HAL
open science

Un modèle intégré pour explorer les trajectoires d'utilisation de l'espace en zone de savanes sèches du Cameroun

Eric Fotsing, Peter Verburg, Wouter T. de Groot, Jean-Paul Cheylan, Maurice Tchuente

To cite this version:

Eric Fotsing, Peter Verburg, Wouter T. de Groot, Jean-Paul Cheylan, Maurice Tchuente. Un modèle intégré pour explorer les trajectoires d'utilisation de l'espace en zone de savanes sèches du Cameroun. Savanes africaines en développement : innover pour durer, Apr 2009, Garoua, Cameroun. 12 p. cirad-00471348v1

HAL Id: cirad-00471348

https://hal.science/cirad-00471348v1

Submitted on 8 Apr 2010 (v1), last revised 7 Apr 2016 (v3)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L. SEINY-BOUKAR, P. BOUMARD (éditeurs scientifiques), 2010. Actes du colloque « Savanes africaines en développement : innover pour durer », 20-23 avril 2009, Garoua, Cameroun. Prasac, N'Djaména, Tchad ; Cirad, Montpellier, France, cédérom.

Un modèle intégré pour explorer les trajectoires d'utilisation de l'espace en zone de savanes sèches du Cameroun

Eric FOTSING*, Peter VERBURG**, Wouter T. de GROOT***,
Jean-Paul CHEYLAN****, Maurice TCHUENTE*****

*IUT/FV à Bandjoun et Centre d'étude pour l'environnement et le développement au Cameroun, Université de Dschang, Maroua, Cameroun – nefotsing@yahoo.fr.

**Department of Environmental Sciences, Wageningen University, The Netherlands

***Institute of Environmental Science, University of Leiden, The Netherlands

****Umr Tetis – Cirad –, Avenue Agropolis, F–34398 Montpellier Cedex 5, France

*****Département d'Informatique, Faculté des sciences, Université de Yaoundé, Cameroun

Résumé — Les modèles spatiaux dynamiques sont des outils de très grande importance pour l'étude des systèmes complexes comme les systèmes environnementaux. De plus, une approche intégrée est indispensable lorsqu'on veut avoir une compréhension plus complète du comportement de ces systèmes. Cet article décrit les bases d'un modèle intégré développé pour explorer les trajectoires d'utilisation de l'espace dans la région autour de Maroua, à l'Extrême Nord du Cameroun. Le modèle simule la compétition entre différentes catégories d'utilisation de l'espace en prenant en compte l'influence d'un ensemble de facteurs biophysiques, sociodémographiques et géoéconomiques. On distingue trois principaux modules. Le module de simulation dynamique combine les résultats des modules d'analyse spatiale et de prédiction. La calibration et la validation du modèle ont été effectuées pour la période entre 1987 et 1999, et la simulation des changements entre 1999 et 2010. Trois scénarios ont été formulés en s'appuyant sur l'analyse des tendances observées et les hypothèses de transition du système d'utilisation de l'espace. Les principales dynamiques observées concernent le développement de la culture maraîchère et l'extension de la culture du sorgho de contre saison qui induisent une compétition plus importante et des conflits. Les résultats de simulation pour chaque scénario permettent d'identifier des zones prioritaires pour toute intervention allant dans le sens de l'intensification ou d'une gestion intégrée et plus durable de l'espace. Le modèle développé constitue ainsi un outil de recherche exploratoire et un support de connaissances utilisable pour la planification de l'utilisation de l'espace. Une utilisation est envisageable pour initier toute concertation ou négociation entre les acteurs concernés par la gestion de l'espace.

Abstract — An Integrated model for exploring land use trajectories in the dry savannah zone of Cameroon*. Dynamic spatial models are important tools for the study of complex systems, such as environmental systems. In addition, an integrated approach is essential for a more comprehensive understanding of how these systems behave. This paper describes the basis of an integrated model that has been developed to explore land use trajectories in the region around Maroua, in the far north of Cameroon. The model simulates the competition between different categories of land use, taking into account the influence of a set of biophysical, socio-demographic and geo-economic factors. The model has three main modules. The dynamic simulation module combines results from the spatial analysis and forecasting modules. The model was calibrated and validated for the period 1987-1999. The simulation of change was performed between 1999 and 2010. Three scenarios were formulated, based on the analysis of the main trends observed and the hypotheses relating to the transition of the land use systems. The major dynamics observed concern the development of horticultural production and the extension of dry season sorghum, which induce greater competition and conflicts. The simulation results for each scenario are useful for identifying priority areas for each intervention involved in intensification or more sustainable and integrated land management. Thus, the model developed constitutes a tool for exploratory research and a knowledge base that can be applied to land use planning. It could also be used to initiate any discussion or negotiation between the stakeholders involved in land management.*

Introduction

L'Extrême-Nord du Cameroun est un exemple de région de savanes sèches d'Afrique centrale qui est confrontée au défi de l'explosion démographique qui rend les changements inéluctables. On a observé au cours des deux dernières décennies d'importantes transformations du paysage agraire et de l'utilisation de l'espace (Fotsing *et al.,* 2006). La réduction des espaces de brousse conduit à une compétition pour l'espace entre les activités agricoles, pastorales et sylvicoles et nécessite d'adapter les politiques de gestion de l'espace et des ressources naturelles. En particulier, l'espace nécessaire à la continuation du système extensif actuel est en cours d'achèvement mais les prévisions montrent que la population devra doubler au cours des trois prochaines décennies. Une question importante pour le développement de cette région dans ce contexte est de connaître les stratégies que les populations pourront mettre en place pour satisfaire leurs différents besoins en aliment et en bois de feu. La réponse à cette question nécessite d'identifier les principaux facteurs et les mécanismes qui déterminent les changements d'utilisation de l'espace avant d'envisager toute prédiction (Fotsing *et al.,* 2007). La modélisation dynamique est un outil approprié pour l'étude de tels systèmes complexes. Les modèles dynamiques peuvent permettre de saisir la complexité qui émerge des systèmes d'utilisation de l'espace et d'analyser les trajectoires d'évolution possibles en offrant la possibilité de tester la sensibilité de la structure et la stabilité de l'ensemble du système face aux changements des facteurs déterminants (Veldkamp et Fresco, 1997). Ces modèles fournissent ainsi des informations qui peuvent permettre d'évaluer des options d'aménagement et de gestion de l'espace, d'apprécier les impacts des changements d'utilisation de l'espace sur l'environnement naturel, les conditions socio-culturelles, économiques ou politiques et inversement. Une très large gamme de modèles appliqués à l'utilisation de l'espace a été développée pour répondre à une diversité de besoins (Baker, 1989 ; Lambin *et al.,* 2003). Une approche de modélisation intégrée est indispensable lorsqu'on veut avoir une compréhension plus complète du comportement des systèmes complexes (Riebsame *et al.,* 1994). Dans cet article, nous décrivons les bases du modèle dynamique développé pour explorer les trajectoires d'utilisation de l'espace dans la région autour de Maroua, à l'Extrême Nord du Cameroun. La section suivante présente la zone d'étude et les principales dynamiques d'utilisation de l'espace observées au cours des trois dernières décennies. La section 3 décrit la structure du modèle dynamique de simulation développé. Cette section présente tour à tour les différents modules, la calibration et la validation du modèle. La section 4 analyse les résultats de simulation des différents scénarios formulés. La section 5 rappelle les leçons apprises, les limites de l'étude et dégage quelques perspectives d'amélioration des performances du modèle.

