



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **SMALL Savannah : an information system for the integrated analysis of land use change in the Far North of Cameroon**

Fotsing, E.

### **Citation**

Fotsing, E. (2009, December 8). *SMALL Savannah : an information system for the integrated analysis of land use change in the Far North of Cameroon*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/14619>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/14619>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).



**Photo 10.** Deux jeunes hommes du retour de la collecte du bois de feu dans la savane boisée (brousse) autour du village de Gadas, Extrême Nord du Cameroun.

# Chapitre 10. Un modèle intégré pour explorer les trajectoires des changements d'utilisation de l'espace

## 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. Ce chapitre décrit les bases d'un modèle intégré développé pour explorer les trajectoires des changements 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, socio-démographiques et géoéconomiques. La procédure d'allocation des changements du modèle combine les résultats des modules de diagnostic, d'analyse spatiale et de prédiction du SIE SMALL Savannah. La validation du modèle a été effectuée pour la période 1987-1999 et les changements ont été simulés sur la période 1999 – 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 telles que formulées par les théories de Boserup et de Malthus. 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 pour l'accès à la terre par les acteurs et pour les différentes utilisations de l'espace. 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.

**Mots clés :** changements d'utilisation de l'espace, modèle intégré, analyse spatiale, trajectoire, scénario, transition agraire.

## Abstract

Dynamic spatial models are important tools for the study of complex systems like environmental systems. Beside, an integrated approach is required in order to obtain a more comprehensive understanding of the behaviour of these systems. This chapter describes the basis of an integrated model developed to explore land use change trajectories in a region around Maroua, Far North of Cameroon. The model simulates competition between land use types taking into account a set of biophysical, socio-demographic and geo-economics driving factors. The procedure for allocating changes in the model combines the results of the spatial analysis and prediction modules of SMALL Savannah EIS. The model validation was carried out for the period 1987-1999 and the simulation of change was performed for the period 1999 -2010. Three scenarios were formulated based on the main observed trends of change and hypothesis related to land use transition as stated by Boserup and Malthus. The major observed land use dynamics are related to the recent extension of dry season sorghum and the development of horticulture that induce more competition on land between actors and for the different land use types. The model developed constitutes an efficient knowledge support system for exploratory research and land use planning. It can also be used to initiate any concertation or negotiation between actors concerned with land management.

**Key words:** land use change, integrated model, spatial analysis, trajectory, scenario, agrarian transition

## 10.1. Introduction

La structure du système agraire des zones de savanes de l'Extrême Nord du Cameroun est caractérisée par de nombreuses interactions qui se traduisent par des relations de compétition ou de complémentarité entre les différentes formes de mise en valeur de l'espace. De plus, on a observé au cours des deux dernières décennies, de nombreuses mutations agraires dont les logiques présentent une diversité de situations. Un nombre important de facteurs a joué un rôle dans ces dynamiques à différentes échelles. Une analyse préalable du système d'utilisation de l'espace effectuée au chapitre 5 a mis en exergue des caractéristiques qui révèlent la complexité du système d'utilisation de l'espace dans cette région. Au chapitre 7, l'analyse spatiale du système d'utilisation de l'espace a mis en évidence l'exemple de la diversité des situations liées à l'extension récente de la culture du sorgho de contre saison à différentes échelles. L'analyse quantitative des dynamiques spatiales effectuée au chapitre 8 a montré les conséquences des défrichements effectués pour la mise en valeur des terres en sorgho repiqué. Compte tenu de la forte demande alimentaire, on assiste à la mise en place d'un système extensif qui s'accompagne du développement de la spéculation et de la rente foncière par les acteurs urbains et ruraux. 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.

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 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-culturelle, économique ou politique et inversement (Turner et al., 1995; Lambin et al., 1999). 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, 1994 ; Briassoulis, 2000 ; Irwin et Geoghegan, 2001, Lambin et al., 2003 ; Parker et al., 2003). Une approche de modélisation intégrée est indispensable lorsqu'on veut avoir une compréhension plus complète du comportement des systèmes complexes (Kok, 2001 ; Riebsame et al., 1994). Le but ultime de la recherche menée dans cette thèse est de construire et mettre en œuvre un tel modèle dynamique pour la région d'étude. La démarche vise à partir d'une approche et explorer les possibilités de complémentarité avec les autres approches. Les approches empiriques de type statistique apparaissent comme un bon point de départ dans le contexte de la zone d'étude qui est très complexe et où on ne dispose pas assez de connaissances formelles sur le fonctionnement du système d'utilisation de l'espace.

L'application présentée au chapitre précédent est un exemple d'une telle démarche de modélisation intégrée. L'attention dans ce chapitre a été focalisée sur l'identification des facteurs déterminant la structure et les changements. Les modèles développés à cet effet définissent uniquement les localisations potentielles de chaque utilisation de l'espace ou des changements en fonction de ces facteurs. Ces modèles n'intègrent pas explicitement les mécanismes qui conduisent aux changements. Les connaissances obtenues peuvent être utilisées pour calibrer un modèle de simulation des changements futurs qui intègre plus ou moins les mécanismes et interactions en jeu.

Ce chapitre décrit les bases d'un modèle dynamique et intégrée développé pour explorer les trajectoires des changements d'utilisation de l'espace dans la région autour de Maroua, à l'Extrême Nord du Cameroun (Fotsing et Verburg, 2001). 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, socio-démographiques et géoéconomiques. La plate-forme de modélisation CLUE-S qui a été utilisée appartient à la famille de ces approches de modélisation empiriques qui extrapolent les changements d'utilisation de l'espace en s'appuyant sur les relations observées. Toutefois, elle prend en compte les propriétés du système d'utilisation de l'espace et les mécanismes de changement notamment les compétitions entre formes d'utilisation de l'espace, les politiques ou restrictions spatiales comme le zonage de l'espace. Le contenu du chapitre est organisé de la façon suivante : la section suivante rappelle le contexte et le cadre méthodologique de l'étude ; puisque celle-ci repose sur le cadre conceptuel et les outils proposés par le Système d'Information SMALL Savannah, les sections suivantes correspondent plus ou moins aux résultats de la mise en œuvre d'un ou de plusieurs modules de SMALL Savannah. La section 3 décrit la structure du modèle dynamique de simulation développé. Cette section présente tour à tour la procédure d'allocation des changements du modèle, la calibration et la formulation des scénarios explorés. La section 4 décrit et discute les résultats de la validation du modèle à la lumière des autres modèles du même type. La section 5 est consacrée à l'analyse des dynamiques spatiales correspondant aux différents scénarios formulés. La section 6 rappelle les leçons apprises et dégage quelques perspectives d'amélioration et de valorisation du modèle.

## **10.2. Contexte et cadre méthodologique de l'étude**

### **10.2.1. Zone d'étude et changements d'utilisation de l'espace**

La zone d'étude pour cette application du SIE SMALL Savannah est la même qui a été étudiée dans les chapitres 8 et 9. Une analyse préalable du système d'utilisation de l'espace effectuée au chapitre 5 a mis en exergue des caractéristiques qui révèlent la complexité du système d'utilisation de l'espace dans cette région. Les principaux processus de changement d'utilisation de l'espace observés portent sur l'expansion agricole et la saturation foncière (Seignobos et al., 1995; Timmermans, 1998). A titre d'illustration, deux transitions particulières notamment de « brousse » vers « culture pluviale » et de « brousse » vers « sorgho repiqué » représentent environ la moitié des changements identifiés dans la zone d'étude entre 1987 et 1999 (Fotsing et al., 2006). L'analyse quantitative des dynamiques spatiales effectuée au chapitre 8 a montré les conséquences des défrichements effectués pour la mise en valeur des terres en sorgho repiqué. Compte tenu de la forte demande alimentaire, on assiste à la mise en place d'un système extensif qui s'accompagne du développement de la spéculation et de la rente foncière par les acteurs urbains et ruraux. La réduction des espaces de brousse conduit à une compétition pour l'espace entre les activités agricoles, pastorales et sylvicoles. On peut distinguer globalement trois principales phases dans l'évolution des changements du système d'utilisation de l'espace dans cette petite région au cours de la période considérée.

La première phase qui se situe au cours de la décennie 80 est caractérisée par le boom démographique urbain qui est à la base des premiers processus de transformation des paysages ruraux. En effet, l'interprétation visuelle de l'image Landsat de 1975 sur cette zone montre que le paysage initial de cette

région était dominé par une savane boisée assez dense (brousse). La mise en place du peuplement et les différentes migrations conduisant à l'installation de populations de plus en plus nombreuses et diverses ont contribué à modifier progressivement ce paysage par les différentes activités agricoles et pastorales. La culture maraîchère par exemple est très ancienne dans la région. Iyebi Mandjeck (2001) situe la diffusion des légumes et plantes de jardin entre le milieu et la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Toutefois, la période charnière de son expansion se situe au milieu des années 70 avec l'ouverture des marchés urbains du sud du Cameroun et plus récemment au milieu des années 80 avec la ville de Maroua qui devient capitale de la province (1983). La ville prend de l'importance et le flux important de fonctionnaires favorise l'augmentation de la demande.

La deuxième phase est caractérisée par deux processus stimulés par les besoins alimentaires et économiques croissants des populations: l'extension agricole récente et le défrichement des savanes boisées. En effet, on observe à partir de la décennie 90 une demande croissante en bois de feu des populations urbaines qui se traduit par d'importants défrichements de la savane boisée (Fotsing et al., 2006). Ce processus s'est opéré parallèlement avec une forte extension agricole qui s'effectue sous deux formes. On note d'une part l'extension des cultures pluviales avec en première place le coton qui a toujours été la principale culture de rente. On note d'autre part, l'extension de la culture du sorgho de contre saison qui joue actuellement un rôle très important dans la stratégie de maintien de la sécurité alimentaire. Dans les zones à vocation pastorale, la conduite de cette culture de contre saison est compatible avec le calendrier des activités et favorise ainsi une meilleure intégration entre l'agriculture et l'élevage (chapitre 7). Toutefois, des études ont montré que l'intensité de l'extension agricole et l'augmentation de la pression pastorale dans cette région ont contribué à une dégradation des sols, les amenant à un état dénudé (Triboulet, 1995). En réponse à l'augmentation de la population, on a observé plus récemment une tendance à la récupération de ces terres marginales pour l'extension agricole traduisant ainsi la situation de saturation foncière à laquelle aboutissent plusieurs terroirs (Seignobos, 1995).

