
Éclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols

Une approche comparative

**Jean-François Mas¹ — Melanie Kolb² — Thomas Houet³
Martin Paegelow³ — María Teresa Camacho Olmedo⁴**

¹ *Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, CP 58190 Morelia Michoacán México*
jfmas@ciga.unam.mx

² *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad Liga Periférico - Insurgentes Sur, Núm. 4903, Col. Parques del Pedregal Delegación Tlalpan, 14010 México, D.F. – México*
Posgrado en Geografía- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
melanesien@gmail.com

³ *Laboratoire GEODE Maison de la Recherche de l'Université du Mirail 5, Allées A. Machado - F-31058 Toulouse cedex*
thomas.houet ; paegelow@univ-tlse2.fr

⁴ *Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física Facultad de Filosofía y Letras Universidad de Granada Campus de Cartuja s/n. 18071 Granada España*
camacho@ugr.es

RÉSUMÉ. Durant les dernières décennies, une variété de modèles ont été développés pour simuler les changements futurs des modes d'occupation et d'usage des sols. Dans cette étude, nous avons comparé quatre logiciels de modélisation : CLUE-S, DINAMICA EGO, CA_Markov et Land Change Modeler. Nous avons examiné les différentes méthodes et outils disponibles dans chaque modèle pour reproduire les étapes nécessaires pour une telle approche de modélisation : 1) estimation de la quantité de changement, 2) caractérisation des changements observés par des variables explicatives, 3) allocation spatiale des changements, 4) reproduction des patrons spatiaux, 5) évaluation de la performance du modèle et 6) capacité pour développer des modèles sophistiqués. Pour illustrer cette analyse, les modèles ont été appliqués à des études de cas théoriques très simples. Nous avons comparé les différents résultats issus de cette démarche de modélisation (projection des

surfaces de changements futurs, cartes de probabilité de changement, cartes des modes d'occupation et d'usage des sols futurs) afin d'objectiver nos conclusions portant sur la flexibilité et la capacité des modèles pour effectuer les différentes tâches listées. Le but de cette étude vise à éclairer les futurs utilisateurs à faire un choix de modèle approprié suivant leur problématique.

ABSTRACT. During the last decades, a diversity of models has been developed to simulate future land use and land cover changes (LUCC). In this paper, we compared four modeling tools: CLUE-S, DINAMICA EGO, CA_MARKOV and Land Change Modeler. We assessed the methods and tools available for each modeling tool within these models based on the six steps necessary for a generic framework of LUCC modeling: 1) estimating the quantity of LUCC, 2) identifying and assessing the influence of variables related to observed LUCC, 3) spatial allocation of future LUCC, 4) simulation of specific landscape patterns/LUCC, 5) assessing the model's ability to simulate LUCC and 6) capacity of sophisticated model development to simulate complex LUCC. To illustrate this comparative analysis, the four models have been applied to a simple theoretical case study. We compared the tools and methods of each model, as well as the results of the simulations to assess their performance in all the listed steps of the LUCC modeling process. The aim of this study is to help modelers in the choice of an appropriate model regarding their modeling purpose.

MOTS-CLÉS: modèle, changements d'occupation et d'utilisation des sols, simulation, prédiction, prospective.

KEYWORDS: model, land use and land cover changes, simulation, predictive, prospective.

DOI:10.3166/RIG.15.297-322 © 2011 Lavoisier, Paris

1. Simulation des changements d'occupation et d'utilisation des sols : un fort besoin d'éclairer le choix d'un modèle

Durant les dernières décennies, un grand nombre de modèles de simulation des changements d'occupation et d'utilisation des sols (LULCC¹) ont été développés pour répondre aux besoins relatifs à la gestion du territoire et d'aide à la décision : comprendre et évaluer les LULCC (Où les changements se produisent-ils ? Quelle est leur ampleur surfacique ? Au détriment de quoi se font-ils ?), projeter dans le futur l'impact des LULCC suivant des approches prédictives (Corgne *et al.*, 2004) et/ou prospectives (Houet *et al.*, 2008a). La modélisation, surtout si elle est « spatialement explicite » est une technique importante pour la projection et l'exploration de scénarios prospectifs alternatifs, la réalisation d'expériences de simulations qui testent notre compréhension des processus clés et la description de ces dernières en termes quantitatifs (Veldkamp et Lambin, 2001).

Dans la littérature, les LULCC sont modélisés de manière empirique à partir d'une analyse des évolutions passées, qui permet de développer un modèle

1. Nous utilisons ici l'acronyme des termes anglophones « Land use and land cover changes » (LULCC) et « Land use and land Cover » (LULC) consacrés par la communauté scientifique tant dans la littérature (Lambin and Geist 2006) que dans les projets scientifiques internationaux (LUCC project - <http://www.igbp.net/page.php?pid=250>; LAND project - <http://www.globallandproject.org/>) qui n'ont pas d'équivalent en français.

mathématique qui estime la probabilité² de changement en fonction d'un ensemble de variables explicatives. L'analyse spatiale des changements se base la plupart du temps sur la comparaison de deux cartes des modes d'occupation et d'usages des sols (LULC) correspondant à des dates passées plus ou moins éloignées. Cette comparaison permet d'estimer les tendances (taux de changement) et d'identifier les processus de changement (transitions d'un type d'occupation des sols vers un autre). L'analyse des relations spatiales entre les changements observés dans le passé et les variables explicatives identifiées de façon empirique, statistique, à dire d'experts ou participative (Bürgi *et al.*, 2004 ; Overmars *et al.*, 2007 ; Cuevas et Mas 2008 ; Houet *et al.*, 2008b), permet de cartographier la probabilité des différentes transitions. Ces cartes de probabilité peuvent être considérées comme un premier produit de la modélisation *per se*. Des procédures supplémentaires, utilisées pour simuler des futurs LULCC, font appel à des techniques d'allocation spatiale spécifiques, destinées à 1) allouer une quantité de changements attendus d'après des projections des LULCC historiques observés et 2) reproduire des patrons spatiaux réalistes des processus d'évolution des paysages (Soares-Filho *et al.*, 2002 ; Sohl *et al.*, 2007 ; Castella et Verburg, 2007). Enfin, une évaluation de la performance du modèle est habituellement menée et basée sur la coïncidence spatiale entre une carte simulée et une carte « réelle » généralement obtenue par la classification de données de télédétection et qui sert de référence (Pontius *et al.*, 2004, 2008).

Les logiciels de modélisation utilisent des outils (méthodes, algorithmes...) qui ont des exigences différentes, qui sont parfois fondés sur des hypothèses distinctes et/ou pouvant être au final plus ou moins appropriés selon les données d'entrée disponibles et les objectifs de la modélisation. Bien que certains modèles aient été largement utilisés, il existe peu d'études d'évaluation et comparaison de modèles visant à la compréhension des avantages et des limites de leurs outils (Paegelow et Camacho Olmedo, 2005, 2008 ; Pontius *et al.*, 2008 ; Camacho Olmedo *et al.*, 2010). Cette étude vise à comparer et évaluer des modèles existants pour simuler les LULCC, afin d'éclairer le choix des futurs utilisateurs.

La simulation des LULCC repose sur un premier choix implicite, de la part des utilisateurs, orientant soit vers l'usage d'un modèle qui reproduise les patrons paysagers des LULCC soit vers l'usage d'un modèle qui simule les processus d'usages des sols. S'il existe plusieurs outils de modélisation disponibles librement ou non et avec une interface Hommes-Machine ergonomique pour des utilisateurs, il n'en existe pas pour le moment pour le second type de modèles (Houet et Gaucherel, 2007). Seules des plateformes sont disponibles mais requièrent le développement d'applications. Dès lors, nous avons comparé quatre solutions logicielles, représentatives des approches existantes et regroupant un large éventail de méthodes et d'outils de modélisation, parmi les plus utilisées et/ou diffusées : CA_MARKOV sur IDRISI (Eastman, 2009), CLUE-S (Verburg *et al.*, 2002, Verburg et Overmars, 2009), DINAMICA EGO (Soares-Filho *et al.*, 2002, 2006, 2009) et Land Change

2. Nous employons le terme de probabilité même si dans certains modèles il ne s'agit pas de probabilité au sens strict.

Modeler (disponible sur IDRISI et comme extension de ARC-GIS) (Eastman, 2009). Enfin, à partir de ces éléments de comparaison, nous discuterons de la pertinence de ces outils de simulation suivant l'usage auquel il se destine.