Zone d'étude et changements d'utilisation de l'espace

La zone d'étude pour cette application est localisée autour de la ville de Maroua, le principal centre urbain de la région de l'Extrême-Nord du Cameroun (figure 1). Cette région qui couvre une étendue d'environ 3 600 km² est représentative de la zone des savanes soudano sahéliennes du Cameroun du fait qu'elle renferme la diversité des situations agroécologiques identifiées à l'échelle régionale. Ainsi, elle est partagée entre la plaine du Diamaré, la pédiplaine de Kaélé et les piémonts des monts Mandara. C'est une zone de forte densité de population (en moyenne 80 hab./km²) avec d'importants flux migratoires. La population essentiellement rurale a été estimée à 80 % de la population totale.

Le système agraire est caractérisé par une importante activité pastorale et un secteur agricole en pleine expansion. Le coton est resté pendant longtemps la principale culture de rente et une très grande diversité de cultures vivrières est pratiquée (sorgho pluvial et de contre saison, maïs, arachide, haricot, riz, et oignon). L'un des problèmes assez préoccupant de cette région est relatif aux faibles rendements de la production agricole qui est restée presque stable au cours des trois dernières décennies (Njomaha, 2004) alors que les besoins de la population ont continué à augmenter du fait de la croissance démographique. Les populations en quête de bois de feu, d'espace cultivable et de pâturage exercent des pressions importantes sur les terres qui conduisent à la saturation foncière, à la dégradation des sols et des ressources ligneuses et peuvent déboucher sur des conflits.

La figure 2 illustre les principales phases du processus de saturation foncière et montre que les stratégies les plus couramment observées face à l'accroissement de la population dans ces régions soudano sahéliennes ont pendant longtemps été l'extension des surfaces cultivées, le déplacement des populations vers des zones jugées plus productives ou l'orientation vers des activités de survie (intrusion

dans les aires protégées, coupe et vente de bois, etc.) qui renforcent la dégradation des ressources et la pauvreté. Les espaces de savanes non cultivés jouant le rôle de réserve foncière ont été ainsi progressivement exploités pour répondre à l'accroissement des besoins et absorber une force de travail en augmentation. On est ainsi passé d'une agriculture itinérante avec une relative disponibilité des terres à un système agraire spatialement saturé, caractérisé par la rareté des jachères et une tendance à la mise en valeur des terres jugées marginales.

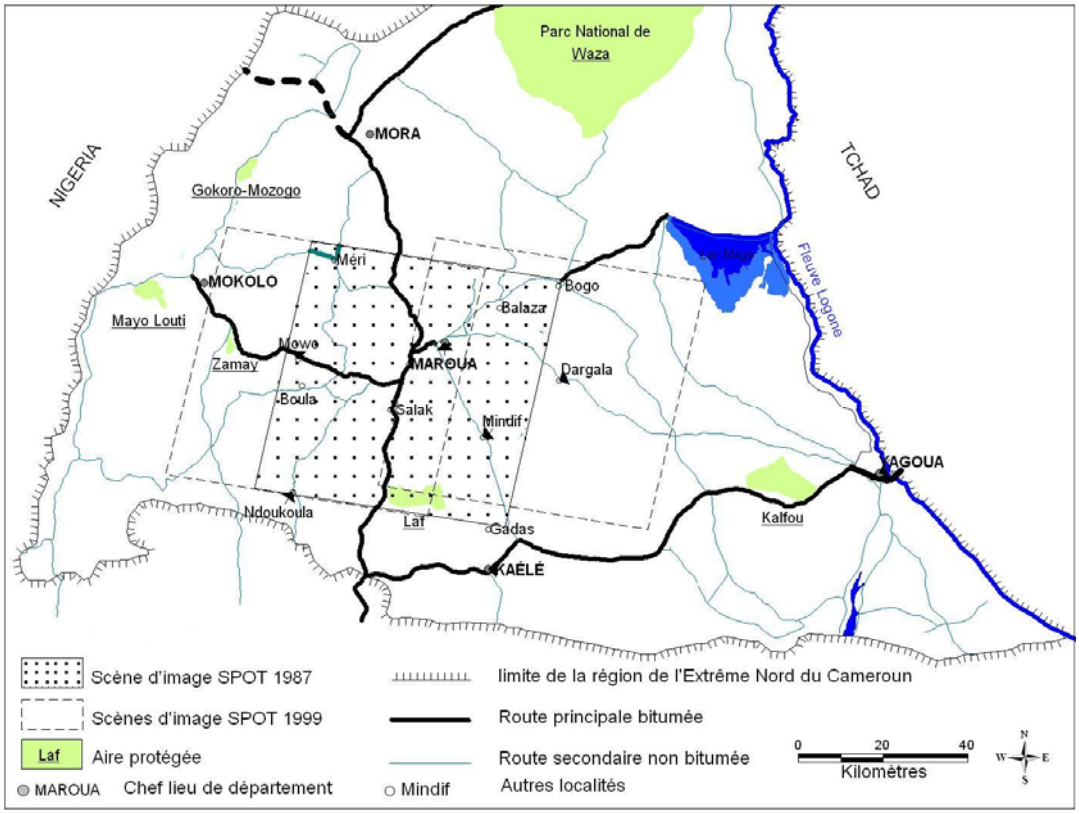

Figure 1. Localisation de la zone d'étude et des scènes d'image satellite analysées.