Une troisième phase est annoncée avec l'achèvement des possibilités de continuation du système extensif actuel qui est caractérisé par la réduction des jachères et les défrichements importants des zones de brousse. Si on considère le taux d'accroissement actuel, on voit que la population de cette région devra encore doubler dans les trois prochaines décennies. Une question importante pour les acteurs impliqués dans le développement de la région est de savoir quelles sont les dynamiques d'utilisation de l'espace qui vont se mettre en place et comment les populations devront faire face à ces mutations pour satisfaire leurs besoins alimentaires. Les principales hypothèses formulées sur la trajectoire des changements d'utilisation de l'espace dans le futur font référence aux théories de Boserup et Malthus. Les dynamiques au cours de cette troisième phase d'évolution vont dépendre principalement des réponses paysannes en terme d'investissement dans la conservation et la gestion des ressources naturelles. Ces investissements concernent notamment l'amélioration de la qualité des sols et des institutions qui gouvernent l'utilisation de l'espace comme le régime foncier, le marché ou les pratiques paysannes, etc. (Niemejer et Mazzucato, 2002 ; Mazzucato et Niemejer, 1996). Njomaha (2004) a étudié une vingtaine de village de la région de l'Extrême Nord du Cameroun pour lesquels il évalue les contraintes et les atouts de chacun pour de tels investissements en s'appuyant sur les résultats d'enquêtes auprès des producteurs. Il conclut que la région dans l'ensemble semble s'orienter vers une trajectoire Malthusienne. Toutefois, ses résultats mettent en

exergue quelques sites comme Meskine dans la plaine du Diamaré qui présentent des signes d'une trajectoire Boserupienne. A l'échelle régionale, la modélisation dynamique des changements d'utilisation de l'espace est très importante dans ce contexte pour explorer les conditions d'évolution de chaque site et de proposer des solutions pour éviter que le système ne s'oriente vers une trajectoire indésirable. L'analyse spatiale explicite effectuée au chapitre précédent a permis de quantifier l'influence des facteurs déterminant la structure et les changements d'utilisation de l'espace au cours de la dernière décennie (1987-1999). Ce chapitre décrit une première version d'un modèle dynamique spatial qui simule les changements et explore quelques scénarios de développement futur de l'utilisation de l'espace au cours de la prochaine décennie (1999-2010).

### **10.2.2. Justification de l'approche d'analyse et de modélisation**

La modélisation spatiale dynamique est un outil approprié pour étudier les systèmes complexes comme les systèmes d'utilisation de l'espace. En proposant l'exécution de plusieurs scénarios d'évolution, les modèles de simulation dynamiques offrent la possibilité de tester la sensibilité de la structure d'utilisation de l'espace et la stabilité de l'ensemble du système face aux changements des facteurs déterminants (Veldkamp et Fresco, 1997). Nous avons montré au chapitre 3 qu'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, 1994 ; Briassoulis, 2000 ; Irwin et Geoghegan, 2001, Lambin et al., 2003 ; Parker et al., 2003). On distingue principalement trois principales classes de modèles qui dépendent principalement de la manière dont les processus et les mécanismes de changement sont appréhendés : les modèles empiriques, les modèles mécanistes et les modèles de type système (figure 3.9). Ces modèles 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. Au regard de cette typologie on peut anticiper que le modèle le plus utile pour l'analyse des dynamiques d'utilisation de l'espace devrait reposer sur une approche hybride ou intégrée c'est à dire qu'il devrait tirer profit plus ou moins de plusieurs approches (Kok, 2001 ; Riebsame et al., 1994 ; Lambin et al., 2003). Une approche de modélisation intégrée est indispensable lorsqu'on veut avoir une compréhension plus complète du comportement d'un système complexe. Le but ultime de la recherche menée dans cette thèse est de construire et mettre en œuvre un tel modèle dynamique pour la région d'étude. La démarche vise à partir d'une approche et explorer les possibilités de complémentarité avec les autres approches. Les approches empiriques de type statistique apparaissent comme un bon point de départ dans le contexte de la zone d'étude qui est assez complexe et où on ne dispose pas assez de connaissances formelles sur le fonctionnement du système d'utilisation de l'espace.

Les modèles construits au chapitre 9 permettent de répondre aux questions où et pourquoi les processus opèrent. Ce sont des modèles explicatifs de type spatial. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux modèles qui permettent en plus de ces réponses, d'aborder les questions relatives aux conséquences de ces processus dans l'espace et le temps. Cette classe correspond aux modèles de simulation dynamique de type spatial. L'approche de modélisation suivie est principalement de type spatiale et empirique. Elle combine à cet effet les données de la télédétection sous un SIG avec des modèles mathématiques multi-variés ou multi-temporels. Les modèles basés sur ce type d'approche reposent sur une hypothèse forte reliant sciences sociales et écologiques en faveur de la modélisation intégrée. Les changements d'utilisation de l'espace sont modélisés comme la fonction d'une sélection de variables socio-économiques et

biophysiques qui agissent comme des facteurs déterminant les changements d'utilisation. Une analyse empirique des changements observés dans la structure de l'utilisation de l'espace basée sur les techniques statistiques permet de sélectionner les facteurs déterminants les plus importants et de quantifier les relations. La mise en oeuvre dans les modèles varie d'une translation directe de l'analyse empirique en probabilité de transition (Baker, 1989 ; Turner, 1987) aux modèles intégrés combinant les relations déterminées empiriquement avec une modélisation mécaniste des interactions entre les types d'utilisation de l'espace et les rétroactions dans le système (Verburg et al., 2002). La principale supposition de ces modèles de prédiction basés sur une analyse empirique des facteurs déterminants c'est que la structure des facteurs déterminants soit la même. C'est pourquoi ce type de prédiction est le plus souvent limité aux changements dans un futur proche (entre 10 et 20 ans). L'intérêt de ce type de modèle de prédiction réside dans sa capacité à simuler les structures d'utilisation de l'espace et localiser les changements qui résulteraient de la continuation des pratiques actuelles de gestion de l'espace.

### **10.2.3. Cadre méthodologique et plate-forme de modélisation utilisée**

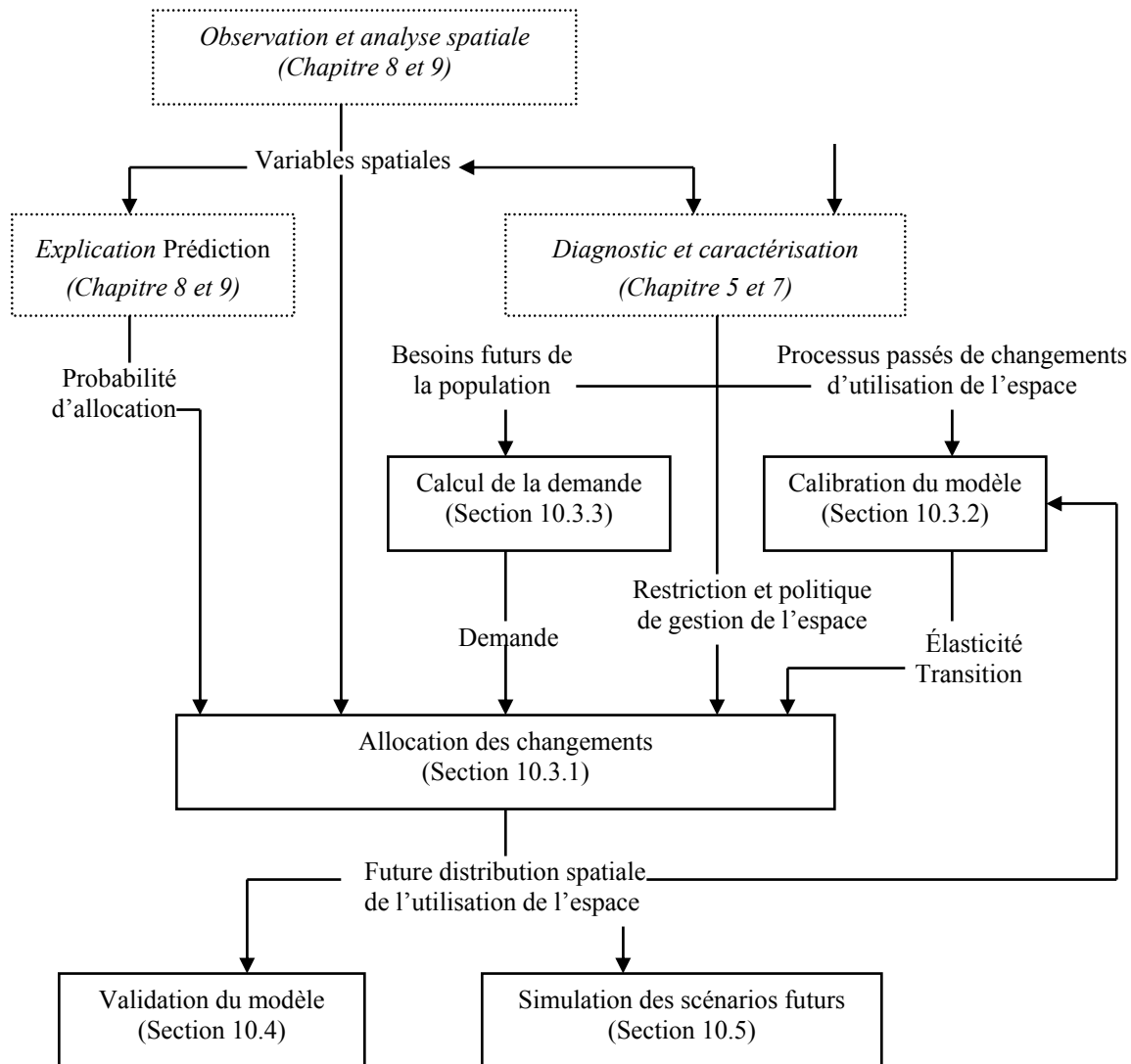
L'application présentée dans ce chapitre est une application qui illustre la mise en oeuvre du module de modélisation dynamique et simulation du SIE SMALL Savannah présenté au chapitre 6. La figure 10.1 montre les flux d'information entre les différents modules et la plate-forme CLUE-S utilisée pour développer le modèle dynamique présenté dans ce chapitre. CLUE (Conversion of Land use and its Effects) est une plate-forme de modélisation dynamique et de simulation qui appartient à la famille des approches de modélisation de type empirique. Celles-ci extrapolent les changements d'utilisation de l'espace en s'appuyant sur les relations observées à une date antérieure. Toutefois, elle prend en compte les propriétés du système d'utilisation de l'espace et les mécanismes de changement notamment les compétitions entre formes d'utilisation de l'espace, politiques ou restriction spatiales et le zonage de l'espace (Veldkamp et Fresco, 1996; Verburg et al., 1999, <http://www.cluemodel.nl>). Le principe et le fonctionnement de cette forme plate-forme ont été décrits en détail au chapitre 3. CLUE-S est une version de la plateforme adaptée à l'analyse de l'utilisation de l'espace sur des petites régions où les données et le système d'utilisation de l'espace ont des propriétés spécifiques. La plate-forme CLUE a été utilisée pour développer des modèles dans différents contextes d'utilisation de l'espace aux échelles continentale, nationale et régionale. On compte environ une dizaine d'applications dans le monde qui portent sur une grande variété de trajectoires d'utilisation de l'espace incluant l'intensification agricole, la déforestation, l'abandon des terres et la croissance urbaine. Des applications sont notamment disponibles en Amérique Centrale (Equateur, Costa Rica), en Europe (Hollande) et en Asie (Chine, Malaisie, Vietnam, Philippines et Java). Le modèle présenté dans ce chapitre est la première application de CLUE en Afrique.