2. Approche comparative : processus de modélisation, fonctionnement, simulations, usages

L'approche comparative proposée dans cet article s'appuie sur deux constats :

– il existe une forte confusion des termes employés dans ce domaine qui peut porter préjudice à l'appréhension des outils de simulation existants. En effet, parmi les quatre outils cités, certains auteurs les appellent « modèles » alors que ceux-ci reposent sur différentes approches méthodologiques ou modèles (probabiliste, intelligence artificielle, mécaniste, etc.) (Coquillard et Hill, 1997). De plus, ces outils, appelés aussi parfois « logiciels » en terme d'usage informatique, peuvent être intégrés dans des logiciels de géomatique aux fonctionnalités beaucoup plus larges. De même, il existe une forte confusion entre les termes « modélisation » et « simulation » dans la littérature scientifique (Le Berre et Brocard, 1997) tant francophone qu'anglophone (*modeling and simulation*). Si la modélisation peut se résumer à une description conceptuelle du fonctionnement d'un système, la simulation immerge le modèle dans le temps. Ainsi, des cartes prédictives ou prospectives sont souvent considérées comme le résultat d'une modélisation, alors que *stricto sensu* il s'agit de produits d'une simulation ;

– une analyse bibliographique des travaux reposant sur ces outils de simulation (Briassoulis, 2000 ; Kanevski et Maignan, 2004 ; Mas *et al.*, 2004 ; Wainwright et Mulligan, 2004 ; Houet et Hubert-Moy, 2006 ; Paegelow et Camacho Olmedo, 2005, 2008 ; Pontius *et al.*, 2008 ; Camacho Olmedo *et al.*, 2010), met en évidence qu'ils reposent tous sur un processus commun de modélisation des changements des modes d'occupation et d'utilisation des sols. Il se décline en quatre étapes relatives au fonctionnement des modèles (figure 1) :

- 1) une procédure non spatiale qui estime les quantités de chaque transition,
- 2) une procédure spatiale qui détermine la probabilité de changements,
- 3) une composante spatiale qui distribue les changements dans l'espace,
- 4) éventuellement un module spatial chargé de reproduire les caractéristiques du paysage.

Dans un premier temps, les méthodes et modèles offerts par ces outils de simulation ont été comparés pour chacune de ces quatre étapes. A cela s'ajoute une comparaison de l'aptitude des outils à simuler des changements d'occupation et d'usages des sols. Cette analyse comparative s'appuie sur une base de données volontairement simplifiée qui intègre des types de dynamiques théoriques de changements d'usages des sols, aussi bien présentes sur des fronts pionniers (Follador *et al.*, 2008) que dans des territoires sujets à l'étalement urbain (Aguejda et Houet, 2008). La procédure d'évaluation est basée sur la comparaison de la carte

simulée pour une date donnée avec une carte de référence (la réalité) à la même date. Nous avons également examiné un aspect relatif à l'usage des modèles en évaluant la possibilité de simuler des LULCC plus sophistiqués (suivant des motifs spatiaux, des transitions d'un type d'occupation des sols à un autre plus complexe, etc.), la facilité d'utilisation et la disponibilité de documentation de support.

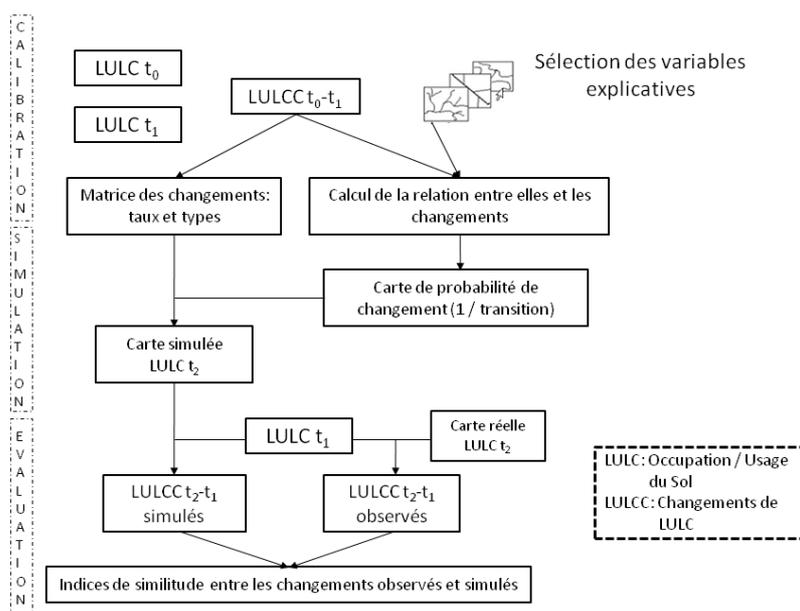


Figure 1. Démarche générale de modélisation et de simulation des LULCC

Enfin, si ces outils sont généralement utilisés pour simuler des changements probables à plus ou moins long terme des modes d'occupation et d'usages des sols, leur usage dépend fortement de l'approche prospective adoptée, exploratoire ou normative (Houet *et al.*, 2010). Ainsi, les méthodes et modèles disponibles dans chacun de ces outils de simulation présentent une aptitude variable selon :

- le type de simulation que l'on souhaite produire ; c'est-à-dire reposant sur un scénario de type exploratoire ou normatif ;
- que l'on souhaite injecter ou non des connaissances d'experts ou limiter le nombre d'inputs à prendre en compte ;
- les objectifs scientifiques qui peuvent tantôt reposer sur la prise en compte d'un LULCC en particulier, tantôt à l'étude de l'évolution de l'ensemble des LULC.

Nous parlerons ainsi dans cet article de « solution logicielle » ou encore « d'outils » afin de ne pas apporter plus de confusions aux termes communément employés de « modèle » ou « logiciel ». L'objectif est de fournir au lecteur une vision objective quant au choix de l'une ou l'autre des solutions logicielles, à travers la comparaison des méthodes et modèles mobilisés lors des différentes phases du processus de modélisation.

3. Evaluation sur un jeu de donnée théorique

Afin d'évaluer les différents outils des modèles, nous avons créé un jeu de données théorique très simple qui comporte 1) une carte de LULCC avec deux principaux types de transitions qui diffèrent par leur distribution géographique et la taille des parcelles et 2) trois variables explicatives (deux continues : distance à la route et altitude, une catégorielle : type de sol) qui influencent les LULCC. L'avantage d'un cas théorique est de pouvoir élaborer des cas très simples dont l'interprétation est facile, contrôler les relations entre LULCC et variables explicatives et construire des situations spécifiques afin de tester certains traits particuliers des méthodes et outils évalués.

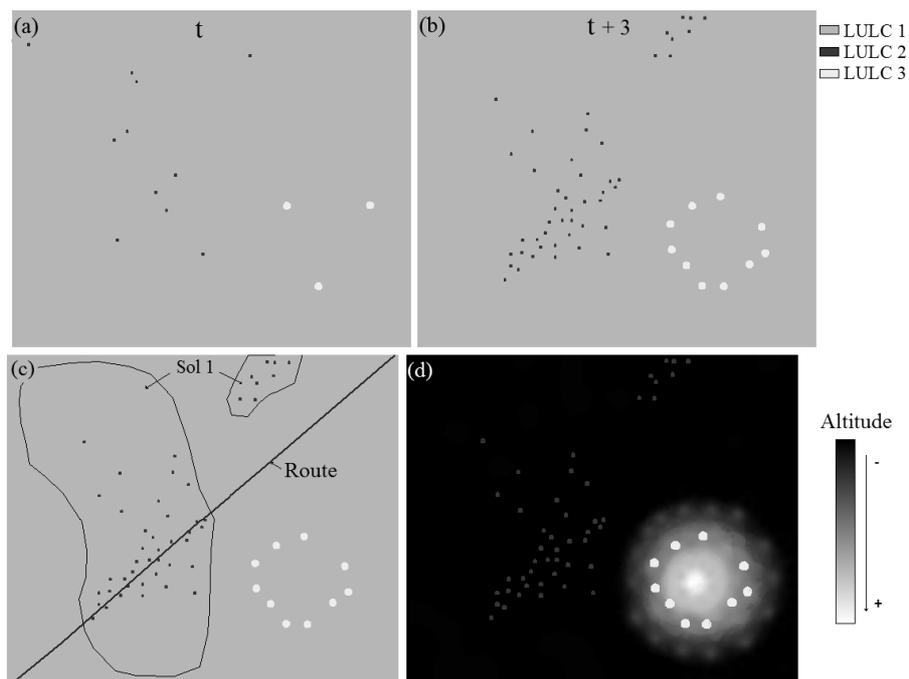


Figure 2. Cas théorique : Distribution des types de LULC à t (a) et $t+3$ (b), Distribution des types de LULC ($t+3$) par rapport à la route et au type de sol (c) et à l'altitude (d)

Ce jeu de données théorique s'inspire des types de changements des modes d'usages des sols observés sur les fronts de colonisation agricole en milieu tropical (déforestation) (Soares-Filho *et al.*, 2002 ; Díaz-Gallegos *et al.*, 2010) sur des territoires urbanisés soumis au phénomène d'étalement urbain (développement de « village-rue »). Il se compose d'une carte des types d'occupation du sol aux dates t et $t + 3$ (Figures 2a et 2b). Une route représentée en noir influence les LULCC : plus on est proche de celle-ci, plus la situation est favorable à l'apparition de LULC2. Les types de sols influencent également les LULCC : les sols de type 1 sont favorables à un changement vers LULC2 (Figure 2c). L'altitude constitue un dernier facteur de changement vers le LULC3 tel que le présente la figure 2d.