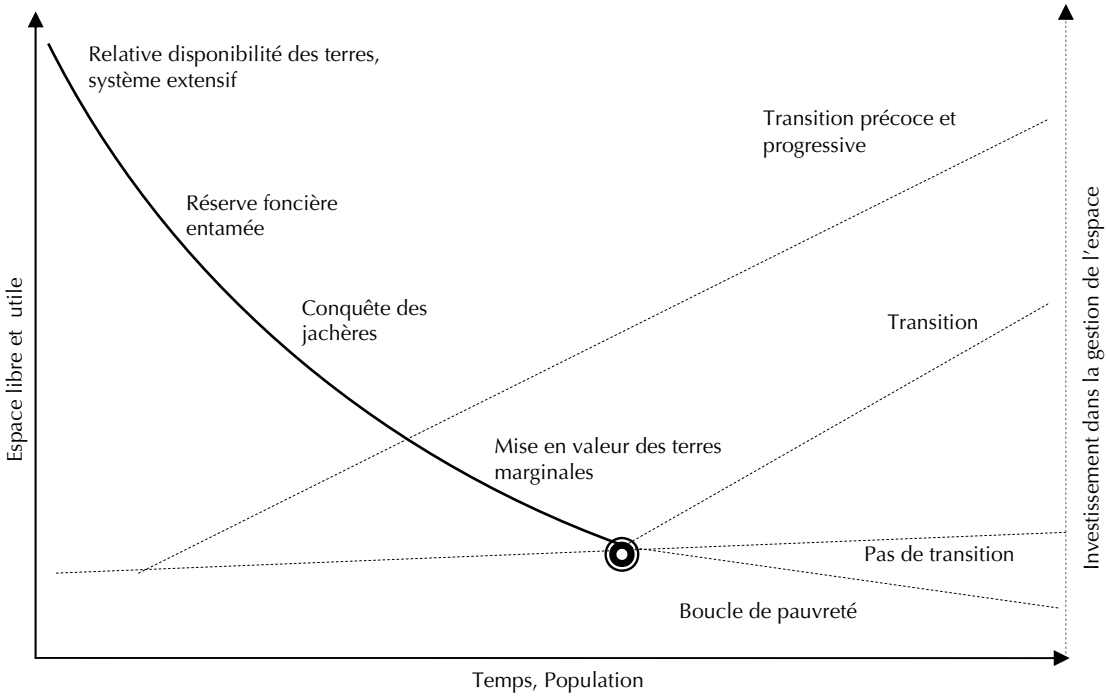

Figure 2. Les processus de changement d'utilisation de l'espace et trajectoires hypothétiques dans un futur proche.

L'espace nécessaire à la continuation du système extensif observé est en cours d'achèvement, mais les prévisions indiquent que la population de cette région devra encore doubler au cours des trois prochaines décennies. Les principales hypothèses formulées sur les trajectoires d'utilisation de l'espace font référence aux théories de Boserup (1965) et Malthus (Niemejer et Mazzucato, 2002). On suppose que les dynamiques dans un futur proche vont dépendre principalement des investissements que les acteurs vont consentir pour améliorer la qualité des ressources (sols, ligneux, etc.) et des institutions qui gouvernent l'utilisation de l'espace (pratiques foncières, marché etc.). Les travaux de Njomaha (2004) ont analysé une vingtaine de villages de la région pour apprécier leurs contraintes et atouts pour de tels investissements. Les résultats montrent que la région dans l'ensemble semble s'orienter vers une trajectoire malthusienne caractérisée par la pauvreté et donc un faible niveau d'investissement qui conduisent à la dégradation du milieu, à la famine et aux migrations. Très peu de sites présentent des signes d'une trajectoire boserupienne caractérisée par des tentatives d'innovation et d'intensification. A l'échelle régionale, la modélisation spatiale et dynamique est très importante dans ce contexte pour explorer les conditions d'évolution de chaque site et proposer des solutions afin d'éviter que le système ne s'oriente vers une trajectoire indésirable.

Structure et mise en œuvre du modèle dynamique de simulation

Les modèles développés pour l'analyse des changements d'utilisation de l'espace utilisent une grande variété de techniques de prédiction et de simulation des processus de changement telles que les régressions statistiques, les transitions de probabilité, les équations différentielles, la programmation linéaire, et les systèmes multi-agents (Baker, 1989 ; Lambin, 2003 ; Parker *et al.,* 2003). Une approche de modélisation intégrée est indispensable lorsqu'on veut avoir une compréhension plus complète du comportement d'un système complexe (Riebsame *et al.,* 1994).

Aperçu général de la structure du modèle

Le modèle développé pour la région de Maroua, de type spatio-statistique et dynamique est composé de trois principaux modules (figure 3). Le module d'analyse spatiale est constitué de sous-modèles mathématiques qui définissent les variables représentant la distribution spatiale de l'utilisation de l'espace et des facteurs déterminants. Les informations géographiques extraites de la base de données régionale sont utilisées pour calculer un ensemble de variables spatiales explicites.

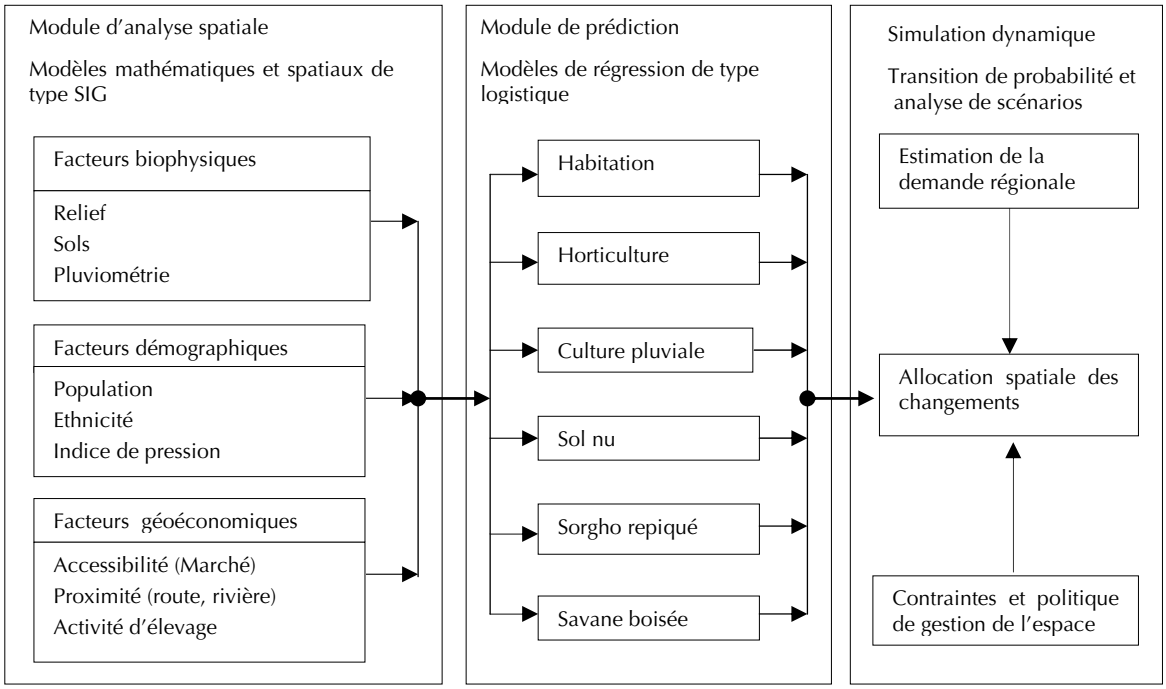

Figure 3. Structure du modèle intégré de changement d'utilisation de l'espace.