## **10.3. Structure et mise en oeuvre du modèle dynamique de simulation**

### **10.3.1. Aperçu général de la structure du modèle**

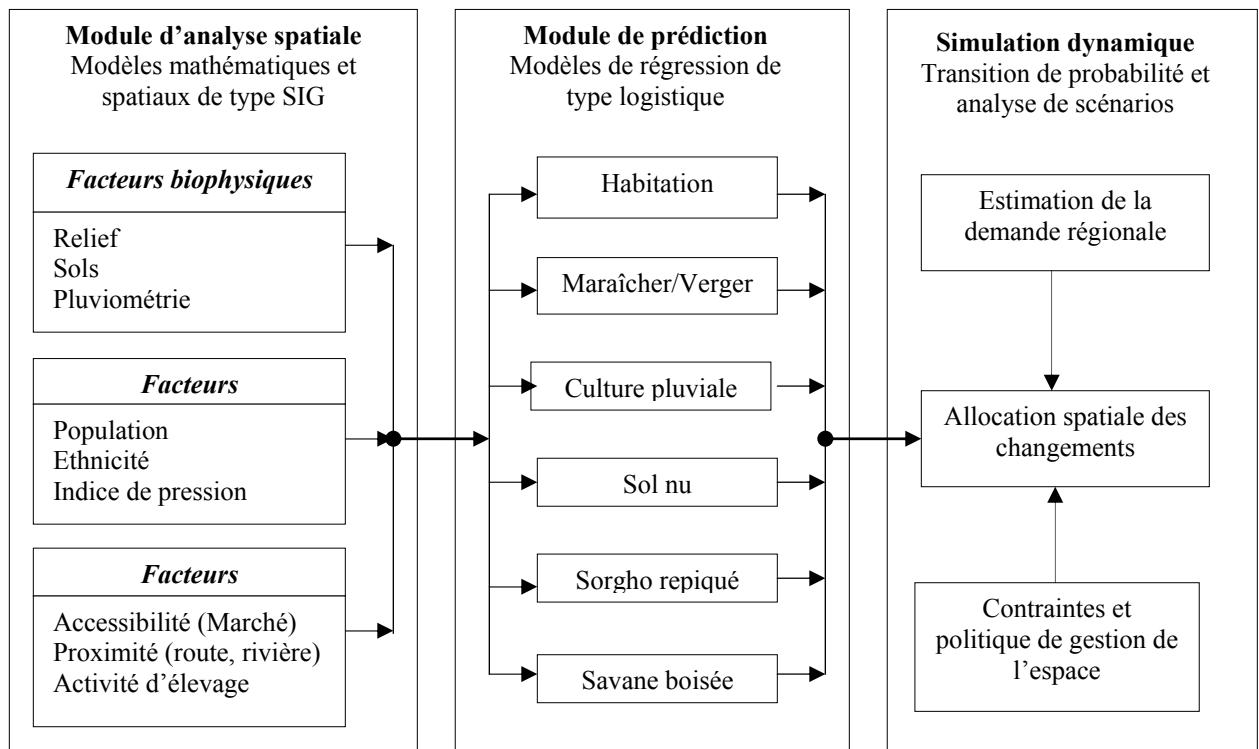
Le modèle développé simule les changements et la compétition entre 6 catégories d'utilisation de l'espace entre 1999 et 2010 en prenant en compte l'influence d'un ensemble de facteurs biophysiques, socio-démographiques et géoéconomiques. La représentation de l'utilisation de l'espace utilise les pixels purs d'une taille de 250 m. La figure 10.1 montre comment la procédure d'allocation des changements du modèle développé combine les résultats des modules d'analyse spatiale, de caractérisation et de prédiction.





**Figure 10.1 : Flux d'informations entre les modules de SMALL Savannah et de la plate-forme CLUE-S. Le rectangle en pointillé et le texte en italique représentent les modules non utilisés dans cette application.**

Le module d'analyse spatiale est constitué de sous-modèles mathématiques qui définissent les variables représentant la distribution de l'utilisation de l'espace et des facteurs déterminants. Les informations géographiques extraites de la base de données de SMALL Savannah sont utilisées pour calculer un ensemble de variables spatiales explicites. Le module de prédiction est constitué des modèles de prédiction de type régression logistique qui sont définis pour chaque utilisation de l'espace. Les résultats sous forme des coefficients logistiques (présentés au chapitre 9) sont utilisés pour calculer la probabilité d'allocation de chaque type d'utilisation de l'espace. Les modèles de régressions pour la situation de 1987 ont été utilisés pour la calibration et la validation du modèle entre 1987 et 1999. Les modèles de régressions pour la situation de 1999 ont été utilisés pour la prédiction des changements en 2010.



**Figure 10.2 : Structure du modèle intégré de changement d'utilisation de l'espace sur la région autour de Maroua.**

### 10.3.2. La procédure d'allocation des changements

Le modèle génère la carte de prédiction en s'appuyant sur l'utilisation de l'espace en 1987 et aucune information ultérieure à cette date n'est utilisée pour aider la prédiction entre les deux dates. Pour chaque scénario, l'allocation des changements est faite suivant une procédure itérative où la décision de conversion d'une utilisation de l'espace est déterminée par la demande, les probabilités d'allocation et les paramètres de conversion de chaque utilisation de l'espace (figure 10.1).

A chaque pas de temps, la demande est calculée pour chaque utilisation de l'espace à l'échelle de la région. En effet, les besoins futurs des populations en produits exigés par chaque scénario sont traduits en superficies et fournies comme données d'entrée pour la procédure d'allocation. Une nouvelle carte de probabilité d'allocation est calculée à chaque pas de temps en utilisant les valeurs mises à jour des facteurs déterminants qui changent dans le temps tels que la distribution de la population ou l'accessibilité. A titre d'illustration, la figure 10.3 montre les cartes de probabilités des 6 catégories d'utilisation en 1999. On peut voir les zones qui ont une forte probabilité d'être allouées à chaque utilisation de l'espace en couleur foncé. La décision d'allocation d'un pixel à une utilisation donnée s'appuie sur ces probabilités et prend en compte les règles de conversion propre à chaque forme d'utilisation de l'espace (Verburg et al., 1999).

Les paramètres de conversion de chaque type d'utilisation de l'espace comme l'élasticité et les séquences de conversion ou transition sont des caractéristiques intrinsèques du système d'utilisation de l'espace qui

traduisent les mécanismes de changement. L'élasticité en particulier est un facteur de résistance au changement qui est affecté à chaque utilisation de l'espace en s'appuyant sur les connaissances du système d'utilisation de l'espace de la région (chapitres 5, 7, 8 et 9). Elle correspond à la réversibilité des changements et traduit la facilité d'une cellule à passer d'un type à un autre. Ces propriétés sont définies lors de la calibration du modèle. Les séquences de conversion ou transition sont représentées par une matrice de transition où les valeurs indiquent les possibilités de conversion de chaque utilisation de l'espace. Dans le tableau 10.1 qui montrent la matrice de transition de la première version du modèle développé, la valeur 1 indique que la conversion est possible alors que la valeur 0 indique que la conversion est impossible à chaque pas de temps (1 ans). Dans cette première version du modèle, on suppose que tous les changements sont possibles à chaque pas de temps, à l'exception de la classe montagne qui reste statique. D'autre part les zones d'habitation ne peuvent être converties en aucune autre utilisation. Les abandons d'habitation observés localement sur les images et confirmés à l'échelle des terroirs ont été négligés du fait qu'elles sont de très faible importance et difficilement interprétables à l'échelle de la région. Le nombre de temps maximum ou minimum avant qu'une conversion ne prenne place n'est pas pris en compte dans cette version du modèle. Des restrictions spécifiques ou politiques de gestion de l'espace peuvent également être formulées pour chaque scénario. Par exemple, on peut définir une mesure de conservation consistant à interdire des défrichements dans certaines zones comme les aires protégées ou des zones de brousse. Il suffit dans ce cas de fournir une carte de ces espaces en entrée de la procédure d'allocation.

