Xie, Y. (2004) Visualization in Spatial Modeling. *Center of Advanced Spatial Analyst (CASA) Working Paper Series*. London, University College, 29 pages.

- Beauchesne, P., J.-P. Ducruc & V. Gerardin. (1996) Ecological mapping : a framework for delimiting forest management units. *Environmental Monitoring and Assessment* 39 : 173-186.
- Berke, P. H, D. Godshalk & E.J. Kaiser (2006), *Urban Land Use Planning*, 5th. ed. Urbana IL. University of Illinois Press.
- Boumans, R., Costanza, R., Farle, J., Wilson, M. A., Portela, R., Rotmans, J., Villa, F. & Grasso, M. (2002) Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model. *Ecological Economics*, 41, 529-560.
- Bousquet, F. & Le Page, C. (2004) Multiagent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological Modelling*, 176, 313-332.
- Canada, Département de la foresterie et du développement rural. (1967). *The Canada land inventory : Land capability classification for forestry*. Report no.4, 26 pages.
- Caron, A et R.P Martel.(2005) *La vision stratégique du développement culturel, économique, environnemental et social*. Québec, Ministère des Affaires municipales et des régions (MAMR), 38 p.
- Carlsson, B. & Johansson, S. (1997) An Iterated Hawk-and-Dove Game. In Wobcke, W., Pagnucco, M. & Zhang, C. (Eds.) *Agents and Multi-Agent Systems Formalisms, Methodologies, and Applications, Based on the AI'97 Workshops on Commonsense Reasoning, Intelligent Agents, and Distributed Artificial Intelligence*, Perth, Australia, December 1, 1997. Springer, 240 pages.
- Damboise, G. (1996) « Les perspectives de recherche » In Le projet de recherche en administration : un guide général à sa préparation, pp 13-75. Faculté des sciences de l'administration, Pavillon Palasis-Prince, Presse de l'Université Laval, 6 pages.
- Dansereau, P. (1957) *Biogeography, An Ecological Perspective*, New York, Ronald Press Co., 1957.
- Deffuant, G. (2001) *Improving agri-environmental policies : A simulation approach to the cognitive properties of farmers and institutions*. Final report of the FAIR3 CT 2092 project, Cemagref, Aubière, France, 191 pages
- Dessalles J.L. & Phan D. (2005). Emergence in multi-agent systems :Cognitive hierarchy, detection, and complexity reduction, Publication en-ligne du *Computing in Economics and Finance* 2005 257, Society for Computational Economics.
- Ducruc, J.-P. (1985) *L'analyse écologique du territoire au Québec : l'inventaire du capital-nature de la Moyenne-et-Basse-Côte-Nord*. Ministère de l'Environnement du Québec, Série de l'inventaire du capital-nature N° 6, 192 pages.
- Fasli, M. (2003) Interrelations between the BDI primitives : Towards heterogeneous agents. *Cognitive Systems Research*, 4, 1-22.
- Forman R. T. T. et M. Godron (1986). *Landscape Ecology*. John Wiley & Son, New York. 619 pages.
- Franklin, S. & Graesser, A. (1997) Is it an agent, or just a program ? : A taxonomy for autonomous agents. *Third International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages*. Berlin, Springer-Verlag, 10 pages.
- Gerardin, V. & Ducruc J.-P. (1990) The ecological reference framework for Québec : a useful tool for forest site evaluation. *Vegetatio* 87 : 19-27.
- Gimblett, R. (2005) Human-Landscape Interactions in Spatially Complex Settings : Where are we and where are we going ? In ZERGER, A. & ARGENT, A. (Eds.) *MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation* Melbourne, Australia, 10 pages.
- Gimblett, R., Daniel, T. & Meitner, M. J. (2000) An Individual-Based Modeling Approach to Simulating Recreation Use in Wilderness Settings. In : Cole, David N. ; McCool, Stephen F. ; Borrie,