Deux exemples illustratifs sont réalisés pour tester les capacités des modèles à simuler les LULCC :

- exemple 1 : calcul de la probabilité de changement du LULC1 vers le LULC2 en fonction de la distance à la route et du type de sol. Dans notre cas théorique les LULCC du LULC 1 à LULC2 sont plus fréquents à proximité de la route et se présentent uniquement dans le type de sol 1. A cela s'ajoute que le premier type de LULCC concerne des parcelles beaucoup plus petites que le second ;

- exemple 2 : intégration de l'influence d'une altitude optimale pour des changements du LULC1 vers LULC3. Les LULCC de LULC 1 à LULC 3 se réalisent uniquement dans une certaine plage altitudinale.

4. Résultats

4.1. Estimation de la quantité de changement

Avec CA_MARKOV, DINAMICA et LCM, la quantité de changement est calculée à l'aide de chaînes de Markov, synthétisée sous forme d'une matrice de transition, généralement obtenue par la comparaison de cartes d'occupation et d'utilisation des sols à deux dates différentes. La matrice de transition entre la date de t_0 et t_1 (qui déterminent la période T), obtenue en superposant les deux cartes d'occupation des sols, indique la surface (ou le nombre de pixels) pour chaque transition. Cette matrice peut être transformée en une matrice de probabilité de transition qui permet de réaliser des projections pour une ou plusieurs dates futures (dates t_n). Les projections jusqu'à une date future t_n sont réalisées, la plupart du temps, soit en un seul pas de temps, soit suivant un nombre d'itérations ayant une signification temporelle précise (ex : évolution annuelle). Avec DINAMICA, la matrice de transition est transformée en taux de transition annuel pour projeter les changements sur une base annuelle en appliquant une équation de calcul matriciel (équation [1]). Avec CA_Markov et LCM, les probabilités de transition annuelle sont obtenues par une simple correction linéaire des probabilités de transition. Avec CLUE-S, l'utilisateur doit fournir les quantités (nombre de pixels) des catégories d'occupation des sols pour chaque année de simulation.

$$P^t = HVH^{-1} \quad [1]$$

où P est la matrice originale, H la matrice des vecteurs propres, V une matrice dérivée des valeurs propres, et t est une fraction ou un multiple de la période de temps (ver Takada et al., 2010).

IDRISI propose également une correction des valeurs de probabilité de la matrice qui tient compte de la fiabilité des cartes d'occupation des sols. Cette fiabilité traduit le niveau de confiance que nous avons de la qualité de la carte produite, par exemple par classification d'une image satellite. Les méthodes de classification ne permettant pas de réaliser des cartes parfaites, cette option permet de relativiser la confiance apportée aux quantités estimées de changements attendus. Cette correction consiste à réduire les probabilités les plus élevées (probabilités supérieures ou égales à celles des transitions de permanence) proportionnellement à l'erreur et à modifier les autres valeurs de probabilités afin que la somme des colonnes soit égale à 1. Le tableau 1 présente une matrice de transition avec quatre transitions possibles entre différents types de LULC. Dans le tableau 2, il est possible d'observer que les matrices générées par DINAMICA et IDRISI (sans correction) sont très semblables. Au contraire, la correction réalisée par IDRISI pour corriger les biais liés à la qualité des données (ex : erreurs de classification) modifie toutes les probabilités de transition et affecte les projections de façon significative (figure 3).

t	t_{+3}		
	LULC 1	LULC 2	LULC 3
LULC 1	392499	1066	1168
LULC 2	130	156	0
LULC 3	146	0	292

Tableau 1. Matrice de transition en nombre de pixels ($T = 3$ ans)

t	t_{+3}		
	LULC 1	LULC 2	LULC 3
LULC 1	0.9943	0.0027	0.0030
LULC 2	0.4545	0.5455	0.0000
LULC 3	0.3333	0.0000	0.6667

Tableau 2. Matrice de probabilité de changement ($T = 3$ ans)

IDRISI (sans correction des erreurs cartographiques)			
t	$t+1$		
	LULC 1	LULC 2	LULC 3
LULC 1	0.9974	0.0014	0.0013
LULC 2	0.2274	0.7726	0.0000
LULC 3	0.1445	0.0000	0.8555

IDRISI (avec correction des erreurs cartographiques estimées à 15 %)			
t	$t+1$		
	LULC 1	LULC 2	LULC 3
LULC 1	0.8478	0.0781	0.0742
LULC 2	0.3433	0.6567	0.0000
LULC 3	0.2728	0.0000	0.7272

DINAMICA			
t	$t+1$		
	LULC 1	LULC 2	LULC 3
LULC 1	0.9978	0.0011	0.0011
LULC 2	0.1835	0.8165	0.0000
LULC 3	0.1268	0.0000	0.8732

Tableaux 3. Matrices de probabilité de changement ($T = 1$ an)

Il est également important de noter que généralement, se sont les transitions de permanence qui présentent des valeurs de probabilité élevées. La correction a donc tendance à réduire les probabilités de permanence et d'augmenter celles des autres transitions. Cependant, dans le cas d'une matrice construite à partir de la comparaison de deux cartes produites de façon indépendante, les erreurs de classification entraînent une surestimation des transitions de changement. Par conséquent, la correction offerte par IDRISI pourrait exacerber les erreurs dans la matrice plutôt que de les réduire. Dans le cas présenté ici, après cette correction, certaines transitions de faible probabilité ($< 0.1\%$) entre t et $t+3$ (de LULC1 vers LULC2 ou LULC3) ont une probabilité supérieure à 7 %.

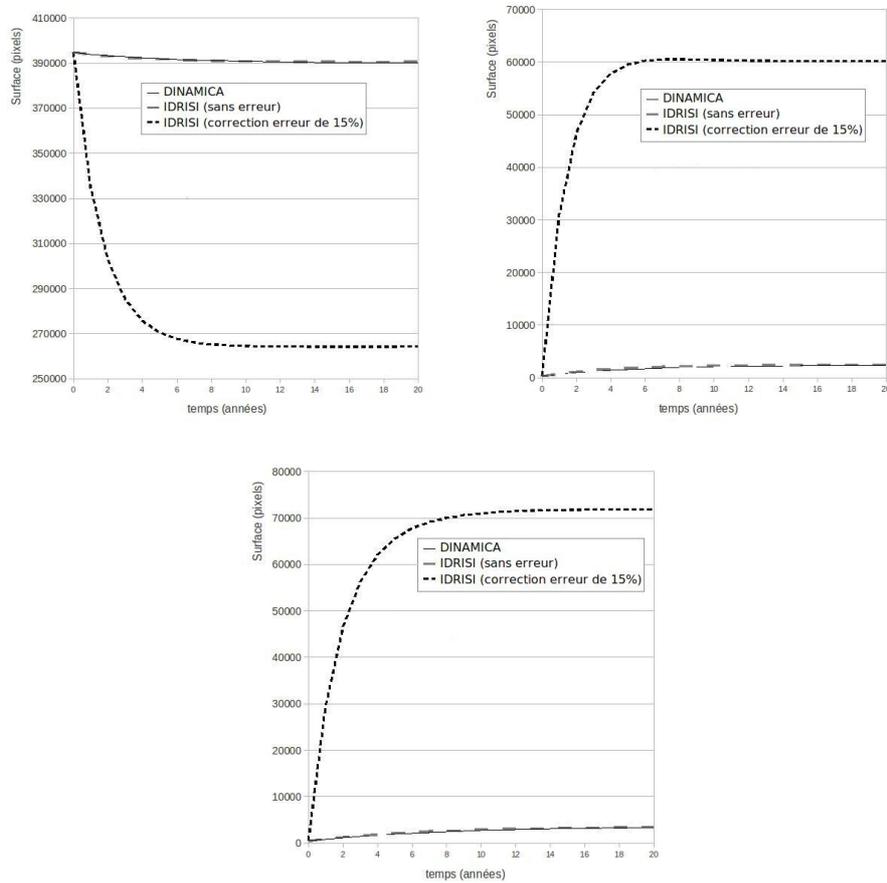


Figure 3. Surfaces des trois catégories d’LULC projetées sur la base des trois matrices de probabilité de changement en fonction du temps (nombre d’années). Les surfaces estimées par IDRISI (sans correction) et DINAMICA sont très semblables et les courbes se superposent, au contraire les modifications faites par la correction des erreurs cartographiques augmentent drastiquement le rythme de changement

4.2. Évaluation de la probabilité de changement

La probabilité de changement dépend de la distribution des variables biophysiques et socio-économiques qui influencent les LULCC. Les variables les plus couramment utilisés sont la pente, la distance aux voies de communication et aux agglomérations, les types de sols (Pontius *et al.*, 2008). La probabilité d’occurrence d’un type de transition donnée (LULC_x vers LULC_y) peut être définie à travers deux approches légèrement différentes: la détermination de l’aptitude d’un

site pour un type d'occupation et d'utilisation du sol ou le calcul de la probabilité des types de transitions.