		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
	Maraîcher/verger	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 10.1 : La matrice de transition de l'utilisation de l'espace du modèle de changement de l'utilisation de l'espace.**

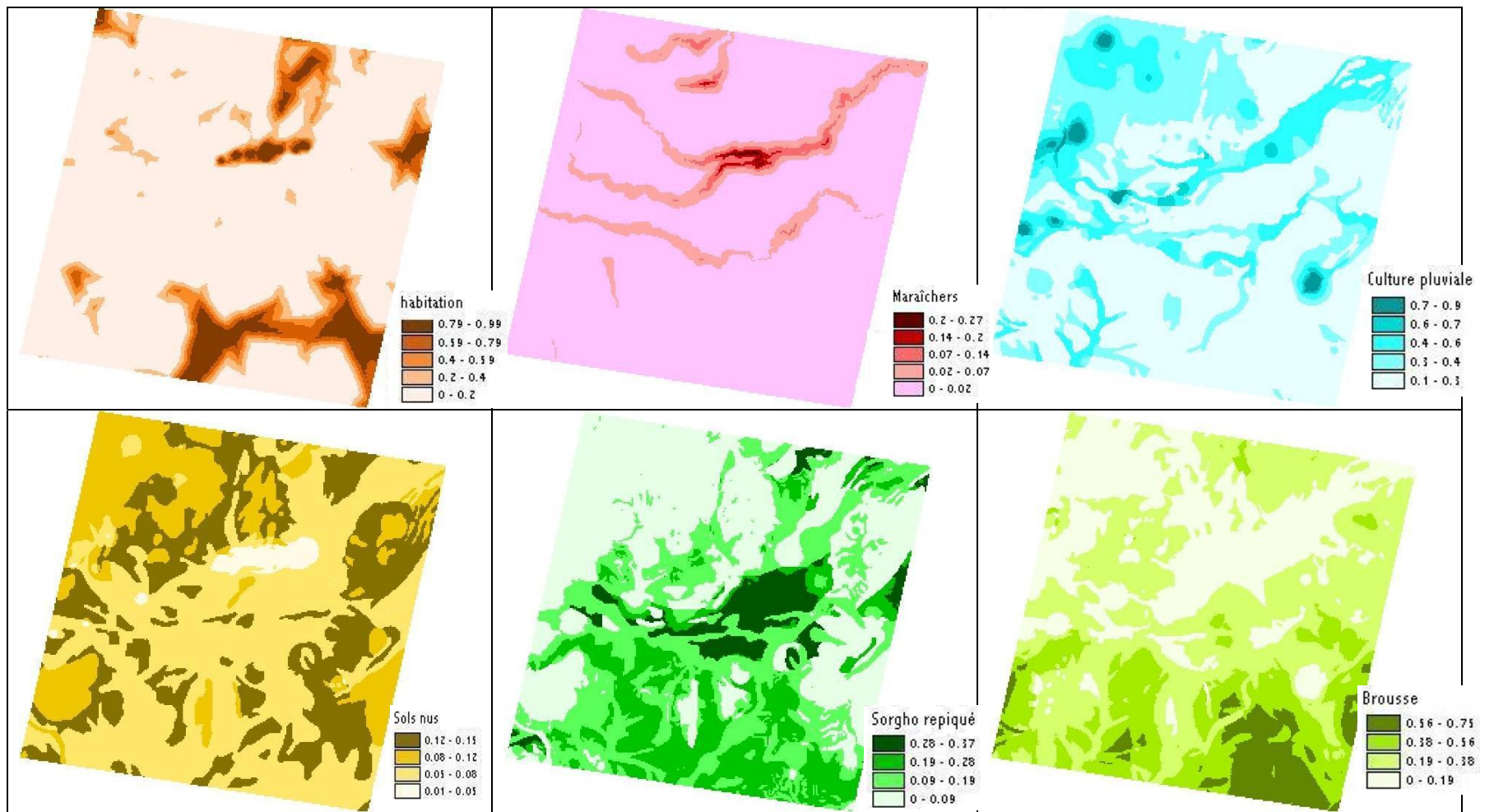


Figure 10.3 : Carte de probabilité d'allocation de chaque type d'utilisation de l'espace calculée à partir des résultats de régression de 1987.

### 10.3.3. Calibration du modèle

Dans l'approche de modélisation choisie, les connaissances d'experts et la régression statistique sont les techniques majeures de calibration. Les modèles de régressions pour la situation de 1987 sont utilisés pour calibrer le modèle dynamique. Nous avons défini l'élasticité de chaque type d'utilisation de l'espace en s'appuyant sur notre connaissance préalable des changements d'utilisation de l'espace dans la zone d'étude (chapitres 5, 7 et 8). La calibration est une procédure itérative où plusieurs simulations des changements entre 1987 et 1999 sont effectuées jusqu'à obtenir une certaine stabilité de la structure du système d'utilisation de l'espace (figure 10.1). En effet, pour certaines valeurs d'élasticité, on obtient des changements d'utilisation de l'espace irréalistes. A chaque exécution, les valeurs de l'élasticité ont été ajustées pour traduire les difficultés de conversion de chaque type d'utilisation de l'espace de manière à garantir la stabilité de la structure du système. Les valeurs finalement retenues pour les simulations ultérieures sont présentées dans le tableau 10.2. Les valeurs d'élasticité sont comprises entre 0 et 1. Les valeurs proches de 1 correspondent aux utilisations de l'espace qui changent difficilement. Les zones de montagne par exemple qui sont considérées comme statiques dans la simulation ont une élasticité de 1. Les zones d'habitation ont également une élasticité de 1 puisque les pixels qui se convertissent en zone d'habitation à une date donnée sont supposés garder cet état aux dates ultérieures. Par contre les zones de culture pluviale et les sols nus ont une élasticité de 0,2 parce qu'elles sont les classes qui changent les plus facilement. En effet, un pixel qui passe par exemple de l'état « brousse » à l'état « culture pluviale » peut après cette conversion, être abandonné ou mise en jachère (sol nu), utilisé pour l'extension de l'habitat ou pour l'agriculture de contre saison en fonction des besoins et des conditions du milieu. Les zones de culture du sorgho repiqué ont une élasticité un peu plus grande parce qu'un pixel qui est occupé par le sorgho repiqué aura un peu plus difficilement tendance à se convertir à cause des contraintes d'exploitation des espaces réservés à cette culture pour d'autres formes de mise en valeur (agriculture pluviale ou habitation). De plus, on a vu au chapitre 7 que les jachères sur les terres de sorgho repiqué surviennent le plus souvent après plusieurs années d'exploitation successives. La valeur assez élevée de l'élasticité des zones de cultures maraîchères et vergers s'explique quant à elle par la difficulté des investissements nécessaires pour cette culture. En effet la création d'un jardin maraîcher ou la plantation des arbres fruitiers nécessitent d'importants investissements que les paysans n'arrivent pas souvent à mobiliser (Njomaha, 2004). De plus, la probabilité de changement d'un verger en particulier est très faible car c'est un investissement le plus souvent à long terme. Dans le même sens, les défrichements d'une brousse exigent des efforts et des moyens qui justifient les difficultés de conversion des savanes boisées.

### 10.3.3. Formulation des scénarios de développement futurs

#### *Suppositions générales*

La formulation des scénarios s'appuie sur les résultats du diagnostic et la caractérisation des changements d'utilisation de l'espace (chapitre 5, 7 et 8). Ces résultats concernent les tendances passées des processus de changement et les hypothèses sur les trajectoires possibles d'évolution. On arrive ainsi à estimer pour chaque scénario, les besoins des populations et spécifier les exigences des politiques futures sous forme de restrictions (figure 10.1). L'un des processus les plus importants identifiés lors de l'analyse dans les

chapitres précédents est le développement d'un système d'utilisation de l'espace extensif impulsé principalement par la croissance de la population.