- William T. ; O'Loughlin, Jennifer, comps. 2000. *Wilderness science in a time of change conference, Volume 4 : Wilderness visitors, experiences, and visitor management* ; 1999 May 24-27 ; Missoula, MT. Proceedings RMRS-P-15-VOL-4. Ogden, UT : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 99-106
- Gobster, P. H. (1999) An ecological aesthetic for forest landscape management *Landscape Journal*. 18(1) : 54-64.
- Graillot D. et Waaub J.P. (2006) *Aide à la décision pour l'aménagement du territoire : méthodes et outils*. Paris : Lavoisier : Hermès Sciences, 436 pages
- Haddadi, A. & Sundermeyer, K. (1996) Belief-desire-intention agent architectures. In O'Hare & Jennings (Eds.) *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. Wiley, New-York, 169-187.
- Huettmann, F. et Diamond A.W. (2006) Large-scale effects on the spatial distribution of seabirds in the Northwest Atlantic *Landscape Ecology* 21 :1089-1108
- Hull, B., S.F. Ashton, R. M. Visser, et M. C. Monroe. (2008). Forest Management in the Interface : Practicing Visible Stewardship. Florida Cooperative Extension Service Fact Sheet, FOR 177. University of Florida, UF/IFAS EDIS (Electronic Data Information Source) Database, <http://edis.ifas.ufl.edu/FR237>
- Institut d'urbanisme de Grenoble. (2008) « La planification territoriale : imaginer, anticiper et organiser » In *Actes du 4^e Rencontres internationales de Recherche en urbanisme de Grenoble*, (Grenoble, 7et 8 février 2008).
- Iverson, L.R., Cook, E.A. et Graham R.L. (1989). A Technique for Extrapolating and Validating Forest Cover Across Large Regions Calibrating AVHRR Data With TM Data. *International Journal of Remote Sensing* 10(11) :1805-1812.
- Jallas E., Crétenet M.. (2003). Aide à la décision en agriculture et gestion des ressources naturelles : note introductive in : Jamin Jean-Yves (ed.), Seiny Boukar L. (ed.), Floret Christian (ed.). *Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, Garoua, Cameroun, 27-31 mai 2002*. Montpellier : CIRAD, 8 pages.
- Jean, M.R. (1997) Emergence et SMA. In *Actes des 5^{ème} Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents*, Quinqueton, Thomas, Trousse (eds), Hermes, p. 323-342
- Jurdant, M., Bélair, J.L, Gérardin, V. & Ducruc, J.P. (1977) *L'inventaire du Capital- Nature*. Ottawa, Environnement Canada, série Classification écologique n° 2, 202 pages.
- LANG, R., ARMOUR, A. (1980) *Livre-ressource sur la planification de l'environnement*. Environnement-Canada, Ottawa, Multiscience Publications Ltée, 388 pages.
- Loveland, T.R. et Merchant M.J. (2004) Ecoregions and Ecoregionalization : Geographical and Ecological Perspectives, *Environmental Management* vol. 34, Suppl. 1, pp. S1-S13
- Macfarlane, R., STAGG, R., Turner, H. & Lievesley, M. (2005) Peering through the smoke ? Tensions in landscape visualization. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29, 341-359.
- MacMillan, R. A., Moon, D.E., Coupé, R.A. (2005) Automated predictive ecological mapping in a Forest Region of B.C., Canada, 2001-2005 *Geoderma*, 140, 4, 353-373.
- Margerum, Richard D. and Stephen M. Born. 1995. « Integrated environmental management : Moving from theory to practice. » *Journal of Environmental Planning and Management* . 38, 3 : 371-391.