CA_Markov et CLUE-S utilisent des cartes qui expriment l'aptitude pour chacune des catégories d'occupation et d'utilisation des sols. LCM et DINAMICA calculent la probabilité de chaque transition. Ces données restituées sous forme de cartes sont produites à partir de la relation entre les variables explicatives et les types d'occupation et d'utilisation des sols pour CA_Markov et CLUE-S, et entre les variables explicatives et les transitions observées entre t_0 et t_1 pour les deux autres outils de modélisation. Avec CA_Markov, les cartes d'aptitude sont générées à l'aide d'une évaluation multi-critères supervisée. CLUE-S requière d'utiliser une méthode statistique (régression logistique multi-variée) provenant de programmes informatiques indépendants. DINAMICA calcule une carte de probabilité en utilisant la méthode des poids d'évidence. Ces poids peuvent éventuellement être modifiés en utilisant un algorithme génétique pour améliorer la concordance entre les cartes de probabilité de changement et les cartes d'occupation et d'utilisation des sols utilisées pour le calibrage du modèle. LCM propose d'utiliser soit un réseau de neurones (perceptron multicouches) pour produire la carte de probabilité, soit une régression logistique.

Ces méthodes reposent sur des principes distincts et requièrent des traitements préalables des variables explicatives différents :

1) Les modèles de simulation des LULCC requièrent, pour établir des cartes de probabilité de changement d'un type d'occupation du sol vers un autre, une représentation quantifiée des variables explicatives. Le perceptron multicouche et les modèles de régression logistique utilisent de préférence des variables continues. LCM propose un outil permettant d'intégrer des variables catégorielles moyennant une transformation des différentes catégories concernées (données qualitatives) en données quantitatives. Leur poids respectif est calculé par une méthode d'analyse de vraisemblance basée sur la fréquence relative des pixels qui appartiennent à différentes catégories pour les régions ayant observées un changement. Par exemple, au lieu d'utiliser un jeu de cartes binaires (variables booléennes) pour représenter une carte catégorielle de types de sol, la probabilité de changement est calculée, pour chaque catégorie de sol, suivant la part de pixels ayant subi un certain changement. La méthode des poids d'évidence se base sur des variables catégorielles et requière donc une phase de traitement préalable pour transformer les variables continues en catégorielles sur lesquelles seront calculées les probabilités de changements. Dans DINAMICA, cette opération est assurée par un outil permettant d'optimiser cette transformation ;

2) Les modèles de régression logistique et la méthode des poids d'évidence se basent sur l'hypothèse d'indépendance entre les variables explicatives. Souvent, cette condition n'est pas remplie en raison de la forte corrélation entre les variables spatiales. DINAMICA et LCM proposent des outils pour évaluer la corrélation entre les cartes afin de sélectionner les variables à conserver ou non (coefficient de Cramer, Chi carré, coefficient de corrélation et indice de Kappa dans LCM ; indice de Cramer, de contingence et incertitude d'information commune dans

DINAMICA). Ces outils ont pour vocation d'éclairer l'utilisateur dans le choix des variables. Mais il est précisé dans la littérature (Pontius *et al.*, 2008 ; Eastman, 2009) que même si deux variables sont fortement corrélées, leur influence respective peut aussi concerner des portions de territoires spécifiques, ou représenter des processus d'évolution des paysages distincts, et qu'il convient de les conserver malgré tout ;

3) Le calcul des probabilités de changement par les différents modèles permettant d'ajuster la relation entre les variables explicatives et la probabilité de transition repose sur des méthodes, et par corollaire des principes, différents. Les méthodes reposant sur l'intelligence artificielle (réseaux de neurones, algorithme génétique) et les modèles de régression logistique prennent en compte simultanément toutes les variables explicatives tandis que les poids d'évidence sont calculés indépendamment pour chaque variable. Lors du calcul de la carte de probabilité à partir des méthodes utilisant les poids d'évidence, la probabilité repose sur la somme des poids de chaque variable produisant un effet additif de l'action des différentes variables. Par ailleurs, dans le cas des régressions logistiques et des poids d'évidence, une forte corrélation entre les variables spatialisées influençant l'évolution des LULCC, peut engendrer un effet cumulatif de l'influence de chaque variable. En revanche, les réseaux neuronaux et les algorithmes génétiques peuvent générer des fonctions non-linéaires, en tenant compte des synergies ou des effets inhibiteurs entre les variables. Ces méthodes sophistiquées, fondées sur l'apprentissage, permettent ainsi de prendre en compte l'influence de l'ensemble des variables et dont les effets peuvent ne pas être uniformes dans l'espace contrairement aux autres méthodes telle que les régressions logistiques (Aguejda et Houet, 2008) ;

4) Les méthodes diffèrent aussi dans leur capacité pour modéliser des relations entre la probabilité de changement et les variables explicatives (effet non continu, effet de seuils ...). Les modèles de régression logistique ne peuvent modéliser correctement qu'une fonction sigmoïdale. Dans la méthode du poids d'évidence, un poids est calculé pour chaque catégorie, ce qui permet de créer une fonction très complexe. Les réseaux de neurones sont capables d'ajuster des fonctions non linéaires. Toutefois, la capacité de modéliser des fonctions complexes avec une grande capacité d'adaptation n'est pas nécessairement un avantage, car elle peut conduire à un sur-ajustement de la relation probabilité de changement/variables explicatives et du poids respectif des variables aux caractéristiques de la période de calibrage ;

5) Ces méthodes fournissent également différents degrés d'intégration d'expertise. L'évaluation multicritères (CA_Markov) permet de prendre en considération les connaissances des experts à partir de calculs réalisés à l'aide d'autres fonctionnalités existantes dans IDRISI, tandis que la régression logistique et *a fortiori* les réseaux de neurones et algorithmes génétiques non. DINAMICA permet de visualiser les relations entre les variables explicatives et les poids d'évidence et, éventuellement, de modifier leurs valeurs. Par conséquent, suivant les programmes, il est possible de contrôler le niveau d'intégration des connaissances d'experts depuis une approche complètement statistique (sans modifier les valeurs

des poids d'évidence calculées automatiquement) jusqu'à une entièrement basée sur les connaissances d'experts (importante modification des poids par les experts).

4.2.1. Exemple 1

Afin d'illustrer certaines des caractéristiques de ces différentes approches, les programmes ont été appliqués à un cas très simple dans lequel les changements d'occupation des sols (LULC1 vers LULC2) se produisent plus fréquemment à proximité des routes, mais uniquement sur le type de sol 1.

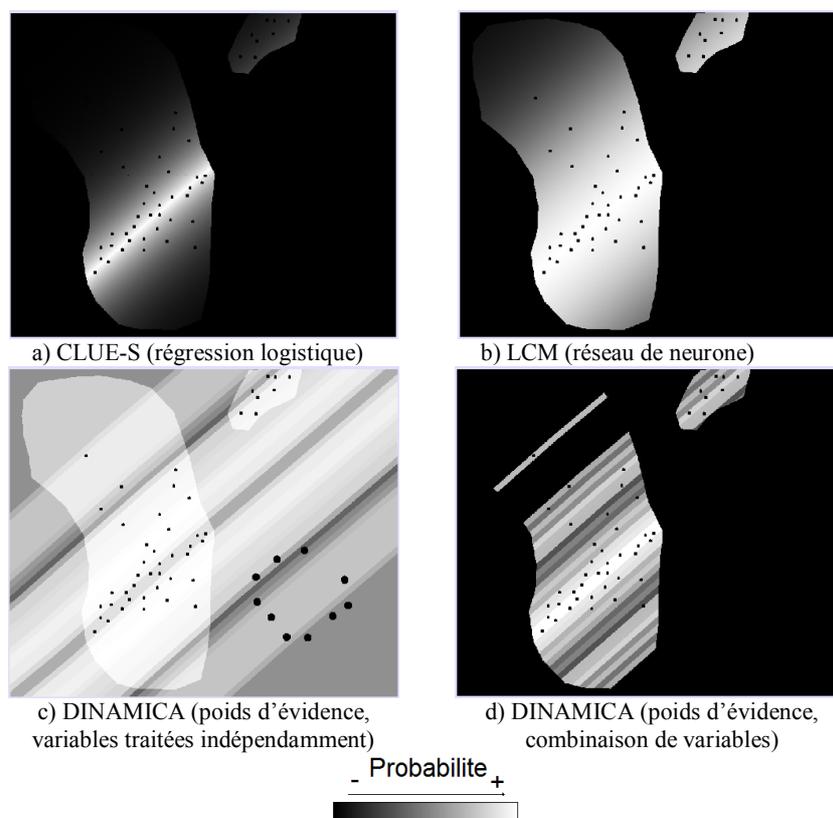


Figure 4. Cartes de probabilité de la transition LULC 1 à LULC 2 obtenues avec les différentes méthodes évaluées

Les résultats montrent que la régression logistique et les réseaux neuronaux ont été en mesure de modéliser directement l'effet combiné du type de sol et de la distance des routes (Figures 4a et 4b). La probabilité de changement est inversement proportionnelle à la distance à la route sur le type de sol 1 et est nulle dans le second

type de sol. La méthode du poids d'évidence ne permet pas d'intégrer l'effet combiné des deux variables à cause du calcul de la probabilité à partir de la somme des poids d'évidence. Les probabilités sur le sol 2 ne sont pas nulles et dépendent de la distance aux routes (figure 4c). L'effet inhibiteur du sol 2 peut être modélisé avec les poids d'évidence en utilisant une variable combinant l'information de distance et de type de sol (figure 4d). Dans le cas de CA_Markov, l'approche experte permet sans doute de modéliser de telles interactions entre variables. Nous ne présentons pas de résultat pour cette approche car ceux-ci dépendent de la méthode choisie pour élaborer les cartes d'aptitude et de l'expérience de l'utilisateur.