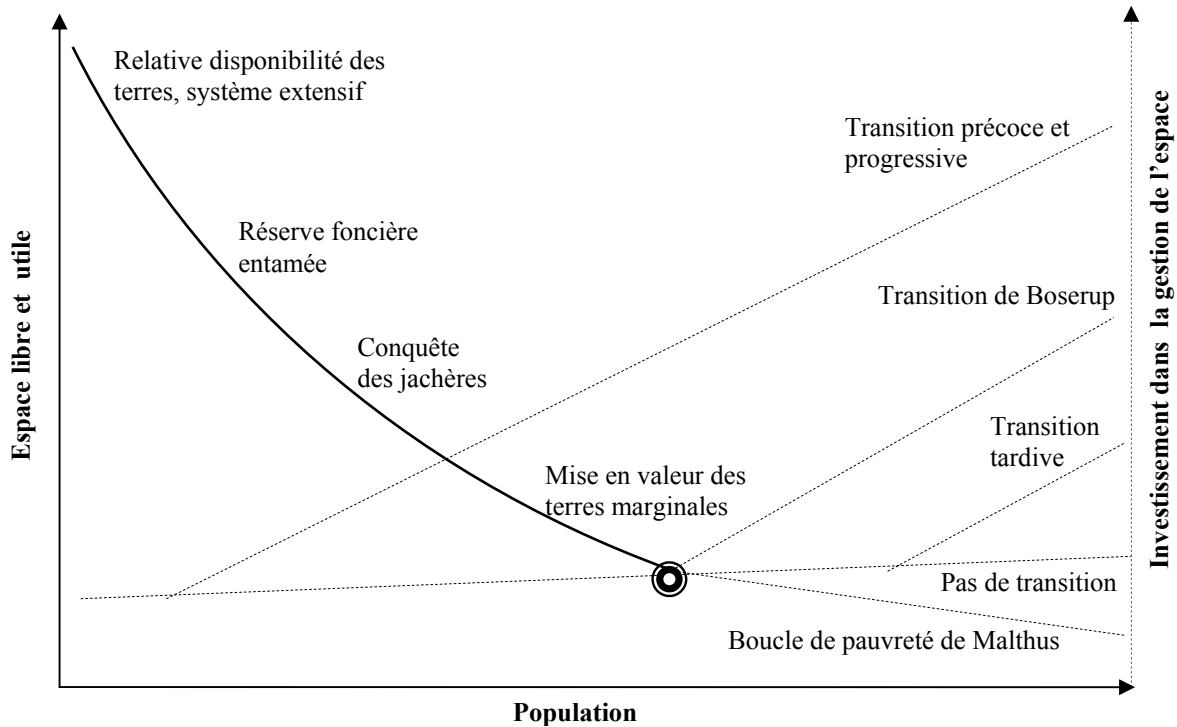
Utilisation de l'espace	Elasticité	Commentaire explicatif
Habitation	1	Changement autorisé dans une seule direction
Maraîcher/verger	0.8	Changement difficile, car investissement à long terme
Culture pluviale	0.2	Pas de contrainte spécifique pour le changement
Sols nus	0.2	Pas de contrainte spécifique pour le changement
Sorgho repiqué	0.4	Changement un peu difficile du fait des sols dédiés à la culture
Brousse	0.7	Contrainte du aux efforts et moyens à fournir pour défricher
Montagne	1	Cette utilisation de l'espace est statique au cours de la simulation

**Tableau 10.2 : Elasticité des différents types d'utilisation de l'espace résultant de la calibration**

L'extension récente de la culture du sorgho repiqué est apparue comme l'une des dynamiques qui structurent les formes d'utilisation de l'espace et pourrait de la même façon jouer un rôle majeur sur les trajectoires possibles du système agricole. Ce processus dont on peut situer l'origine au milieu des années 80 a pris des proportions remarquables au cours des années 90 et se traduit par d'importants défrichements de la savane pour l'installation des champs réduisant ainsi l'espace libre et utile (figure 10.4). En effet, la croissance urbaine qui est en cours depuis deux décennies et le développement des cultures du coton et du sorgho de contre saison sont des facteurs déterminants important des changements futurs. Les résultats de cartographie de l'occupation de sol montrent que cette phase extensive est en cours d'achèvement (Fotsing et al., 2006). Le système agricole a donc évolué d'une phase extensive vers une situation de saturation foncière qui se caractérise par l'augmentation de la population qui induit la réduction de l'espace libre et utile, la réduction des jachères et la mise en valeur des terres marginales. La véritable « transition » agricole au sens de Boserup que nous avons définie au chapitre 2 reste attendue. La figure 10.4 montre quelques trajectoires d'évolution possibles. On suppose que chacune de ces trajectoires dépend des réponses paysannes aux mutations observées en terme d'investissement pour l'amélioration de la qualité des terres et pour la conservation des ressources naturelles.

Afin de mieux comprendre et d'anticiper sur ces développements futurs, trois scénarios ont été formulés en s'appuyant sur l'analyse des tendances observés (chapitre 5, 7 et 8) et les théories de changements d'utilisation de l'espace (chapitre 2). Le scénario 1 considère une continuation des tendances et pratiques observées c'est à dire qu'on n'observe pas une véritable transition. Les deux autres scénarios prennent en compte le contexte de la région et explorent les possibilités d'évolution du système agricole selon théories de Boserup et de Malthus. Le scénario 2 correspond à une trajectoire de Malthus où on considère que la région bascule dans un cercle vicieux de pauvreté, de famine et de dégradation des ressources naturelles.

Le scénario 3 correspond à la trajectoire de Boserup où on considère que la croissance de la population conduit par contre à des innovations et des investissements importants pour l'amélioration de la qualité des terres et des institutions de gestion de l'espace. La figure 10.5 montre la différence entre les demandes d'allocation ou de récupération de chaque forme d'utilisation de l'espace au cours de la période de simulation (1999-2010) pour les trois scénarios. On peut voir que l'évolution des superficies des zones d'habitation est supposée être la même dans les trois scénarios. Les sous-sections suivantes décrivent tour à tour les suppositions de chaque scénario et les implications sur les changements de chaque forme d'utilisation de l'espace.



**Figure 10.4 : Modélisation des processus de changement d'utilisation de l'espace et trajectoires hypothétiques des changements dans un futur proche.**

**Scénario 1 considérant le maintien des tendances observées dans le passé**

Le scénario de base considère que la stratégie d'utilisation de l'espace actuelle basée sur un système extensif se poursuivra au cours des prochaines années. On suppose que les changements de l'utilisation de l'espace suivront une évolution linéaire dans le même sens de la tendance observée au cours de la dernière décennie. Pour chaque type d'utilisation de l'espace  $LU_i$ , la demande pour une année  $j$  est théoriquement donnée par la fonction géométrique suivante :

$$LU_{ij} = LU_{i0} \left[ 1 + d * \left( \frac{\Delta LU_i}{nLU_{i0}} \right) * 100 \right]^j \quad \text{où } LU_{i0} \text{ représente la quantité du type d'utilisation } i \text{ au}$$

début de la simulation,  $\Delta LU_i$  est le changement total sur toute la période de simulation représenté par la valeur  $n$  et  $d$  détermine la direction du changement avec  $d = +1$  pour un accroissement et  $d = -1$  pour une réduction. Les valeurs de  $LU_{ij}$  sont calculées automatiquement de telle façon que la superficie totale des différentes utilisations de l'espace soit égale à la superficie de la zone d'étude. Dans ce scénario, la

demande d'allocation des superficies des zones d'habitation, des zones de cultures maraîchères, de sorgho repiqué, et de savanes boisées évoluent suivant le même rythme que celui observé dans le passé.

Le tableau 10.3 montre les directions du changement et le taux de changement annuel pour chaque utilisation de l'espace entre 1987 et 1999. On suppose que les superficies des zones de cultures pluviales augmentent pour quelques années avant de se stabiliser à un maximum qui correspond au fait que les défrichements pour l'extension agricole ne sont plus possibles. Ces superficies baissent ensuite parce qu'elles sont converties en fonction des potentialités des terres et des stratégies paysannes pour l'extension de la culture du sorgho repiqué et dans une moindre mesure le développement des cultures maraîchères. Cette supposition 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 long cycle du fait de la réduction de la saison pluvieuse. La tendance de récupération des sols nus pour les activités agricoles et le reboisement continuent. Aucune supposition n'a été faite sur le rythme de récupération des sols nus et des zones de culture pluviale. Sur le plan pratique, les excédents et les déficits causés par l'extrapolation des 4 autres utilisations de l'espace sont alloués à ces deux classes proportionnellement à leur taille.

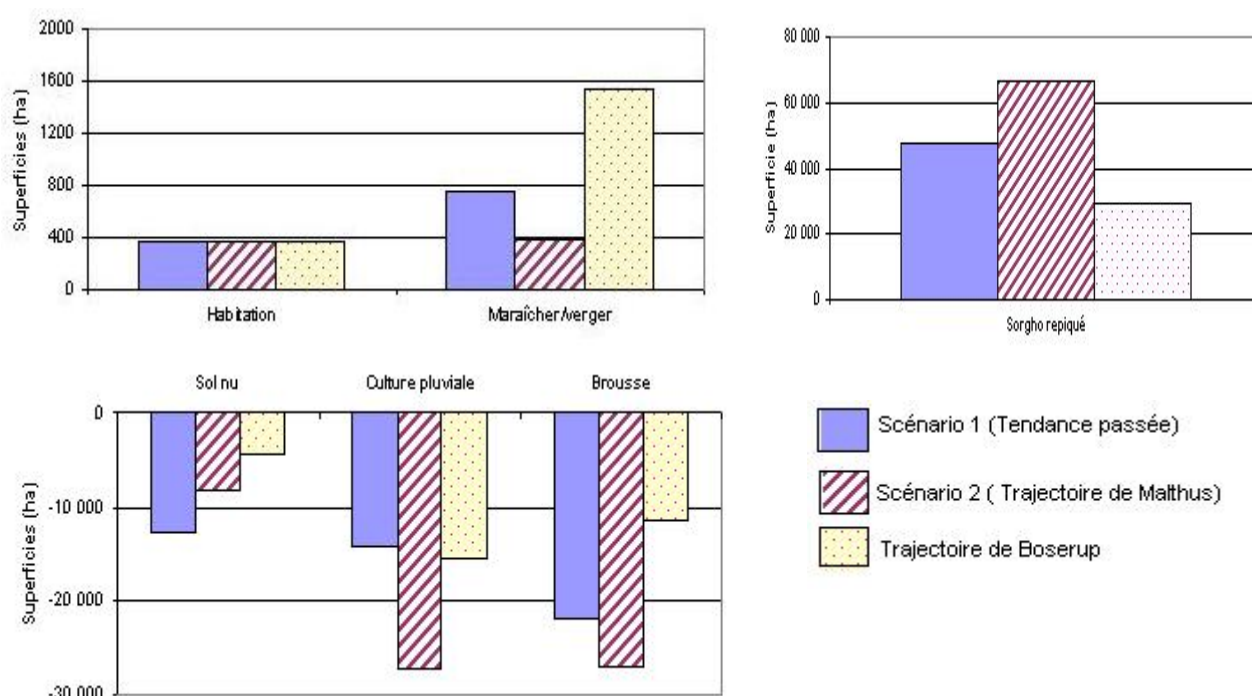


Figure 10.5 : Différence entre les demandes complémentaires d'allocation ou de récupération pour chaque utilisation de l'espace pour les trois scénarios formulés.