- Marshall, I.B. ; Schut, P.H. (1999) Un cadre écologique national pour le Canada. Environnement Canada, Direction générale de la science des écosystèmes, et Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction de la recherche. Ottawa (Ontario).
- Mathevet, R., Bousquet, F., Page, C. L. & Antona, M. (2003) Agent-based simulations of interactions between duck population, farming decisions and leasing of hunting rights in the camargue (southern France). *Ecological Modelling*, 165, 107–126.
- Mcharg, I. (1969) *Design with nature*, Natural History Press, Garden City, NY. 197 pages.
- Mermet L. (2005). *Étudier des écologies futures. Un chantier ouvert pour les recherches prospectives environnementales*. P.I.E.-Peter Lang, EcoPolis. vol. 5, 411 pages.
- Moulin, B. (1997) The Social Dimension of Interactions in Multiagent Systems. IN W. Wobcke, M. Pagnucco, C. Zhang (eds), *Agents and Multi-Agent Systems, Formalisms, Methodologies and Applications*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1441, Berlin : Springer Verlag, pp. 109 – 122.
- Proulx, M.-U. (2008) « Quarante ans de planification territoriale au Québec », IN Gauthier, M., Gariépy, M. & Trépanier, M.O. (Ed.) *Renouveler l'aménagement et l'urbanisme. Planification territoriale, débat public et développement durable*, P.U.M. Montréal, pp. 23-54
- Robitaille. A. & Saucier, J.-P. (1996). Land district, ecophysiographic units and areas : The landscape mapping of the Ministère des Ressources naturelles du Québec. *Environmental Monitoring and Assesment* 39, pages 127-148.
- Rougerie, G. & Beroutchachvili, N. (1991) *Géosystèmes et paysages : bilan et méthodes*, Paris, Armand Colin, 302 pages.
- Rowe, J.S. 1992. Site classification : Prologue. *The Forestry Chronicle* 68 :(1) : 22-24.
- Rowe, J.S., & J.S. Sheard. 1981. Ecological Land Classification : A survey approach. *Environmental Management*. 5(5) : 451-464.
- Ruiz J. et G. Domon (2009) Aménagement des paysages en zone d'agriculture intensive, *Conférence dans le cadre de la Réunion de la table des conseillers en aménagement et en développement rural du MAPAQ*, 9 avril 2009, Orford.
- Salter J. D., Campbell, C., Journeay, M., Sheppard, S. R.J. (2008). The digital workshop : Exploring the sea of interactive and immersive visualisation tools in participatory planning, *Journal of Environmental Management* doi :10.1016/j.jenvman.2007.08.023
- Sang CHO H., Park K.S., Kim Y., Kim, C.S., Minsoo H. (2007) Effects of Virtual Reality Display Types on the Brain Computer Interface System In Spriger-Berlin (Ed.) *Universal Access in Human-Computer Interaction. Ambient Interaction*.
- Selman P. H., (2000) *Environmental planning : The Conservation and Development of Biophysical Resources*, Sage Publications Ltd ; 2nd edition, 320 pages.
- Sheppard, S. R. J (1986) Simulating changes in the landscape In Smardon, R., Palmer, J. & Felleman, J. (Eds.) *Foundations for Visual Project Analysis*. New-York, Wiley, 14 pages.
- Sheppard, S. R. J. & Meitner, M. (2005) Using multicriteria analysis and visualization for sustainable forest management planning with stakeholder groups. *Forest Ecology and Management*, 207, 171-187.
- Sheppard, S.R.J. (2001) Guidance for crystal ball gazers : Developing a code of ethics for landscape visualization. *Landscape & Urban Planning* 54 (1-4), 183-199.
- Shirabe, T. (2005) Modeling Topological Properties of a Raster Region for Spatial Optimization. In Fisher, P. F. (Ed.) *Developments in Spatial Data Handling*. Berlin, Springer, 407-421.