4.2.2. Exemple 2

L'évaluation de la capacité des modèles pour élaborer des fonctions complexes sans sur-ajustement a été réalisée par la simulation de deux types de LULCC en utilisant une seule variable explicative. Les changements du LULC1 au LULC3 sont modélisés à l'aide de la carte d'altitude. Les LULCC du LULC 1 au LULC 2 sont modélisés en utilisant uniquement la distance à la route bien que cette relation soit dépendante du type de sol.

Comme on peut l'observer sur la figure 5, seule la méthode des poids d'évidence a été en mesure de créer une fonction qui modélise la plage d'altitude optimale. Toutefois, dans le cas de la distance à la route (figure 6), la flexibilité de cette méthode semble être un désavantage, et les fonctions créées par la régression logistique ou le perceptron multicouche semblent plus vraisemblables.

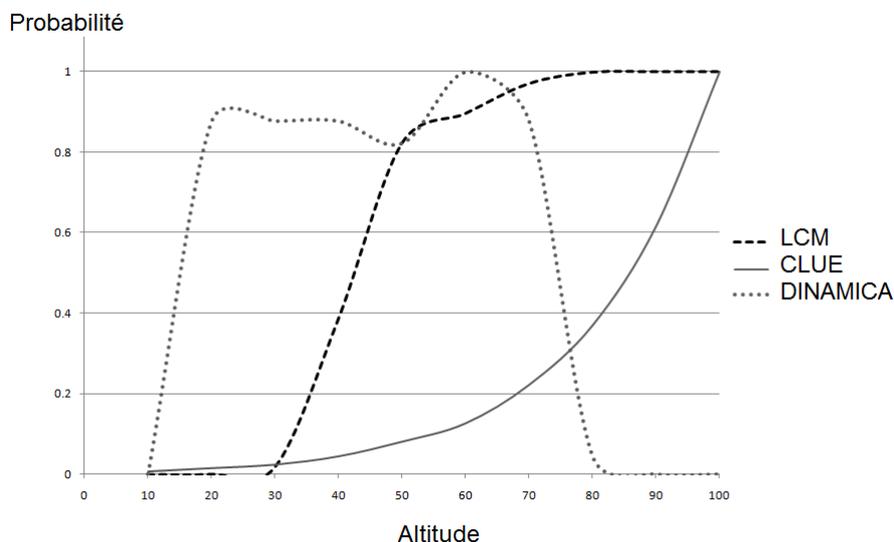


Figure 5. Probabilité de la transition LULC 1 à LULC 3 en fonction de l'altitude

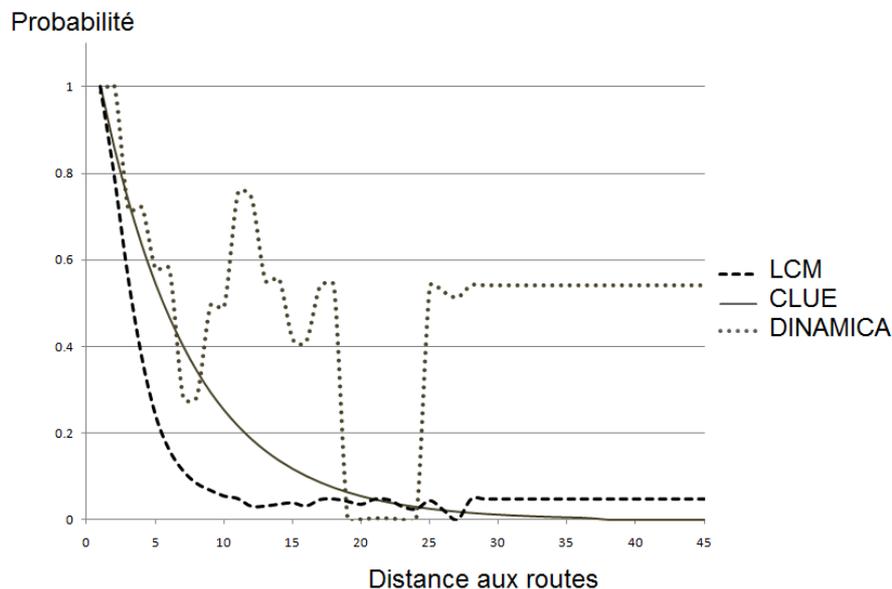


Figure 6. Probabilité de la transition LULC 1 à LULC 2 en fonction de la distance par rapport à la route

4.3. Procédures d'allocation spatiale des changements

L'attribution du changement est un processus de décision qui sélectionne les pixels qui connaîtront un changement à partir des cartes de probabilité de changement ou cartes d'aptitude. Considérant que ce sont les sites les plus susceptibles de changer qui changent effectivement, CA_MARKOV et LCM sélectionnent les pixels qui présentent les valeurs de probabilité les plus fortes. Comme il y a généralement une concurrence entre les différentes transitions (le même site peut être un candidat à différentes transitions), CA_Markov et LCM utilisent une procédure d'affectation multi-objectif basée sur les probabilités des différents types d'occupation du sol et la quantité de changement calculée précédemment. CLUE-S utilise une approche alternative basée sur un processus itératif qui ajuste les quantités de pixels de changement aux quantités données par l'utilisateur en simulant un processus de compétition entre LULC, basé sur les probabilités du modèle logistique et une valeur d'élasticité qui dépend de la réversibilité et la permanence de chaque type de LULCC. DINAMICA utilise une procédure légèrement différente : les pixels sont classés en fonction de leur probabilité de changement et choisis ensuite au hasard dans un rang de probabilités les plus élevées. Un paramètre permet de contrôler la quantité de changements simulés dans les zones moins sujettes à changement, contrairement aux autres où seuls les pixels aux probabilités les plus fortes subiront le changement.

4.4. *Simulation des dynamiques spatiales et temporelles des changements d'occupation et d'utilisation des sols*

CA_MARKOV et DINAMICA utilisent des automates cellulaires (AC) pour reproduire les dynamiques spatiales et temporelles des LULCC et plus particulièrement pour obtenir un effet de proximité (les zones à proximité des sites d'une certaine catégorie sont plus susceptibles de changer vers ce type d'occupation du sol). Dans CA_MARKOV, l'AC estime les espaces voisins à changer à l'aide d'un filtre de taille paramétrable et a pour vocation de faire émerger, localement, les patrons spatiaux dominants. L'utilisateur peut contrôler le nombre d'itérations de l'AC et donc l'effet d'agglomération autour des parcelles existantes ou récemment créées. Cet AC est identique pour toutes les transitions. DINAMICA utilise quant à lui deux AC appelés 1) *expander* et 2) *patcher*. Le premier est consacré uniquement à l'érosion ou la dilatation de parcelles existantes tandis que le second crée de nouvelles parcelles à l'aide d'un mécanisme de semis aléatoire. Ces mécanismes permettent de générer l'expansion de formes existantes et l'émergence de formes spatiales d'usages des sols à l'aide de paramètres qui contrôlent la taille des formes spatiales, leur variation de taille et leur isométrie, de façon indépendante pour chaque transition. CLUE-S ne possède pas d'AC, mais offre la possibilité de modifier la carte de probabilité de changements. Cet ajustement est réalisé par le produit pixel à pixel de la carte des probabilités de changement avec une seconde carte issue d'une régression logistique supplémentaire qui tient compte de la distance aux parcelles existantes (Verburg *et al.*, 2004).

Comme on peut le voir sur la figure 7, la simple sélection des pixels avec une probabilité de changement plus élevée (sans automate cellulaire) ne conduit pas à la reproduction de patrons spatiaux vraisemblables (LCM et CLUE). LCM tend à favoriser les zones à proximité directe de la route pour le LULC2 et celles étant à la même altitude pour le LULC3. Pour la classe LULC 2, on observe très nettement l'effet issu de l'utilisation de variables continues pour caractériser l'influence de la distance à la route. CLUE présente un résultat semblable mais favorise les LULCC à LULC3 en altitude due à la régression logistique. L'AC de CA_Markov permet seulement la croissance de parcelles existantes. Avec DINAMICA il a été possible de créer de nouvelles parcelles en respectant les différences dans la taille des parcelles des LULC2 et LULC3.