**Scénario 2 considérant l'évolution suivant une trajectoire Malthusienne**

Le scénario 2 considère que la région suivra une trajectoire qui semble prévaloir dans plusieurs sites de la zone d'étude. Il s'agit de la trajectoire de Malthus caractérisée par la dégradation des ressources naturelles et des institutions qui conduit à la famine et aux migrations (Njomaha, 2004). Dans ce cas, la baisse de la qualité des sols induit un accroissement important des superficies cultivées pour la même production. De



même, avec l'absence d'institutions fortes pouvant garantir la protection des ressources naturelles, les défrichements des savanes boisées sont plus importants. Dans ce deuxième scénario, on suppose que :

- la demande en céréales (sorgho repiqué dans ce cas) croit au même rythme que celui de la population soit environ 3,3% par an. La dégradation des sols et l'extension de la culture observée sur des terres marginales conduisant à la baisse des rendements, exigent des superficies plus importantes pour répondre au même besoin. Les superficies en sorgho repiqué croissent donc à un taux de 5% par an ;
- les besoins supplémentaires des villes en fruits et légumes ne sont pas tous satisfaits à cause des difficultés d'investissement (Njomaha, 2004). Les superficies utilisées pour l'horticulture augmentent comme dans le scénario 1 mais à un rythme beaucoup plus faible (0,70%) ;
- l'augmentation de la pression pour l'extension du sorgho repiqué conduit à une réduction des savanes boisées. Les populations pauvres recourent à des défrichements illégaux pour la collecte du bois de feu qui est vendu. Le rythme des défrichements observés devient plus important que dans le scénario 1 mais reste limité compte tenu du fait que le processus est en cours d'achèvement (4%).

Les suppositions pour les superficies cultivées en cultures pluviales et les sols nus sont les mêmes que dans le scénario 1 et 3.

Type d'utilisation	1 987	Direction	Taux	1 999
Habitation	6 313	+1	0,48	6 675
Maraîcher/verger	4 294	+1	1,30	4 963
Culture pluviale	93 381	+1	3,09	128 063
Sol nu	51 925	-1	3,31	31 294
Sorgho repiqué	64 225	+1	3,81	93 575
Brousse	119 031	-1	3,11	74 600
Montagne	17 981	*	0,00	17 981
<b>Total</b>	<b>357 150</b>			<b>357 150</b>

*Tableau 10.3 : Accroissement observé des superficies de chaque utilisation de l'espace entre 1987 et 1999.*

### *Scénario 3 considérant l'évolution suivant une trajectoire Boserupienne*

Le scénario 3 considère qu'une véritable transition au sens de Boserup se mettra en place. Cela signifie que la croissance de la population entraînera des innovations et des investissements seront consentis pour améliorer la qualité des sols. Dans cette même perspective optimiste, des mesures de conservation sont prises pour limiter la destruction massive des savanes boisées pour l'extension de la culture du sorgho repiqué, notamment par le renforcement des mesures de protection des réserves forestières et par la

délimitation de quelques brousses encore relativement boisées en vue de la création de forêts communautaires. Dans ce cas que les populations auront besoin de moins d'espace pour la même production. On suppose dans ce scénario que :

- les superficies utilisées pour l'horticulture augmentent au rythme de 2,5% parce que des investissements plus importants sont accordés au développement de la culture maraîchère et la plantation des arbres fruitiers ;
- 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. Ceci s'explique par le fait qu'on assiste à une adoption progressive des techniques d'intensification de la culture de sorgho repiqué. Si les mesures d'intensification sont maintenues, ces superficies devraient se stabiliser et tendre à la baisse dans les phases ultérieures de l'évolution du système ;
- le rythme des défrichements baisse également à 2,5% par an sous l'influence des politiques forestières qui sont mises en place pour la protection et l'aménagement des ressources ligneuses. Les mesures prises et les moyens consentis par l'administration forestière à cet effet devraient amener les superficies à se stabiliser et augmenter si les investissements sont soutenus dans le temps.

Type d'utilisation	1999	Direction	Scénario 2		Scénario 3	
			Taux	2010	Taux	2010
Habitation	6 675	+1	0,48	7 035	0,48	7 035
Maraîcher/verger	4 963	+1	0,70	5 358	2,50	6 511
Culture pluviale	128 063	-1	3,10	96 158	3,10	112 674
Sol nu	31 294	-1	3,30	22 960	3,30	26 996
Sorgho repiqué	93 575	+1	5,00	160 045	2,50	122 779
Brousse	74 600	-1	4,00	47 613	2,50	63174
Montagne	17 981	*	0,00	17 981	0,00	17 981
<b>Total</b>	<b>357 150</b>			<b>357 150</b>		<b>357 150</b>

*Tableau 10.4 : Supposition sur les directions et taux de changement de chaque utilisation de l'espace pour les scénarios 2 et 3.*

## 10.4. Résultats de validation du modèle

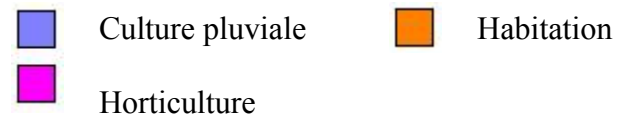
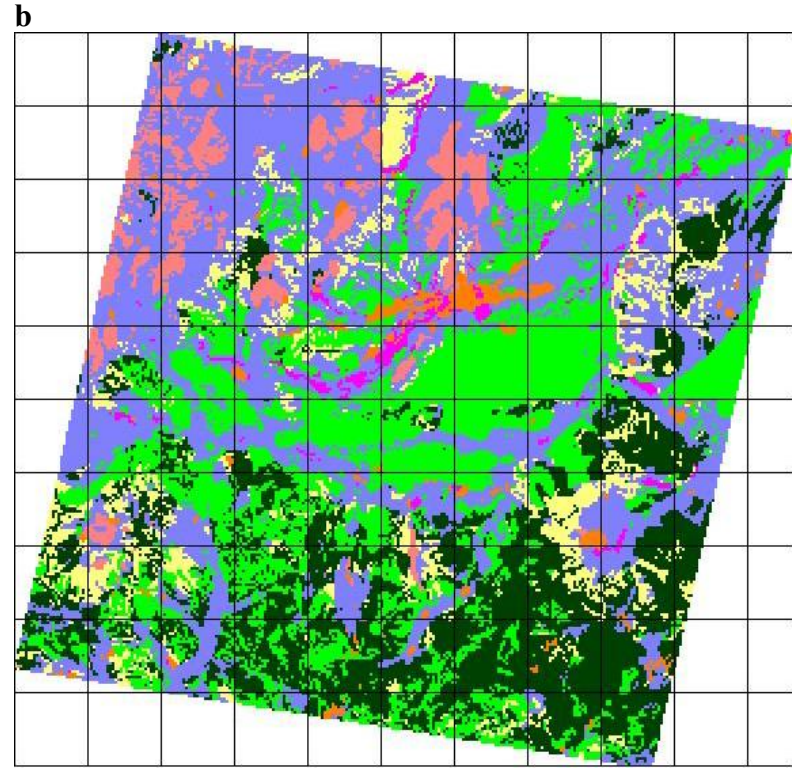
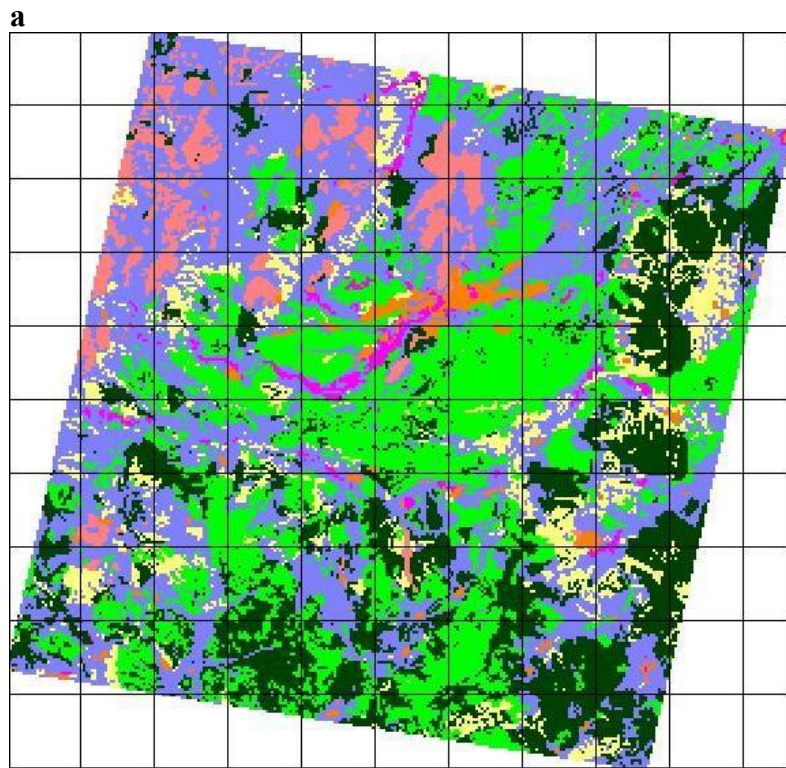
En comparant visuellement la carte de référence de 1999 avec la carte prédite en 1999 (figure 10.6), on peut voir les zones où le modèle n'arrive pas à bien prédire l'utilisation de l'espace. Dans l'ensemble, la plupart des grandes structures de l'utilisation de l'espace sont reproduites. Le modèle semble mieux prédire la localisation des zones d'habitation et de cultures maraîchères que les autres utilisations de l'espace. L'extension spatiale de la culture du sorgho repiqué est également assez bien localisée sur les sites visités sur le terrain. Les écarts observés entre les deux cartes concernent principalement les zones de

culture pluviale, de sols nus et dans une moindre mesure les zones de brousse. Ce résultat rejoindrait les résultats des performances relatives des modèles de régression des utilisations de l'espace calculés au chapitre précédent. L'analyse visuelle étant assez subjective, la validation nécessite d'utiliser des méthodes statistiques qui sont plus appropriées.