Le module de prédiction est constitué des modèles de régression de type logistique dont les résultats sont utilisés pour calculer la probabilité d'allocation de chaque type d'utilisation de l'espace (Fotsing *et al.,* 2007). Les cartes de la figure 4 indiquent en couleur foncée, les zones qui ont une forte probabilité d'être allouées à chaque utilisation de l'espace. Le module de simulation dynamique repose sur une procédure d'allocation spatiale des changements qui prend en compte ces probabilités d'allocation, les paramètres de conversion de chaque utilisation de l'espace et la demande en produits (Verburg *et al.,* 2002). A chaque pas de temps, cette demande (traduite en superficies) est calculée pour chaque utilisation de l'espace à l'échelle de la région en fonction des hypothèses du scénario exploré. La décision de conversion d'une utilisation de l'espace par le modèle prend aussi en compte les règles de conversion propres à chaque forme d'utilisation de l'espace comme l'élasticité et les séquences de conversion définies par une matrice de transition (tableau I). L'élasticité est un facteur de résistance au changement qui est affecté à chaque utilisation de l'espace lors de la calibration du modèle en s'appuyant sur les connaissances du système agraire de la région. Elle correspond à la réversibilité des changements et traduit la facilité d'une cellule à passer d'un type à un autre.

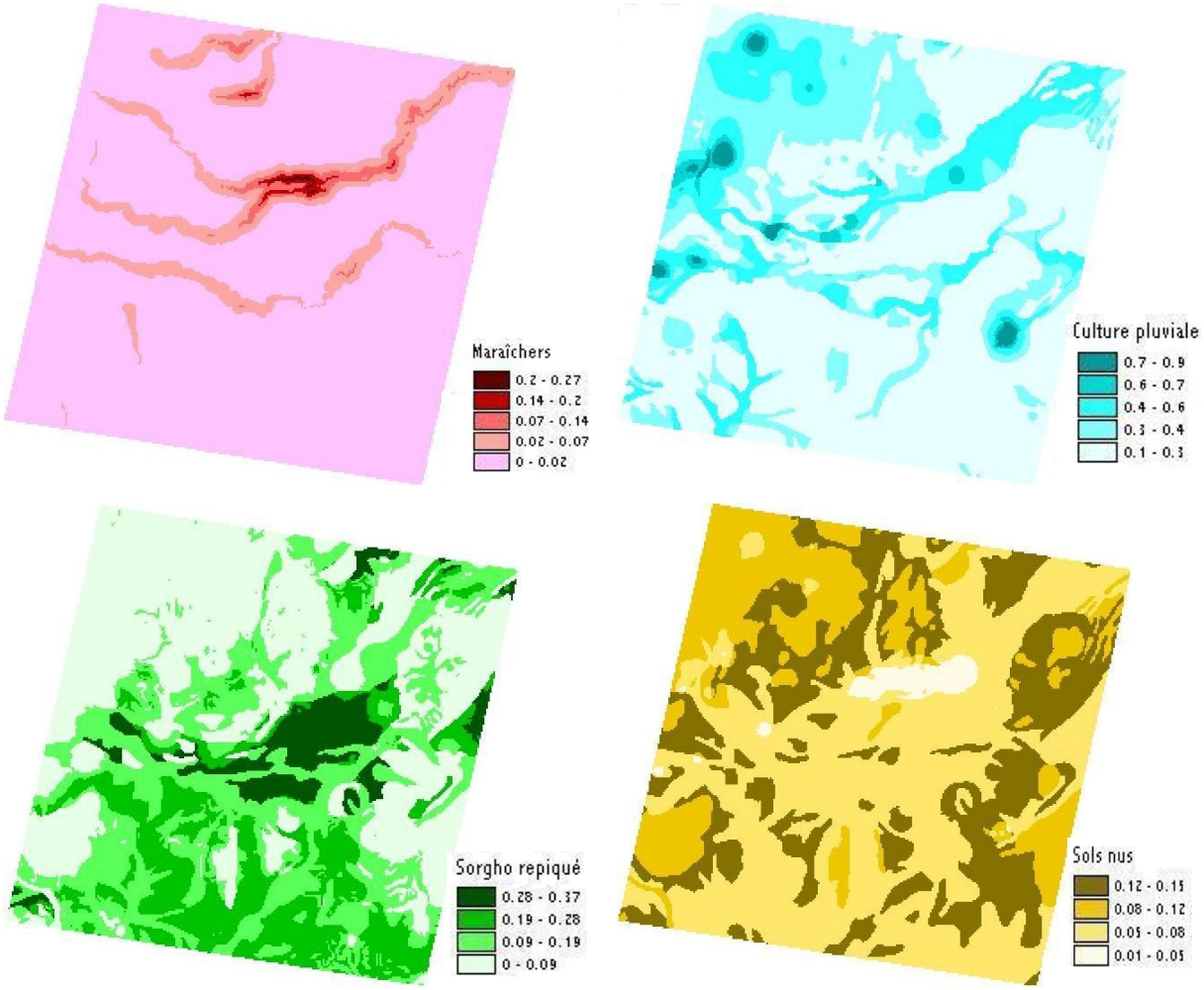

Figure 4. Cartes de probabilité d'allocation de quelques utilisations de l'espace.

Calibration et validation du modèle

La calibration est une procédure itérative où plusieurs simulations des changements entre 1987 et 1999 sont effectuées en modifiant les valeurs de l'élasticité jusqu'à obtenir une certaine stabilité de la structure du système d'utilisation de l'espace. Les paramètres de régression pour la situation de 1987 sont utilisés pour la calibration et ceux de 1999 sont utilisés ultérieurement pour la prédiction. Le tableau II donne les valeurs d'élasticité finalement retenues. Ces valeurs sont comprises entre 0 et 1. Les valeurs proches de 1 correspondent aux utilisations de l'espace qui changent difficilement comme les habitations et les

montagnes. Par contre les zones de culture pluviale et les sols nus qui ont une élasticité proche de 0 sont les classes qui changent les plus facilement.

La validation est une mesure des performances du modèle qui consiste à comparer les résultats de prédiction du modèle avec la réalité ou ceux d'un autre modèle. C'est une étape importante du processus de modélisation dans la mesure où elle permet de mieux apprendre sur les caractéristiques et le comportement du modèle et peut également aider à mieux comprendre la réalité des processus étudiés (Costanza, 1989 ; Pontius *et al.,* 2004).

Tableau I. Matrice de transition du modèle de changement de l'utilisation de l'espace. (0 = changement impossible et 1= changement possible).

		Utilisation de l'espace à t+1						
		Habitation	Horticulture	Culture Pluviale	Sol nu	Sorgho repiqué	Brousse	Montagne
Utilisation de l'espace à t	Habitation	1	0	0	0	0	0	0
	Horticulture	1	1	1	1	1	1	0
	Culture Pluviale	1	1	1	1	1	1	0
	Sol nu	1	1	1	1	1	1	0
	Sorgho repiqué	1	1	1	1	1	1	0
	Brousse	1	1	1	1	1	1	0
	Montagne	0	0	0	0	0	0	1

Tableau II. Elasticité des différents types d'utilisation de l'espace résultant de la calibration.