Des options supplémentaires, conçues pour reproduire les patrons spatio-temporels, sont disponibles dans certains outils de modélisation pour modéliser des variations de la dynamique des changements. Il s'agit de rendre possible la simulation d'une durée de persistance d'un type d'occupation du sol durant les transitions, des effets de saturation ou encore l'utilisation de variables dynamiques. DINAMICA permet de changer la matrice de Markov à des pas spécifiques de la simulation. Certaines transitions, telles que la succession de cultures sont déterministes et dépendent du temps de séjour de la culture au sein d'une succession culturelle. Seuls CLUE-S et DINAMICA permettent de définir la durée totale de

chaque transition, mais également le temps de présence d'un type d'occupation du sol spécifique au sein d'une transition. Certaines transitions stagnent ou s'arrêtent lorsque la quantité de changement atteint un certain niveau. Par exemple, un front de déforestation se déplace vers l'avant, laissant une certaine quantité de fragments de forêt rémanente. Avec CA_MARKOV et DINAMICA, des procédures pour modéliser les durées de séjour et l'effet de saturation peuvent être facilement mises en œuvre. A cause de sa structure fixe, ces implémentations ne sont pas possibles en LCM. Avec CLUE-S, l'effet de saturation peut être modélisé au détriment d'un autre patron spatial, car l'utilisateur peut utiliser une seule régression logistique supplémentaire pour chaque transition.

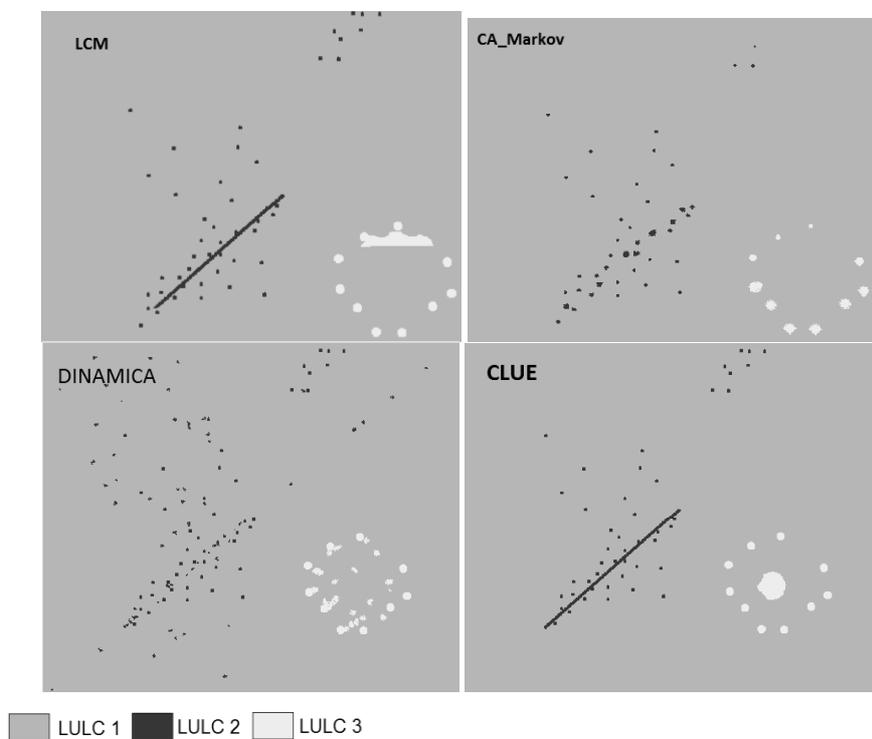


Figure 7. Simulation des LULCC produites par LCM, CA_Markov, DINAMICA et CLUE

L'utilisation de zones de restriction ou d'incitation permet d'ajuster la probabilité de changement à certaines politiques de gestion qui ne peuvent être dérivés à partir des variables explicatives. DINAMICA et LCM permettent l'utilisation de zones de restriction ou d'incitation à un ou plusieurs pas de temps défini(s) par l'utilisateur durant la simulation. Dans CLUE-S, ces zones sont créées

en fournissant une carte avec des valeurs de pixels entre 0 et 1, à fin d'être compatible avec les résultats de la régression mais seulement pour la simulation complète. Avec CA_Markov, les zones de restriction ou d'incitation peuvent être prises en compte lors de l'élaboration des cartes d'aptitude, signifiant qu'elles ne peuvent pas évoluer au cours du temps. Dans ces deux derniers cas, le modèle peut être scindé en plusieurs sous-modèles qui se succèdent au cours du temps pour pouvoir introduire les cartes en cours de modélisation.

4.5. *Evaluation des simulations*

En général, l'évaluation des modèles est basée sur la comparaison entre la carte simulée et une carte de la situation réelle observée (carte réelle). L'évaluation peut concerner la ou les carte(s) de probabilité de changement (appelée aussi « soft classification ») ou les cartes des futures occupations et utilisations des sols. Dans le premier cas, la carte des probabilités de changement (valeurs continues) est comparée avec la carte réelle (valeurs catégorielles). Dans le second cas, les cartes simulée et réelle sont comparées. IDRISI offre un moyen d'évaluer les résultats de la simulation pour chaque cas : 1) la méthode ROC (*Relative Operating Characteristics*) (Pontius, 2000 ; Pontius et Schneider, 2001) ; 2) l'indice Kappa (Ponce, 2000). DINAMICA calcule un indice de similarité floue (Hagen, 2003) qui permet de comparer les cartes d'occupation et d'utilisation des sols simulés et observés avec une certaine tolérance concernant la coïncidence spatiale. Dans CLUE-S, il n'existe pas d'outils d'évaluation propre. Mais l'évaluation de l'analyse de régression logistique est généralement basée sur une analyse ROC réalisée dans un autre logiciel.

On peut remarquer que les méthodes d'évaluation sont toutes orientées sur l'évaluation de la coïncidence spatiale entre les changements simulés et les changements observés. Cette approche peut biaiser les évaluations vers une surévaluation des méthodes qui affectent les changements aux pixels qui présentent les valeurs plus élevées de probabilités de changements. En effet, la reproduction des patrons spatiaux du paysage se fait au dépend de la coïncidence spatiale. Pour les applications dans lesquelles la simulation des patrons spatiaux des paysages est importante, il est recommandé d'évaluer cet aspect, par exemple à l'aide d'indices de fragmentation (Mas *et al.*, 2010). IDRISI permet de calculer différents indices. Dans DINAMICA, un script disponible dans les tutoriels permet également le calcul de certains d'entre eux.

4.6. *Options avancées*

Le développement de modèles plus sophistiqués qui impliquent par exemple la manipulation de sous-régions, telles que des entités administratives, ayant des dynamiques différentes (taux de changements, types de transition, variables

explicatives et/ou des effets de ces variables) constitue un autre point important à prendre en compte. Dans CLUE-S, l'utilisateur a la possibilité de fournir une carte de régions pour lesquelles les quantités de changements attendues peuvent être différenciées. LCM permet d'utiliser une carte dont la valeur modifie les cartes de probabilité de changement. DINAMICA offre également la possibilité de diviser la zone d'étude en régions ayant des spécificités propres (matrices de transition, variables explicative et leurs effets). Il permet également de subdiviser le modèle en sous-régions qui interagissent entre elles (par exemple, la proximité d'un front de la déforestation dans une sous-région peuvent influencer la déforestation dans les sous-régions voisines). Ceci n'est pas possible directement dans CA_MARKOV, à moins de réaliser des simulations pour chacune des régions, et de fusionner les résultats *a posteriori*. Cependant cette dernière option risque de générer des incompatibilités aux limites entre les régions.

Un autre aspect est la possibilité d'intégrer différents patrons de LULCC durant la simulation d'une part en changeant les taux de changement et les variables en cours de modélisation et d'autre part en actualisant certaines variables à chaque pas de temps de la simulation en fonction des résultats de celle-ci (variables dynamiques, comme par exemple la distance à certains LULC). La modification du taux de changement et des variables explicatives peut se faire facilement avec CLUE-S, DINAMICA et LCM. Le *macro modeler* d'IDRISI peut être utilisé pour mener à bien de telles procédures en utilisant CA_Markov. DINAMICA et LCM permettent de mettre à jour les cartes de probabilités de changements de façon dynamique au cours de la simulation à partir d'un circuit de retro alimentation, par exemple, la distance à certains types de LULC comme variables dynamiques.

D'autre part, certains modèles peuvent être couplés avec d'autres modèles (externes). LCM peut utiliser une matrice de transition produite par un modèle externe (modèle économique, dires d'experts, etc.) au lieu de celle produite par les chaînes de Markov. Ceci est implicite avec CLUE-S. DINAMICA peut avoir recours à un modèle externe, qui calcule la dynamique des taux de transition.

Enfin, dans le cas particulier de la déforestation mais également dans le cas de l'urbanisation, le réseau routier est un facteur influençant fortement les LULCC. Toutefois, s'il n'est pas possible de prédire où les développements du réseau routier auront lieu, DINAMICA et LCM proposent un modèle prédictif de l'évolution des routes que nous n'avons pas évalué. Enfin LCM fournit des outils pour évaluer l'impact des LULCC sur la durabilité écologique et de planification de la conservation.