La validation constitue généralement le point faible de la plupart des modèles de changement d'utilisation de l'espace. Elle est le plus souvent ignorée et lorsqu'elle est faite, les méthodes utilisées ne sont pas appropriées et ne fournissent pas toujours toutes les informations requises pour apprécier les performances du modèle. Pourtant la validation est une étape importante du processus de modélisation qui permet de mieux apprendre sur les caractéristiques et le comportement du modèle (Costanza, 1989 ; Pontius et al., 2004). Elle peut également être utilisée pour mieux comprendre la réalité des processus modélisés. Compte tenu de la démarche exploratoire qui est suivie dans cette thèse, un accent a été mis sur la validation du modèle développé. Dans cette sous-section, nous présentons les performances du modèle mesurées avec plusieurs techniques différentes. Les résultats sont comparés avec 12 autres modèles de simulation similaires appliqués dans différentes régions dans le monde comprenant l'Europe, les Etats-Unis et l'Asie. Cet exercice de comparaison qui a été effectué dans le cadre d'une collaboration avec plusieurs laboratoires de recherche a permis de faire un état des lieux sur la validation des modèles dynamiques d'analyse des changements d'utilisation de l'espace (Pontius et al, 2007a). Des leçons et orientations pour les recherches dans ce domaine sont également dégagées de cette comparaison (Pontius et al., 2007b). La procédure de validation utilise trois cartes : les cartes d'utilisation de l'espace de 1987 et 1999 obtenues par analyse d'image de télédétection qui sont considérées comme des cartes de référence et la carte prédite en 1999. Les techniques de validation appliquées incluent : la comparaison deux à deux et la comparaison simultanée des trois cartes disponibles, et la comparaison au modèle NULL à plusieurs résolutions spatiales.

### **Validation 1 : Comparaison deux à deux des cartes de référence et de prédiction**

La méthode utilisée consiste à comparer toutes les deux cartes possibles parmi les trois cartes disponibles. En croisant ces cartes sous un SIG, on obtient un ensemble de statistiques qui fournissent une gamme variée d'informations utiles pour apprécier le comportement du modèle et mieux comprendre la réalité (Pontius et al., 2004). Dans ce cas par exemple, la proportion de pixels correctement prédits, les sources d'erreurs sont calculées et leurs répartitions spatiales sont analysées. La figure 10.7a montre la différence entre les cartes de référence de 1987 et de 1999 et fournit ainsi des informations sur les dynamiques du paysage. Les changements observés entre les deux dates sont évalués à 32% de la superficie de la zone d'étude (figure 10.9). Deux transitions particulières notamment de brousse à culture pluviale et de brousse à sorgho repiqué représentent environ la moitié de ces changements. Une analyse détaillée des différentes conversions est présentée au chapitre 8. Ces changements sont répartis de la façon suivante : La différence de quantité correspond à 18% et les différences dues à la localisation représentent 14% soit, 13% qui sont des différences dans un voisinage proche alors que les différences de localisation lointaine ne représentent que 1% de l'espace étudié. La différence de quantité qui correspond à la différence de nombre de pixels pour chaque catégorie et la différence de localisation correspond à la proportion des différences dues à la localisation. Si dans un voisinage bien défini (ici, 64 x 64), le problème de localisation peut être résolu en permutant la localisation des pixels mal prédits « occupé » avec les pixels correctement prédits « non occupé », alors la différence de localisation est jugée de proche. Sinon, elle est classée comme une différence de localisation lointaine.



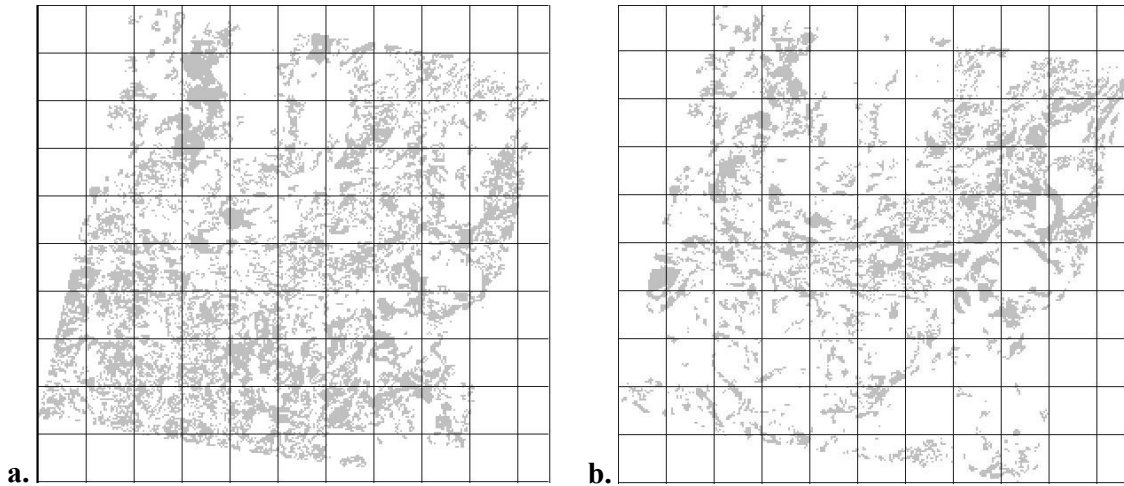
**Figure 10.6 : Cartes d'utilisation de l'espace en 1999, obtenues par analyse d'images de télédétection (a) et par projection (b).**

La figure 10.7b montre la différence entre la carte de référence en 1987 et la carte de prédiction en 1999. Elle renseigne ainsi sur le comportement du modèle. Cette différence qui correspond aux zones où le modèle prédit les changements a été évaluée à environ 23% de l'espace étudié (figure 10.9). Si le modèle pouvait prédire de façon parfaite les changements observés la figure 10.7a et 10.7b seraient identiques et la taille de cette différence serait égale à celle des changements observés (32%). Le modèle prédit donc un peu moins de changements que ce qui est observé. Nous soupçonnons qu'une partie du surplus des changements de l'observation serait liée aux erreurs de cartographie entre les deux dates qui sont interprétées comme des changements. La nature de ces différences confirme cette hypothèse car elles sont presque toutes des différences de localisation proche. Un modèle ne pourrait pas facilement reproduire ou expliquer ces erreurs.

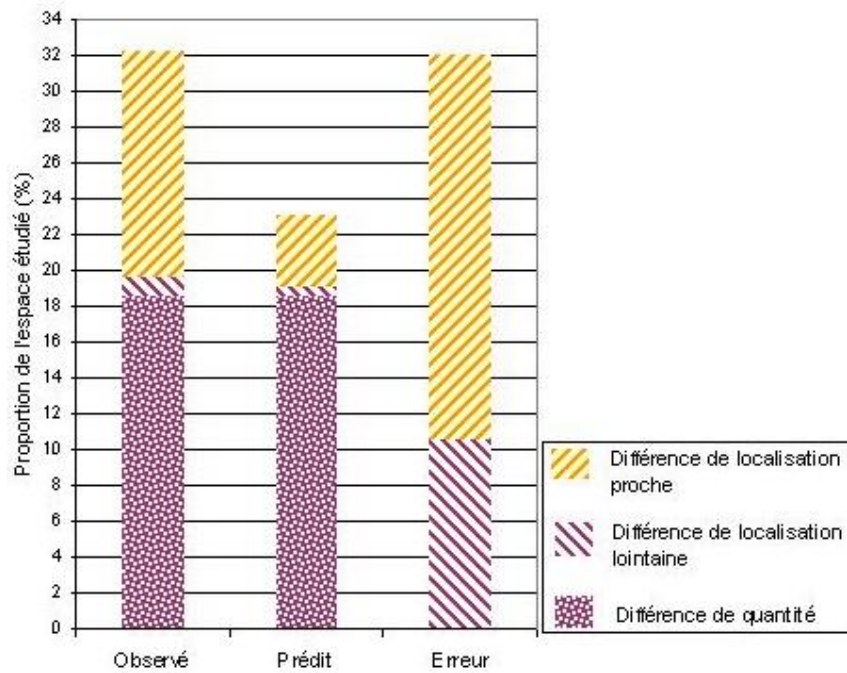
La figure 10.8 montre la différence entre la situation observée en 1999 et la prédiction en 1999 qui correspond à la précision de prédiction du modèle. On peut voir pour chaque utilisation de l'espace, les zones où les prédictions coïncident avec les observations. La précision de prédiction du modèle est une statistique qui est le plus souvent d'un intérêt primordial mais son interprétation nécessite la prise en compte des dynamiques du paysage et le comportement du modèle. On remarque par exemple dans la figure 10.9 que toutes les différences sont des erreurs dues à la localisation qui surviennent parce que le modèle prédit les changements d'utilisation de l'espace à des mauvaises localisations. En effet, de part la conception du modèle, il n'y a pas de différence de quantité dans la mesure où la quantité simulée pour chaque catégorie est configurée pour être égale à la valeur observée en 1999. De plus, la proportion d'erreur de prédiction totale est inférieure à la proportion de changements observés. Ce qui signifie que le modèle est plus précis que le modèle NULL qui prédit la persistance. La plupart des erreurs de prédiction sont des différences de localisation proche. Ce qui signifie que si on ignore les erreurs dues à des différences de localisation proche, le modèle deviendrait beaucoup plus précis.