Simard, P., et C., Gagnon (2007) « La vision stratégique. Se donner une vision commune de notre avenir ». in Gagnon, C. (Éd) et E., Arth (en collab. avec). *Guide québécois pour des Agendas 21^e siècle locaux : applications territoriales de développement durable viable*, [En ligne] http://www.a21l.qc.ca/9577_fr.html

Slocumbe, D. S. (2008) « Forty Years of Institutional Change and Canadian Protected Areas, or, Are things getting better or just more complicated ? » Paper Commissioned for Canadian Parks for Tomorrow : 40th Anniversary Conference, May 8 to 11, 2008, University of Calgary, Calgary, AB.

Stevens, D., Dragicevic, S. & Rothley, K. (2007) iCity : A GIS-CA modelling tool for urban planning and decision making. *Environmental Modelling & Software*, 22, 761-773.

St-Onge, B., J. Jumelet, C. Vega et M. Cobello, (2004). Measuring individual tree height using a combination of stereophotogrammetry and lidar, *Canadian Journal of Forest Research*, 34 : 2122-2130.

Torrens, P. M. & Nara, A. (2007) Modeling gentrification dynamics : A hybrid approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31, 337-361.

USDA FOREST SERVICE, (2002) *Proceedings : Land Type Associations Conference : Development and Use in Natural Resources Management, Planning and Research*, Smith, M.J. (ed). April 24 – 26, 2001 University of Wisconsin Madison, Wisconsin

van Aardt, J.A. ; Wynne, R.H. ; Scrivani, J.A., (2008) Lidar-based Mapping of Forest Volume and Biomass by Taxonomic Group Using Structurally Homogenous Segments, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 74, 8, pp. 1033-1044

Walliser, B. (2006). Les phénomènes émergents. Publication en ligne. Inédit. <http://www.pse.ens.fr/walliser/pdf/phenom.pdf>

White, J., Wulder, M. et Grills, D. (2006) ; Detecting and mapping mountain pine beetle red attack damage with SPOT-5 10 m multispectral imagery, *BC Journal of Ecosystems and Management*, vol. 7, No. 2, pp. 105-118.

White, R. & Engelen, G. (1993) Cellular Automata and Fractal Urban Form : A Cellular Modeling Approach to the Evolution of Urban Land Use Patterns. *Environment and Planning A*, 25, 1175-1199.

Wooldridge, M. (2002) *An Introduction to Multi-agent Systems*, Cambridge, Wiley, 348 pages.

Zonneveld, I. (1989) The land unit : a fundamental concept on landscape ecology. *Landscape ecology*, 3 (2) : 67-89.

RÉSUMÉS

Le processus de planification territoriale et environnementale a pour objectif de produire à la fois des idées tout autant que de l'information afin d'éclairer et de guider les praticiens en aménagement du territoire vers des décisions dont ils conservent, ultimement, la responsabilité. Il en résulte une complexité tant aux niveaux conceptuel que méthodologique qui impose l'usage d'outils et de méthodes nombreux et variés : méthodes d'enquêtes et de statistiques, systèmes d'information géographique, aide multicritère à la décision, modèles physiques et/ou conceptuels, méthodes de gestion participative etc. Trouver les modalités d'une articulation fonctionnelle entre ces outils et leurs objets nécessite une réflexion sur (1) l'objet d'étude lui-même, (2) le potentiel d'intégration des interactions et des contingences environnement/société par l'outil de modélisation, et (3) le potentiel de synthèse de l'information géographique, en

termes d'enjeux soutenant l'aide à la décision. Notre contribution vise à présenter trois outils de modélisation utilisés en planification territoriale et environnementale au cours de ces 25 dernières années en Amérique du Nord. Ces trois outils sont (1) la modélisation cartographique, d'inspiration naturaliste et axée sur l'objectivation du milieu physique, (2) la modélisation visuelle ou géovisualisation, davantage dirigée vers le paysage, et (3) la modélisation spatiale proprement dite qui regroupe les automates cellulaires et les approches multiagents, destinés à la modélisation des interactions fines entre les individus, et entre les individus et leur territoire. Ces trois approches constituent un corpus d'outils dont l'intérêt d'utilisation réside dans le traitement qu'ils permettent d'un aspect en particulier de l'espace géographique : le milieu naturel, le paysage, le territoire, lesquels composent le géosystème.