4.7. Considérations supplémentaires

Les programmes qui offrent plus de flexibilité pour développer des modèles personnalisés sont CA_Markov et DINAMICA. Les modèles peuvent être construits en tirant profit de la grande quantité d'outils et d'opérateurs disponibles dans ces programmes. D'autre part, la programmation est facile, même pour les utilisateurs

sans expérience de programmation, grâce à une interface graphique conviviale. En revanche, LCM et CLUE-S ont une structure rigide qui définit un flux constant de procédures. Ceci peut être avantageux pour les nouveaux utilisateurs, car les procédures sont bien définies et documentées, mais devient un inconvénient quand l'utilisateur veut élaborer des modèles plus personnalisés.

La facilité d'utilisation dépend de l'ergonomie du logiciel et de la documentation fournie à l'utilisateur. Le logiciel IDRISI (CA_MARKOV et LCM) sont peut-être les plus aisés à utiliser, car : 1) ils sont bien documentés (manuels et tutoriels), 2) toutes les opérations peuvent être exécutées dans un environnement graphique, mais peuvent également être automatisées à l'aide de séquence de commandes et d'outils de programmation et 3) les opérations préliminaires à la modélisation (par exemple la classification des images pour créer les cartes de LULC) peuvent être faites dans le même environnement. DINAMICA dispose également d'une interface de programmation intuitive et a récemment été bien documenté (manuel d'instructions, liste de discussion). CLUE-S est également bien documentée (tutoriels et un grand nombre de publications scientifiques), mais l'ergonomie est loin d'être optimale (préparation des données et des paramètres *via* l'édition de fichiers textes au format ascii) et beaucoup d'opérations doivent être réalisées avec des programmes externes (régression logistique, visualisation des cartes, évaluation). IDRISI supporte l'importation et l'exportation d'un grand nombre de formats d'image, DINAMICA permet d'utiliser les formats ERMapper, GeoTIFF et Arcview. CLUE-S accepte uniquement des fichiers ASCII.

Tous les logiciels examinés sont gratuits sauf ceux existants sous IDRISI dont le prix reste abordable (de 675 US\$ pour une licence universitaire à 275 US\$ pour une licence étudiante). Toutefois, IDRISI est un logiciel de SIG et de traitement d'image très complet. DINAMICA et IDRISI sont mis à jour régulièrement alors que CLUE-S date de 2002. Une version de CLUE-S, plus ergonomique, est en cours de développement.

5. Discussion et conclusion

Synthèse

Le tableau 4 synthétise les méthodes et outils disponibles pour chacun des modèles évalués, ainsi que leur dépendance à une approche experte et aux données utilisées. Ces caractéristiques résument bien la dépendance des modèles à des approches plus ou moins supervisées : d'une très forte dépendance pour CA_Markov et DINAMICA, à une moins forte dépendance pour CLUE-S et LCM. Ceci doit être mis en perspective par rapport aux besoins nécessaires pour la simulation des types de LULCC considérés (dynamiques spatiales et temporelles), à leurs facteurs explicatifs (nombre, corrélation entre eux, etc.), à leur quantité attendue ou estimée. Ainsi, si le choix de l'outil de modélisation dépend des

objectifs scientifiques poursuivis et de la complexité des changements d'usages des sols, certains présentent néanmoins plus de souplesse que d'autres.

Outil de modélisation	Quantités de changements	Probabilité du changement	Relation variables d'influence/LULCC	Besoin de connaissances expertes	Dépendance aux données
CA_Markov	Chaînes de Markov	Carte d'aptitude	Evaluation multicritères	Oui	Non
CLUE-S	Données externes	Carte d'aptitude	Régression logistique	Non	Oui
Dinamica	Chaînes de Markov Données externes	Probabilités de transition	Poids d'évidence	Oui	Oui
			Algorithme génétique	Non	Oui
LCM	Chaînes de Markov Données externes	Probabilités de transition	Régression logistique Perceptron multicouche	Non	Oui

Tableau 4. *Caractéristiques des outils de modélisation*

Critères de choix d'un modèle de simulation des changements des modes d'occupation et d'utilisation des sols

Les logiciels examinés utilisent des approches différentes pour produire des cartes de changements futurs des modes d'occupation et d'utilisation des sols. Certains sont basés sur les données avec des méthodes de calibration automatique (LCM) tandis que d'autres sont davantage fondées une approche supervisée/experte (CA_Markov). DINAMICA et CLUE-S se situent à des niveaux intermédiaires entre ces deux approches. Dans le cas de régions qui connaissent de fortes dynamiques d'évolution des modes d'occupation et d'utilisation des sols telle que la déforestation, les approches basées sur un calibrage automatique, fondées sur des méthodes s'ajustant de près aux données d'apprentissage (réseaux de neurones, algorithmes génétiques, poids d'évidence sans modification des poids) peuvent être contre-productives à cause des patrons spatiaux et temporels impliqués. Dans ces cas, l'intégration d'un certain degré d'expertise semble souhaitable.

Les modèles produisent deux types de cartes en sortie : des cartes de probabilité de changement (« soft classification ») et cartes catégorielles des modes de LULC (« hard classification »). Pour ces dernières, l'utilisation d'automates cellulaires vise à reproduire les formes spatiales du paysage. L'évaluation de l'aptitude des modèles à simuler les LULCC est jusqu'alors réalisée à l'aide d'indicateurs qui visent à estimer dans quelle mesure les changements ont bien été prédits en terme de quantité et de localisation par comparaison à une situation réelle. Toutefois, dans une

démarche prospective, qui vise à explorer le futur, ce type d'évaluation est rigoureusement impossible. Dès lors, il convient plutôt d'évaluer si les patrons spatiaux et temporels des LULCC sont cohérents avec ceux observés. Ainsi, des indicateurs d'organisation spatiale du paysage (fragmentation, hétérogénéité, connectivité, etc.) peuvent apparaître plus appropriés. Du à son automate cellulaire plus sophistiqué, DINAMICA s'est montré le plus apte à simuler des formes spatiales représentatives des modes d'usages des sols.

Enfin, l'intérêt de ces modèles est la possibilité de développer des applications spécifiques pour répondre aux besoins des utilisateurs et à interagir avec d'autres modèles (modèles économiques, d'émission de carbone, de conservation des espèces, hydrologiques ...). LCM possède des modules pour évaluer certains aspects de la conservation. Toutefois, sa structure rigide ne permet pas de s'affranchir de l'environnement déjà mis en place. De ce point de vue, CLUE-S et DINAMICA offrent le plus de potentiel avec d'autres outils (modèles, scénarios, logiciels, etc.) et la littérature en témoigne (Soares-Filho *et al.*, 2006 et 2010 ; Nol *et al.*, 2008 ; Schulp *et al.*, 2008).

De l'importance du choix d'un outil de simulation des changements des modes d'occupation et d'utilisation des sols

Ce papier, à travers l'étude comparative de quatre modèles existants appliqués à un cas théorique simplifié de LULCC, illustre le fait que tous les modèles ne sont pas forcément appropriés pour simuler les changements des modes d'occupation et d'utilisation des sols. Si cela peut sembler une évidence, peu d'études le démontrent clairement.

Le choix du modèle doit être effectué avec rigueur et méthode. Pour cela, une étude comparative préalable est indispensable pour évaluer l'aptitude du modèle à 1) maîtriser les quantités futures de changements, 2) simuler des dynamiques spatiales et temporelles des modes d'usages des sols plus ou moins complexes, 3) intégrer plus ou moins de facteurs de changements dynamiques (ou non) dans le temps, 4) évaluer les changements simulés, 5) témoigner de possibilités de couplages avec d'autres modèles. Ainsi, le choix dépend fortement de la problématique et du type de paysage étudié mais également de l'usage que l'on souhaite en faire. Le choix pourra différer suivant le degré d'intégration d'expertises souhaité. Selon le modèle choisi, il est possible de contrôler le niveau d'intégration des connaissances d'experts depuis une approche quasi exclusivement dépendante des données d'entrée (LCM) jusqu'à une approche entièrement basée sur les connaissances d'experts (CA_Markov). CLUE et surtout DINAMICA offre plus de souplesse entre ces deux approches.

Ainsi, suivant la démarche adoptée, ce choix peut être fondamentalement différent. Dans une démarche prédictive, certains modèles seront plus adaptés car leur objectif sera de modéliser et de simuler précisément les processus d'usages des sols. Dans une démarche prospective, certains modèles offriront des fonctionnalités

suffisantes pour modéliser et simuler des grandes tendances d'évolution. D'autres pourraient être appropriés pour explorer de nouvelles pistes de gestion du territoire et d'usages des sols issues de nouveaux modes d'usages des sols présentant des patrons spatiaux et temporels différents de ceux actuellement en place, inspirés d'observations historiques ou faites sur d'autres territoires. Le choix du modèle devient ainsi dépendant du type de scénarios prospectifs qui fourniront l'ensemble des pré-requis pour bien choisir un modèle de simulation des changements d'usages des sols (Houet *et al.*, 2010).

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre des projets *Simulaciones geomáticas para modelizar dinámicas ambientales. Avances metodológicos y temáticos* (BIA2008-00681), Proyectos de I+D. MICIIN (Dpto. de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Universidad de Granada. Laboratorio GEODE CNRS, Universidad de Toulouse Le Mirail, Toulouse. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM, México) ainsi que dans le cadre des projets ECOS MH5AH, ECOS C07H03 et PAPIIT IN113511.