Utilisation de l'espace	Elasticité	Commentaire explicatif
Habitation	1	Changement autorisé dans une seule direction, la destruction des habitations n'est pas possible
Horticulture	0,8	Changement difficile, car investissement à long terme
Culture pluviale	0,2	Pas de contrainte spécifique pour le changement
Sol nu	0,2	Pas de contrainte spécifique pour le changement
Sorgho repiqué	0,4	Changement un peu difficile du fait des sols dédiés à la culture
Brousse	0,7	Contrainte due aux efforts et moyens à fournir pour défricher
Montagne	1	Cette utilisation de l'espace est statique au cours de la simulation

La carte prédite par le modèle pour l'année 1999 a été comparée à celle obtenue par analyse d'image de télédétection à la même date, en quantifiant la similarité (coefficient d'ajustement F_w) des structures entre les deux cartes (Costanza, 1989) et les proportions de pixels correctement prédits (Pontius *et al.,* 2004) à plusieurs résolutions. Dans les deux cas, le modèle de prédiction est plus précis que le modèle NULL qui prédit la persistance à toutes les résolutions. Le coefficient de similarité global calculé pour le modèle de prédiction est évalué à F_t = 0,749 contre F_t = 0,725 pour le modèle NULL. La figure 5 montre que le coefficient d'ajustement pour le modèle de prédiction augmente d'abord très rapidement avec la taille des fenêtres de comparaison avant de se stabiliser autour de la valeur 1, indiquant que les structures correspondent mieux. Par contre, la courbe du modèle NULL se stabilise très vite autour de la valeur 0,82. Cet exercice de validation a été effectué avec 13 modèles développés dans différentes régions en Europe, aux Etats-Unis et en Asie. Les résultats montrent qu'à fine résolution, il peut arriver que le modèle NULL soit plus précis que le modèle de prédiction. Cela dépend le plus souvent des quantités de changements observées. Ainsi, 6 des 13 modèles comparés qui affichent moins de 10 % des changements observés ont plus d'erreurs que le modèle NULL (Pontius *et al.,* 2007).

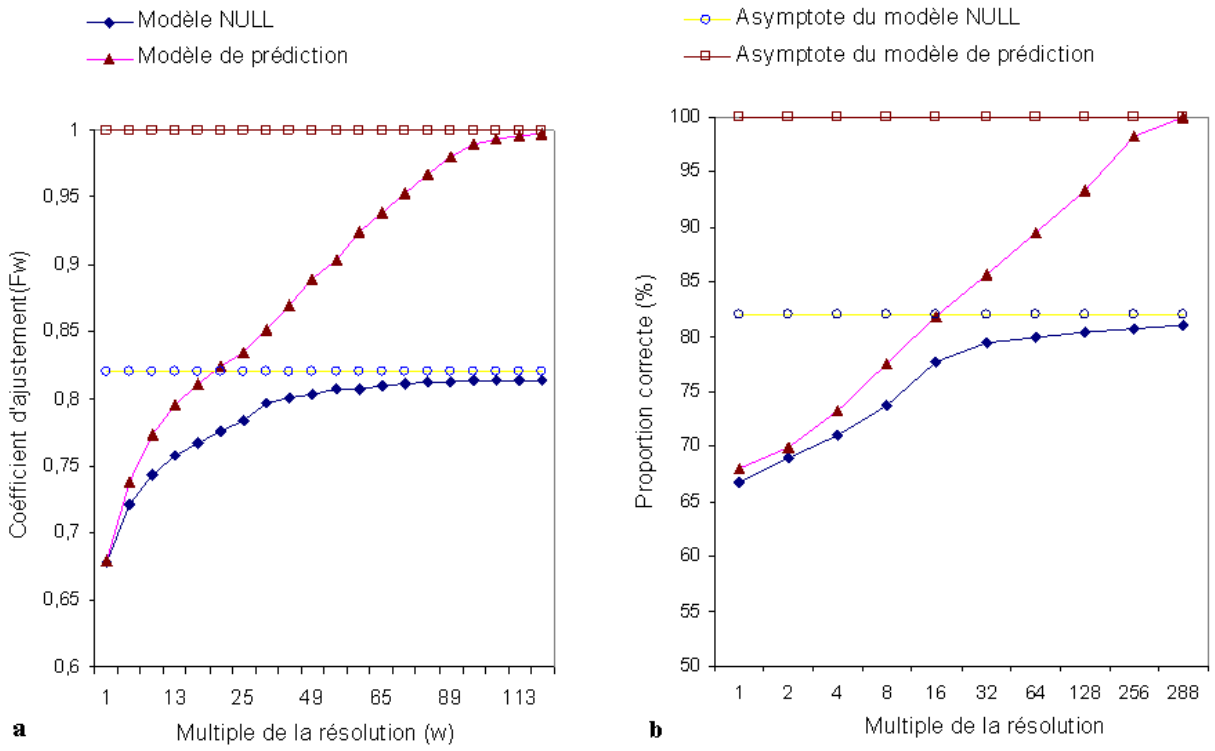

Figure 5. Comparaison des performances du modèle de prédiction avec celles du modèle NULL à plusieurs résolutions ; a) coefficients de similarité et b) proportion de pixels correctement prédits.

Une autre technique de validation a consisté à comparer simultanément les trois cartes disponibles en effectuant un croisement sous un SIG (Pontius *et al.,* 2004). Les cartes et statistiques calculées fournissent des informations complémentaires sur le comportement du modèle en permettant de localiser la source des erreurs de prédiction. On distingue d'une part les zones où le modèle prédit correctement le changement des zones où il prédit correctement la persistance. On distingue également les zones où le changement est observé et le modèle prédit le changement mais vers la mauvaise catégorie des zones où la persistance est observée et le modèle prédit le changement. La figure 6 montre dans l'ensemble que pour les applications où on a une proportion importante de changements observés, la précision de prédiction du modèle mesurée par le niveau de mérite (ratio entre la proportion correctement prédite et la proportion totale des changements observés et prédits) a tendance à être plus grande. Toutes les 6 applications qui ont un niveau de mérite inférieur à 15 % affichent une proportion de changement observé inférieure à 10 %. Sur les 13 applications considérées, seule celle du Périnet affiche un niveau de mérite supérieur à 50 %.

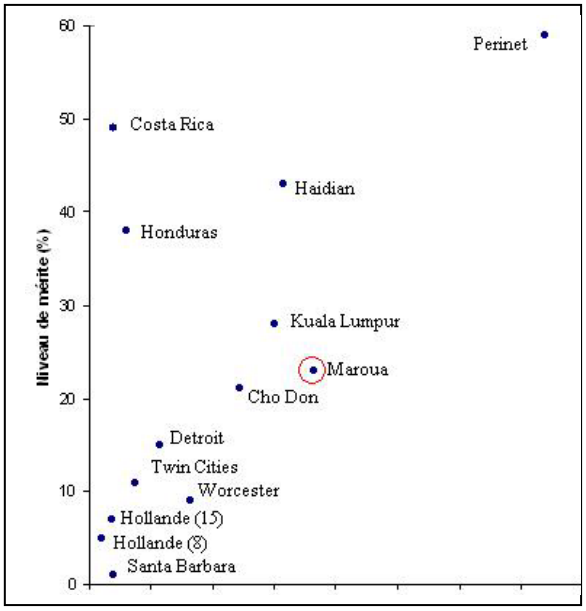

Figure 6. Relation entre le niveau de mérite et la proportion de changements observés

Résultats de la simulation des scénarios formulés

Le modèle développé a été mis en œuvre pour simuler les changements d'utilisation de l'espace sur la période 1999-2010. Trois scénarios ont été définis en se basant sur les hypothèses d'évolution formulées à la section 2 (figure 2).