Regional planning process must produce ideas, not only geographical information. Moreover, this process is not intended to substitute to the role of decision-makers but rather to inform them and guide them towards decisions for which they preserve responsibility. There is a large set of tools and methods existing to assume the inherent complexity of regional planning process : statistics and surveys, GIS, multicriteria decision aid, physical and/or conceptual model, participatory methods etc. Finding a functional articulation between these tools and their objects requires a reflection on (1) the object of study itself, (2) the integration capabilities of the tools, and (3) their synthesis capabilities. Here, we are addressing three modeling tools used in territorial and environmental planning during the past 25 years in North America. This tool set is based on (1) ecological mapping where focus is put on the description of natural/physical landscape, (2) landscape-oriented visual modeling or geovisualization, and (3) spatial modelling which includes cellular automata and multiagent systems which use are intended for the detailed modeling of interactions between individuals and between individuals and their living space. These three approaches are forming a corpus of tools that allow us to address one of the aspects of geographical space : the natural environment, the landscape, the territory, which built-up the geosystem.

INDEX

Keywords : regional planning, method, geosystem, landscape, modeling, simulation, system, agent-based model, geovisualization

Mots-clés : planification, méthodologie, paysage, environnement, modélisation, simulation, système multiagent, géovisualisation

AUTEURS

JEAN-FRANÇOIS GUAY

Jean-François Guay est géographe. Il occupe comme fonction principale le poste de conseiller scientifique au sein du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et est chercheur-doctorant à l'Institut des Sciences de l'Environnement de l'Université du Québec à Montréal. Ses travaux portent principalement sur la modélisation spatiale du territoire et de l'environnement ainsi que sur la simulation de scénario de planification territoriale à l'aide des SIG et systèmes multiagents. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Direction générale du développement régional et du développement durable - Région Chaudière-Appalaches, 675, route Cameron, Sainte-Marie (Québec), G6E 3V7, Téléphone : (418) 386-8116 #1521, Courriel : jean-Francois.Guay@mapaq.gouv.qc.ca

JEAN-PHILIPPE WAAUB

Jean-Philippe Waaub est professeur titulaire au département de géographie de l'Université du Québec à Montréal. Il est directeur du Groupe d'études interdisciplinaires en géographie et environnement régional (GEIGER) ainsi que membre du Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions (GERAD). Ses travaux portent principalement sur l'évaluation environnementale (impacts, suivi, participation, évaluation stratégique), l'aide multicritère à la décision, ainsi que la modélisation énergie et environnement (changements climatiques). Il est l'auteur de Gauthier, M., Simard, L., Waaub, J.-P. 2010, "Public participation in strategic environmental assessment (SEA) : critical review and the Quebec (Canada) approach". Accepted for publication 31-01-10 in Environmental Impact Assessment Review. Boubacar, D., Waaub, et J.-P., 2007, « Études d'impacts des projets routiers et protection des ressources forestières en milieu de savane africaine : l'exemple du Niger ». BELGEO, no 2. Manuscrit 2005. De Jong, M., Waaub, J.-P., 2007, "Policy models and Developing Countries". Special issue in Knowledge, Technology and Policy. vol. 19, No 4. Graillot, D., Waaub, J.-P. 2006, « Aide à la décision pour l'aménagement du territoire : méthodes et outils ». Série Aménagement du territoire (Traité IGAT), Hermès, Lavoisier, London, Royaume-Uni. Département de géographie, Université du Québec à Montréal, C.P. 8888, succ. Centre-ville, Montréal (Québec) H3C 3P8, Canada. Tél. (514) 987-3000 #8908. Courriel : waaub.jean-philippe@uqam.ca