6. Bibliographie

- Ageudad R., Houet T., 2008, "Modeling of urban sprawl using the Land Change Modeler on a French metropolitan area (Rennes): foresee the unpredictable", *International Symposium "Spatial landscape Modelling: from dynamic approaches to functionals evaluations"*, Toulouse, 3-5 June 2008, France.
- Berre Le M., Borocard M., 1997, « Modélisation et espace », *Espaces, Territoires et Sociétés. Les recherches françaises en perspective*, Colloque section 39 du Comité National de la Recherche Scientifique, 3 nov. 1997, Paris, CNRS, p. 23-30.
- Briassoulis H., 2000, *Analysis of land Use Change: Theoretical and Modelling Approaches*. Regional Research Institute, West Virginia University, Web Book: <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>
- Burgi M., Hersperger AM., Schneeberger N., 2004, "Driving forces of landscape change - current and new directions", *Landscape Ecology*, vol. 19, pp. 857-868.
- Camacho Olmedo MT., Molero Melgarejo E y Paegelow M., 2010, Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. In: Ojeda J., Pita M.F. y Vallejo I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La información geográfica al servicio de los ciudadanos*, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Sevilla, p. 658-678.
- Castella J., Verburg P., 2007, "Combination of process-oriented and pattern-oriented models of land-use change in a mountain area of Vietnam", *Ecological Modelling*, vol. 202, p. 410-420.
- Coquillard P., Hill D.R.C., 1997, « Modélisation et simulation d'écosystèmes, Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets », Paris, Masson Corgne S, Hubert-

- Moy L, Mercier G, Dezert J.(2004) Application of DSMT for land cover change prediction. In SMARANDACHE F, DEZERT J: *Advances and Applications of DSMT for information Fusion. From Evidence to Plausible and Paradoxical Reasoning for Land Cover Change Prediction*, American Research Press, Rehoboth, p. 371-382.
- Cuevas G., Mas J.F., 2008, "Land use scenarios: a communication tool with local communities", in *Modelling Environmental Dynamics*, Paegelow M & Camacho Olmedo, MT (Eds.), Springer, p. 223-246.
- Díaz-Gallegos J.R., Mas J.F., Velázquez A., 2010, "Trends of tropical deforestation in Southeast Mexico", *Singapore Journal of Tropical Geography*, 31, (2), p. 180-196.
- Eastman R., 2009, Idrisi Taiga, Guide to GIS and Image Processing, manual version 16.02, Clark University.
- Follador M., Villa N., Paegelow M., Renno F., Bruno R., 2008, "Tropical deforestation modelling: a comparative analysis of different predictive approaches, The case of Peten, Guatemala", Paegelow M., Camacho Olmedo M.T. (coord.) *Modelling Environmental Dynamics, Advances in geomatic solutions*, Springer, series Environmental Science and Engineering, p. 77-108.
- Hagen A., 2003, "Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps", *International Journal of Geographical Information Science*, 17, (3), p. 235-249.
- Houet T., Hubert-Moy L., 2006, "Modelling and projecting land-use and land-cover changes with a cellular automaton considering landscape trajectories: an improvement for simulation of plausible future states", *EARSeL eProceedings*, n° 5, p. 63-76.
- Houet T., Gaucherel C., 2007, « Simulation dynamique et spatialement explicite d'un paysage agricole bocager : Validation sur un petit bassin versant breton sur la période 1981-1998 », *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 17, n° 3-4, p. 491-516.
- Houet T., Hubert-Moy L., Tyssot C., 2008a, « Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique », *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 18, n° 3, p. 345-373.
- Houet T., Hubert-Moy L., Corgne et Marchand J.-P., 2008b, « Approche systémique du fonctionnement d'un territoire agricole bocager », *L'espace géographique*, vol. 2008-3, p. 270-286.
- Houet T., Loveland T. R., Hubert-Moy L., Napton D., Gaucherel C., Barnes C., 2010 "Exploring subtle land use and land cover changes: a framework based on future landscape studies", *Landscape Ecology*, vol. 25, n° 2, p. 249-266.
- Kanevski M., Maignan M., 2004, *Analysis and modelling of spatial environmental data*, EPEL Press.
- Lambin E., Geist H., (Eds) 2006. *Land-Use and Land-Cover Change: Local processes and Global Impacts*, The IGBP Series, Springer-Verlag, Berlin.
- Mas J.F., A. Pérez Vega and K. Clarke, 2010, Assessing simulated land use/cover maps using similarity and fragmentation indices, ASPRS Annual Conference, April 26-30, San Diego, CA (CD). <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/publications/Masetal2010asprs.pdf>.
- Mas J.F., Puig H., Palacio J.L., Sosa A.A., 2004, "Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks", *Environmental Modelling and Software*, 19, (5), p. 461-471.

- Nol L., Verburg P. H., Heuvelink G. B. M. & Molenaar K., 2008, Effect of Land Cover Data on Nitrous Oxide Inventory in Fen Meadows, *Journal of Environmental Quality*, vol. 37, p. 1209-1219.
- Overmars K, Verburg P., Veldkamp T., 2007, Comparison of a deductive and an inductive approach to specify land suitability in a spatially explicit land use model, *Land Use Policy*, vol. 24, p. 584-599.
- Paegelow M., Camacho Olmedo M.T. (coord.), 2008, *Modelling Environmental Dynamics. Advances in geomatic solutions*, Springer, series Environmental Science and Engineering.
- Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., 2005, "Possibilities and limits of prospective GIS land cover modelling - a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain)", *International Journal of Geographical Information Science* 19, (6), p. 697-722.
- Pérez-Vega A., Mas J.F., Ligmann-Zielinska A., In press, "Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest", *Environmental Modelling and Software*.
- Pontius R.G., 2000, "Quantification error versus location error in comparison of categorical maps", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66, (8), p. 1011-1016.
- Pontius R.G., Schneider L., 2001, "Land-use change model validation by a ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 85, n° 1-3, p. 239-248.
- Pontius R.G., Huffaker D., Denman K., 2004, "Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models", *Ecological Modelling*, 179, (4), p. 445-461.
- Pontius R.G., Boersma W., Castella J.-C., Clarke K., de Nijs T., Dietzel C., Duan Z., Fotsing E., Goldstein N., Kok K., Koomen E., Lippitt C. D., McConnell W., Mohd Sood A., Pijanowski B., Pithadia S., Sweeney S., Trung T. N., Veldkamp A. T., Verburg P. H., 2008, "Comparing input, output, and validation maps for several models of land change", *Annals of Regional Science*, vol.42, n° 1, p. 11-47.
- Schulp C. J. E., Nabuurs G.-J., Verburg P. H., 2008, "Future carbon sequestration in Europe – Effects of land use change", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 127, p. 251-264.
- Soares-Filho B. S., Nepstad, D., Curran L., Voll E., Cerqueira G., Garcia R. A., Ramos C. A., McDonald A., Lefebvre P., Schlesinger P., 2006, "Modeling conservation in the Amazon basin", *Nature*, London, 440, p. 520-523.
- Soares-Filho B.S., Pennachin C. L., Cerqueira G., 2002, "DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier", *Ecological Modelling*, 154, (3), p. 217-235.
- Soares-Filho B.S., H.O. Rodrigues W.L.S. Costa, 2009, Modelamiento de Dinámica Ambiental con Dinamica EGO, Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil. <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>
- Soares-Filho B.S., Mounthino P., Nepstad D., Anderson A., Rodrigues H., Garcia R., Dietzsch L., Merry F., Bowman M., Hissa L., Silvestrini R., Maretti C., 2010, "Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation", *Proc Natl. Acad. Sci.* vol. 107, (24), p. 10821-10826. <http://www.pnas.org/content/107/24/10821>.

- Sohl TL, Saylor KL, Drummond MA and Loveland TR., 2007, “The FORE-SCE model: a practical approach for projecting land cover change using scenario-based modelling”, *Journal of Land Use Science*, Vol. 2, p. 103-126.
- Takada T, Miyamoto A, Hasegawa SF, 2010, “Derivation of a yearly transition probability matrix for land-use dynamics and its applications”, *Landscape Ecology*, 25, (4), p. 561-572.
- Veldkamp A. Y, Lambin E., 2001, “Predicting land-use change”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, p. 1-6.
- Verburg P.H., Overmars K.P., 2009, “Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model”, *Landscape Ecology* 24, (9), p. 1167-1181.
- Verburg P.H., Ritsema van Eck J., de Nijs T.C.M., Visser H., de Jong K., 2004, “A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns”, *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 28, n° 6, p. 667-690.
- Verburg, P.H., Soepboer, W., Veldkamp, A. Limpiada, R. Espaldon, V., Sharifah Mastura S.A. 2002. “Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: the CLUE-S Model”, *Environmental Management*, Vol. 30, n° 3, p. 391-405.
- Wainwright J., Mulligan M., 2004, *Environmental Modelling: Finding simplicity in complexity*, Wiley.