Scénario 1 considérant le maintien des tendances observées

Le scénario de base considère que la stratégie d'utilisation de l'espace basée sur un système extensif se poursuivra au cours des prochaines années. On suppose que la demande d'allocation de chaque utilisation de l'espace évolue suivant une fonction linéaire avec le même rythme que celui observé entre 1987 et 1999 (figure 7a ; 7d et 7e). Les superficies des cultures pluviales qui étaient en augmentation, baissent au profit de l'extension de la culture du sorgho repiqué ou des cultures maraîchères en fonction des potentialités des terres et des stratégies paysannes. Cette tendance rejoint les résultats obtenus par Njomaha (2004) qui a identifié parmi les principaux changements agraires dans la région, l'abandon de plusieurs cultures pluviales à cycle long du fait de la réduction de la saison pluvieuse.

Au cours de la simulation, l'augmentation des zones d'habitation et d'horticulture reste relativement faible. Les extensions de cultures maraîchères se font en général sur les terres alluviales qui peuvent également être utilisées pour les cultures pluviales. Les extensions récentes de la culture du sorgho repiqué sont observées principalement entre la zone de Laf et de Mindif au détriment des savanes boisées, sur les meilleures terres (vertisols). A la fin de la simulation, on commence à observer des extensions de sorgho repiqué sur les terres alluviales ou dans la zone des piémonts notamment aux environs de Méri, sur les sites en micro-topographie où l'on a de faibles pentes (figure 8b).

Scénario 2 considérant l'évolution suivant une trajectoire malthusienne

Le scénario 2 considère que la région suit une trajectoire de type malthusienne qui semble prévaloir dans plusieurs sites de la zone d'étude (Njomaha, 2004). La réponse à la forte demande alimentaire de la population qui croît à un rythme de 3,3 % par an, se fait par un accroissement plus important des superficies cultivées (5 % par an) pour la même production compte tenu de la dégradation des sols, la mise en culture des terres marginales et la baisse des rendements (figure 7d). Pour satisfaire les besoins supplémentaires des villes en fruits et légumes, les superficies utilisées pour l'horticulture augmentent mais à un rythme beaucoup plus faible (soit 0,70 %) que celui observé dans le scénario 1 à cause de la pauvreté et des coûts élevés qui sont nécessaires pour investir dans cette filière (figure 7a). De même, avec l'absence d'institutions fortes pouvant garantir la protection des ressources naturelles, la pression pour l'extension du sorgho de contre saison augmente et conduit à une réduction plus importante des savanes boisées que celle observée dans le scénario 1, soit à 4 % (figure 7e).

Dans ce scénario où la demande en superficie pour la culture du sorgho de contre saison est plus grande que la disponibilité des meilleures terres, on observe des défrichements plus importants de la savane au sud de Maroua et une compétition plus importante sur les espaces où les sols de type « intermédiaire » se prêtent également aux cultures pluviales. Il s'agit par exemple des vertisols localisés le long des cours d'eau ou des zones de piémonts notamment autour de Méri et au sud du terroir de Mowo. On note également des extensions de la culture sur les sols nus et dégradés (hardé) autour du terroir de Balaza dans la plaine du Diamaré. Toutefois, cette dynamique reste limitée du fait des contraintes du milieu et des investissements qu'il faut pour les aménagements tels que le binage et la mise en place ou l'entretien des diguettes. Les simulations montrent que les nouveaux maraîchers-vergers se mettent en place dans la zone de Salak et autour de la localité de Ndoukoula, située au sud ouest de la zone d'étude. On peut voir que malgré la demande importante en bois de feu et en espace pour l'extension de la culture du sorgho de contre saison, certaines zones très proches des centres urbains restent relativement bien boisées. Ce sont notamment la zone de Balaza située à environ 20 km de la ville de Maroua à l'est, et la zone autour de Mindif (figure 8c). Les observations de terrain couplées avec l'exploitation de la carte des sols ont montré que les terres de ces zones ne sont pas aptes à l'agriculture. Les espèces ligneuses présentes ne sont pas pour la plupart très appréciées comme bois pour le feu. Elles constituent essentiellement des réserves importantes de bois pour les populations rurales environnantes et des zones de pâturage pour le bétail.

Scénario 3 considérant l'évolution suivant une trajectoire boserupienne

Le scénario 3 considère qu'une véritable transition au sens de Boserup (1965) se mettra en place. Cela signifie que la croissance démographique entraînera des innovations et des investissements pour améliorer la qualité des ressources. Des mesures de conservation seront prises pour limiter la destruction massive des savanes boisées, notamment par le renforcement de la protection des réserves forestières et l'intensification des productions. Les superficies utilisées pour l'horticulture augmentent au rythme de 2,5 % à cause des investissements plus importants qui sont accordés à la culture maraîchère et à la plantation des arbres fruitiers (figure 7a). Les superficies de sorgho repiqué continuent d'abord à augmenter avec un taux d'accroissement beaucoup plus faible (2,5 %) que dans le scénario 1 et 2 (figure 7d). Le rythme des défrichements baisse également à 2,5 % par an sous l'influence des politiques forestières qui sont mises en place (figure 7e). Dans les phases ultérieures de l'évolution du système, les superficies de sorgho repiqué devraient se stabiliser et tendre à la baisse si les mesures d'intensification et de conservation sont soutenues. Les superficies boisées devraient également se stabiliser et augmenter éventuellement.

L'extension des cultures maraîchères et la plantation des arbres fruitiers s'observent autour du principal centre urbain et des principales agglomérations environnantes. Toutefois, les superficies occupées restent faibles à l'échelle régionale et sont localisées à proximité des cours d'eau. La zone entre Laf et Mindif au sud de Maroua n'est pas sollicitée pour l'extension de l'horticulture et confirme la rareté des ressources en eau souterraine dans cette localité (figure 8d). Aucune restriction représentant une quelconque politique de conservation n'a été incluse dans cette version du modèle. Ce scénario pourrait donc être affiné en interdisant les défrichements dans les réserves forestières et des zones de brousse bien identifiées. Celles-ci peuvent être des espaces que les populations s'engagent à exploiter comme forêt communautaire pour l'approvisionnement local et la vente du bois de feu.

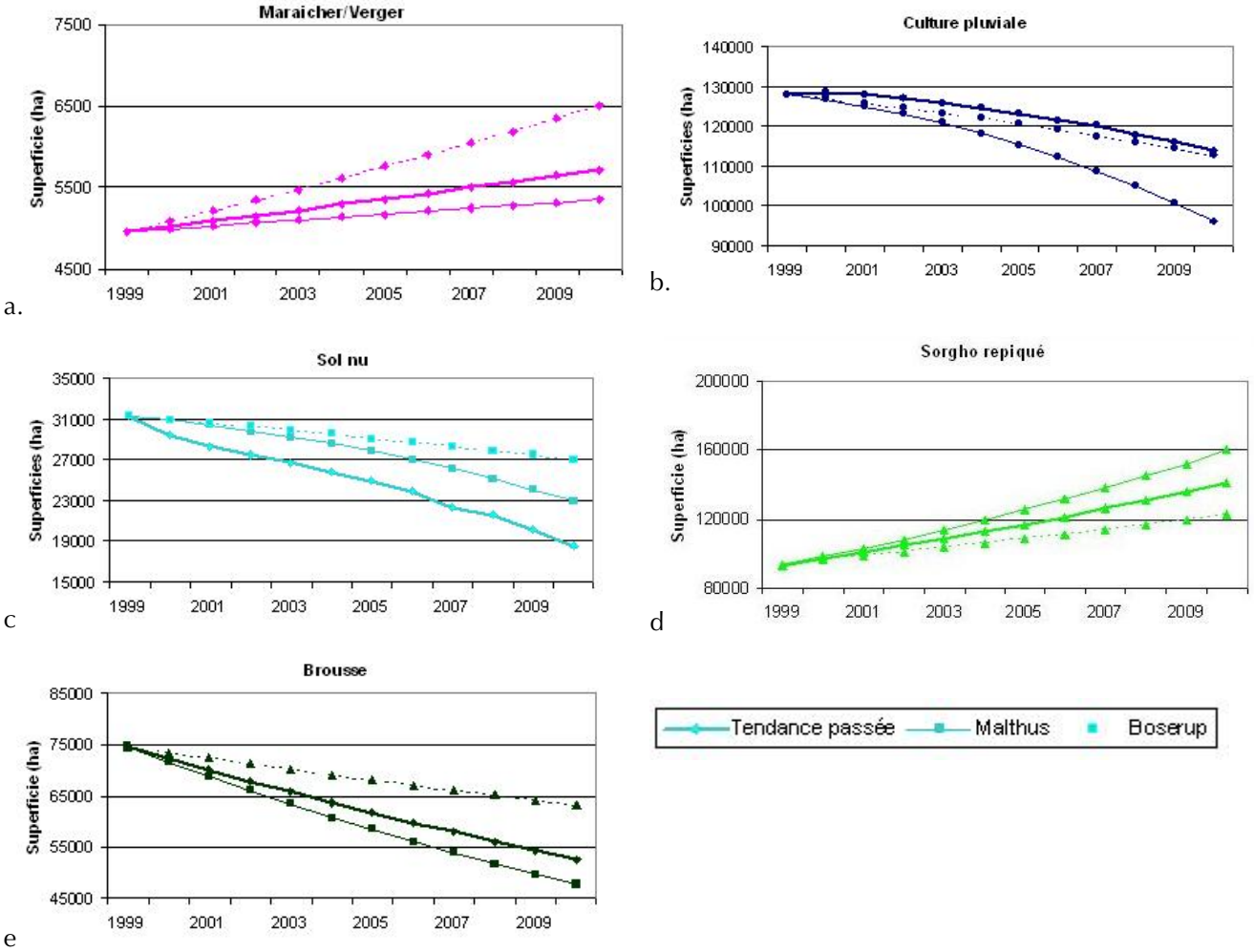

Figure 7. Evolution des superficies des différents types d'utilisation de l'espace pour les trois scénarios.

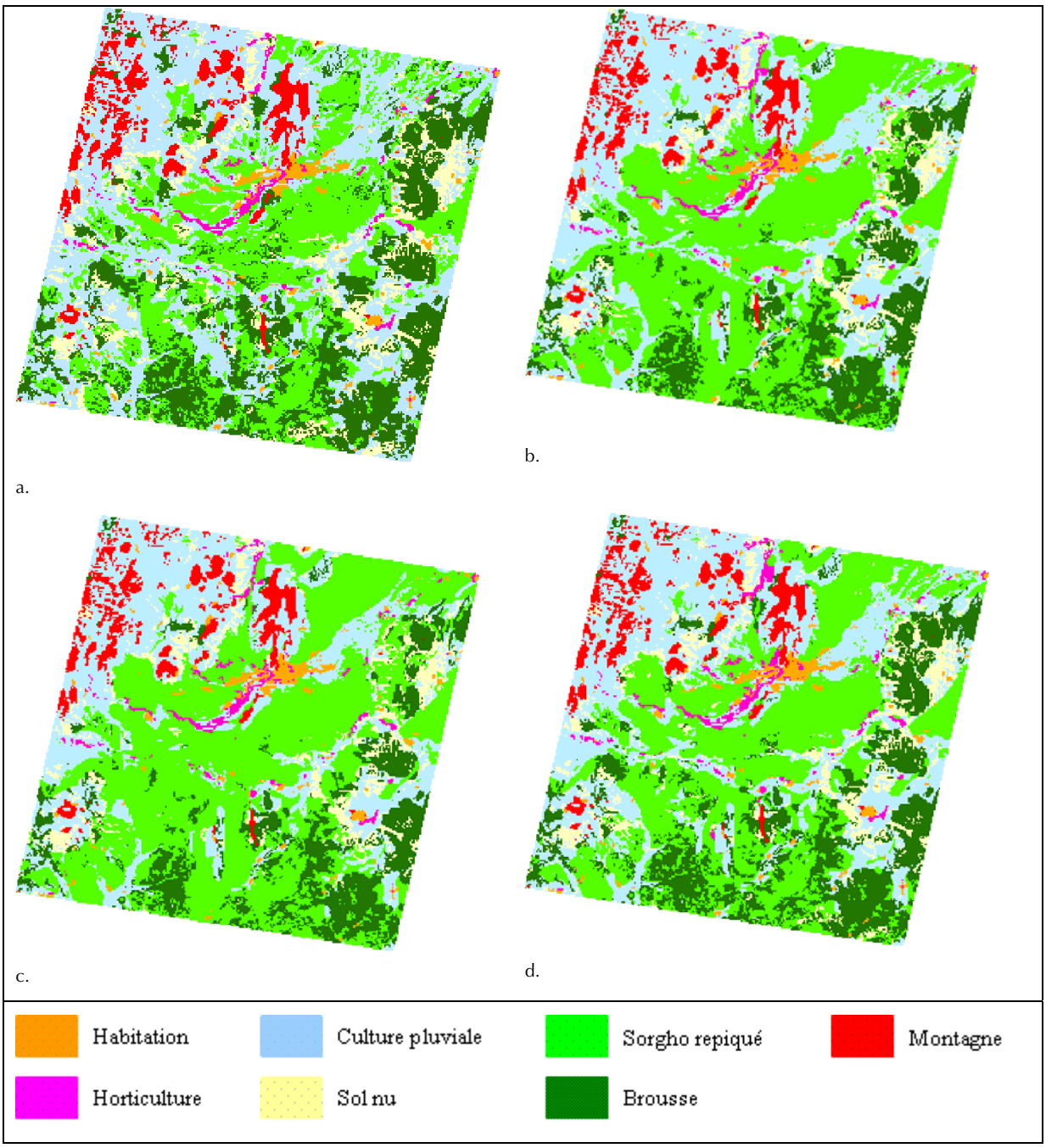

Figure 8. a) Cartes d'utilisation de l'espace en 1999 obtenue par analyse d'image, b) carte prédite en 2010 pour le scénario de base, c) pour le scénario 2 considérant une trajectoire malthusienne et d) pour le scénario 3 considérant une trajectoire boserupienne.

Conclusion et perspectives

Le modèle développé constitue un outil de recherche exploratoire sur les processus de changement et un support d'aide à la planification de l'utilisation de l'espace. Pour chaque scénario, les résultats des simulations montrent les zones où on peut s'attendre à des changements et envisager des actions de développement. Les cartes produites montrent par exemple les zones boisées qui pourraient encore faire l'objet d'actions de conservation, de gestion ou d'exploitation plus durables. Les limites de ce travail qui ouvrent des perspectives de recherche portent sur les trois principaux thèmes suivants : le changement d'échelle, les méthodes de collecte ou de représentation des données, et l'approche de modélisation.

Une première façon d'améliorer les performances du modèle consisterait à explorer les effets du changement d'échelle sur la précision et la pertinence des prédictions. L'échelle ici fait référence aussi bien à la résolution spatiale des données qu'à l'étendue géographique de la zone d'étude. La prise en compte des différentes zones agroécologiques dans la définition des modèles de régression peut augmenter la précision des prédictions. Dans la même perspective, la mise en œuvre du modèle peut être envisagée sur des espaces un peu plus vastes.

Les résultats de la validation ont montré que les performances du modèle dépendent de la qualité du processus de préparation des données et de leur format de représentation. Les données spatiales doivent représenter au mieux les processus étudiés. En particulier, la méthode de cartographie doit minimiser les erreurs de confusion des classes d'utilisation de l'espace (Fotsing *et al.,* 2006). La principale contrainte reste l'indisponibilité où la difficulté de disposer des données spatiales explicites sur tous les facteurs qui sont importants dans l'analyse des processus de changement d'utilisation de l'espace. Un effort important est nécessaire pour développer des bases de données spatiales explicites intégrant les données sociodémographiques et culturelles plus pertinentes.

La manière dont les relations de causalité et les mécanismes de changement sont pris en compte dans le modèle fait que certains aspects qui sont pourtant déterminants ne sont pas pris en compte dans le modèle. Il peut s'agir de facteurs dont les dynamiques ou les effets de leur interaction ne peuvent être facilement représentées sous forme spatiale (motivations, logiques ou stratégies des acteurs). Une solution consiste à s'orienter vers des modèles utilisant des approches déductives qui présentent l'avantage de conduire aux meilleures chaînes de causalité et d'explication que les approches empiriques de type inductives (Overmars *et al.,* 2007). La modélisation multi-agents couplée aux Systèmes d'information géographique est une approche qui semble appropriée pour répondre aux questions concernant notamment la modélisation des processus de prise de décision individuelle et collective (Parker *et al.,* 2003).

Références bibliographiques

BAKER W.L., 1989. A review of models of landscape change. Landscape ecology 2: 11-133.

BOSERUP E., 1965. The conditions of Agricultural Growth: the economic of agrarian change under population pressure. (Ed) George Allenand Unwin LTD London, Aldine Publishing company, Chicago, 122 p.

COSTANZA R., 1989. Model Goodness of fit: a multiple resolution procedure. In Ecological modelling 47 (1989): 199-215.

FOTSING E., CHEYLAN J-P., VERBURG P.H, 2006. From images to patterns: a step toward the identification and modelling of land change processes in a savannah landscape. Proceedings of the 6th AARSE International Conference on Earth Observation & Geoinformation Sciences for Africa's Development, Cairo-Egypt, 30 October - 2 November 2006.

FOTSING E., VERBURG P.H., DEGROOT W.T., TCHUENTE M., CHEYLAN J-P., 2007. Une méthode d'exploration spatiale pour analyser les facteurs déterminant les changements d'utilisation de l'espace appliquée à une région du Nord-Cameroun. Actes du Colloque international « L'Afrique centrale, le Cameroun et les changements globaux » IGBP Cameroun, Yaounde, 6-8 Juin 2007.

LAMBIN F.E., GEIST H.J., Lepers E., 2003. Dynamics of Land use and Land cover change in tropical regions. Annu. Rev. Environ. Ressour, 28: 205-41.

NIEMEIJER D., MAZZUCATO V., 2002. Population growth and the environment in Africa: local informal institutions, the missing link. Amsterdam Research Institute for Global Issues and Development Studies. p. 171-193.

NJOMAHA C., 2004. Agricultural change, food production and sustainability in the far North of Cameroon. Phd Thesis, Leiden University, 245 p.

OVERMARS K.P., DE GROOT W.T., HUIGEN M.G.A., 2007. Comparing inductive and deductive modelling af land use decisions : principles, a model and an illustration from the Phillipines. Human Ecology, online first DOI 10.1007/s10745-9101-6.

PARKER D.C., MANSON S.M., JANSSEN M.A., HOFFMAN M., DEADMAN P., 2003. Multi-agents systems for the simulation of Land-Use and Land-Cover Change : A review. Annals of the Association of American Geographers, 93 (2): 314-337.

PONTIUS R.G.J., HUFFAKER D., DENMAN K., 2004. Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. Ecological Modelling, 179 (4): 445-461.

PONTIUS JR. R. G., WIDEKE B., CASTELLA J-C., KEITH C., TON DE NIJS, DIETZEL C., ZENGQIANG D., FOTSING E., GOLDSTEIN N., KOK K., KOOMEN K., LIPPITT C. D., MCCONNELL W., PIJANOWSKI B., SNEHAL P., SOOD A. M., SEAN SWEENEY, TRAN NGOC T., VELDKAMP A.T., AND VERBURG P.H., 2007. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. Annals of Regional Science, DOI 10.1007/s00168-007-0138-2.

RIEBSAME W.E., PARTON W.J., GALVIN K.A., BURKE I.C., BOHREN L., YOUNG R., KNOP E., 1994. Integrated modeling of land use and cover change : A conceptual scheme for applying an integration strategy to agricultural land use on the U.S great plains. *In* Biosciences, 44 (5): 350-356.

VELDKAMP A., FRESCO L.O., 1997. Exploring Land use scenarios, an alternative approach based on actual land use. Agricultural systems, 55 (11): 1-77.

VERBURG P.H., SOEPBOER W., VELDKAMP A., ESPALDON V., and Sharifa M., 2002. Modelling the spatial dynamics of regional land use : the CLUE-S model. Environmental Management, 30 (3): 391-405.