## **Validation 2. Comparaison simultanée des cartes de référence et de prédiction**

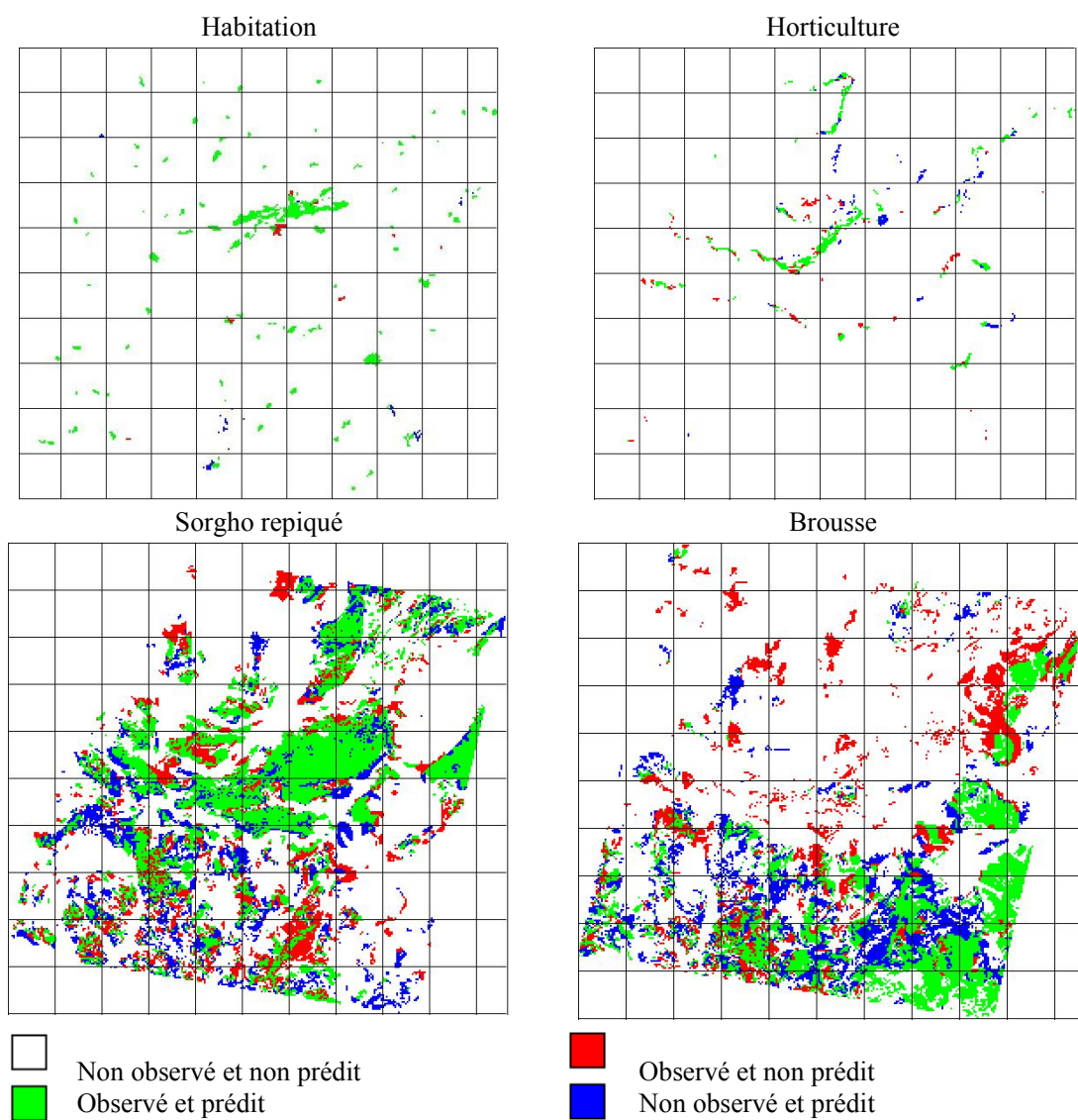
La comparaison simultanée des trois cartes disponibles fournit des informations complémentaires sur le comportement du modèle. La figure 10.10 montre le résultat de la superposition des trois cartes et permet ainsi d'apprécier visuellement la source des erreurs de prédiction. On distingue les cinq catégories de pixels suivantes : 1) les pixels violets montrent les zones où le changement est observé et le modèle prédit le changement c'est à dire que le modèle prédit correctement le changement; 2) les pixels rouges qui montrent où le changement est observé et le modèle prédit le changement mais vers la mauvaise catégorie ; 3) les pixels jaunes qui montrent les erreurs où le changement est observé et le modèle prédit la persistance ; 4) les pixels bleus montrent les erreurs où la persistance est observée et le modèle prédit le changement ; 5) les pixels gris montrent les zones où la persistance est observée et le modèle prédit la persistance c'est à dire les zones où le modèle prédit correctement la persistance.



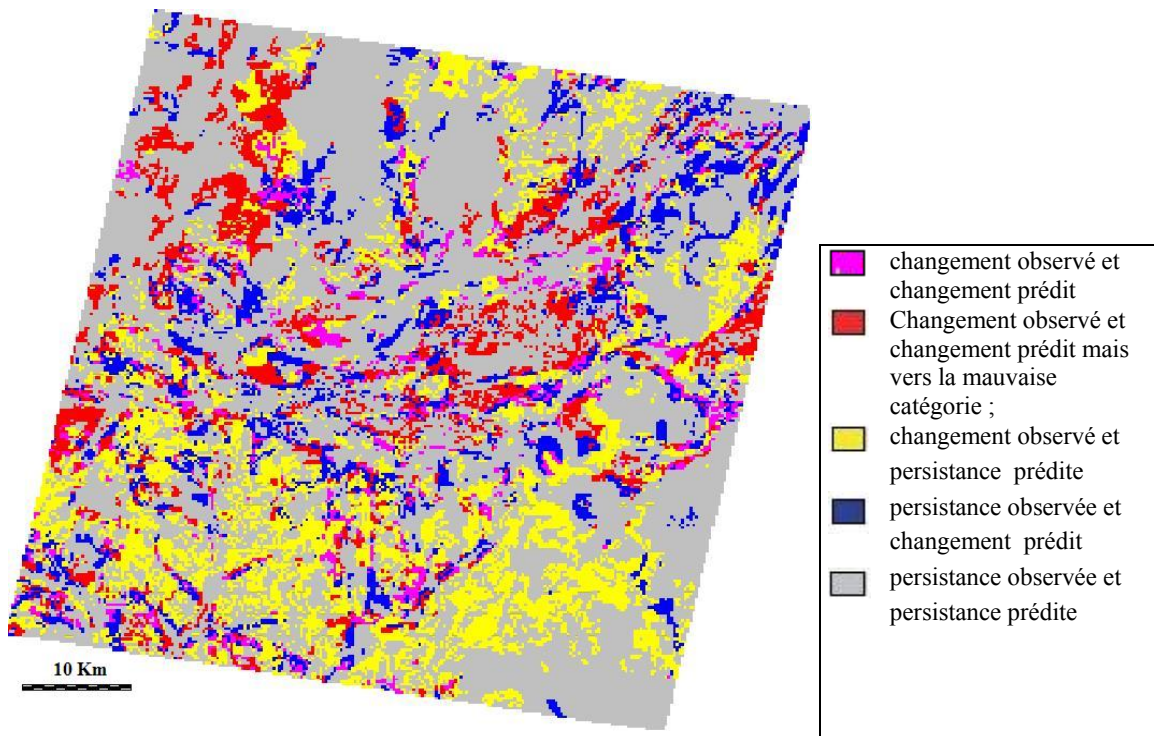
**Figure 10.7 :** Les cartes de changements observés entre 1987 et 1999 (a), et des changements prédits par le modèle (b).



**Figure 10.9 :** Quantification des changements observés, changements prédits et erreurs de prédiction.



**Figure 10.8 : Carte de localisation des prédictions correctes et des erreurs de prédiction pour les utilisations de l'espace.**



**Figure 10.10 : Superposition des cartes de références (1987, 1999) et de la carte de prédiction en 1999.**

On peut remarquer que le modèle NULL qui prédit la persistance, prédit correctement tous les pixels gris mais ne prédit pas correctement les pixels violets ou rouges. De plus le modèle NULL prédit correctement les bleus mais pas les jaunes. Par conséquent, le modèle est plus précis que le modèle NULL si on a plus de pixels violets et jaunes que de bleus, ce qui est vrai pour cette application.

Dans la barre de la figure 10.11, on peut visualiser la répartition des erreurs de prédictions présentées dans la carte de la figure 10.10. Dans la partie inférieure, les erreurs dues aux changements observés mais prédits comme persistants sont évaluées à 18% (A); au-dessus on a les erreurs dues à la persistance observée mais prédite comme changement qui sont évaluées à 10% (D). Les erreurs dues aux changements observés et prédits comme changements mais avec la mauvaise catégorie de destination représentent 4% (C). Dans la partie centrale de la barre, on a la proportion des pixels correctement prédits comme changement qui est représentée en couleur pleine (B). Elle correspond à l'intersection entre les changements prédits et les changements observés de laquelle il faut déduire la proportion de prédictions de changement vers la mauvaise catégorie(C). Si la prédiction était parfaite, on aurait une seule barre pleine. Sa longueur correspondrait à la proportion des changements observés qui serait la même que celle des changements prédits.



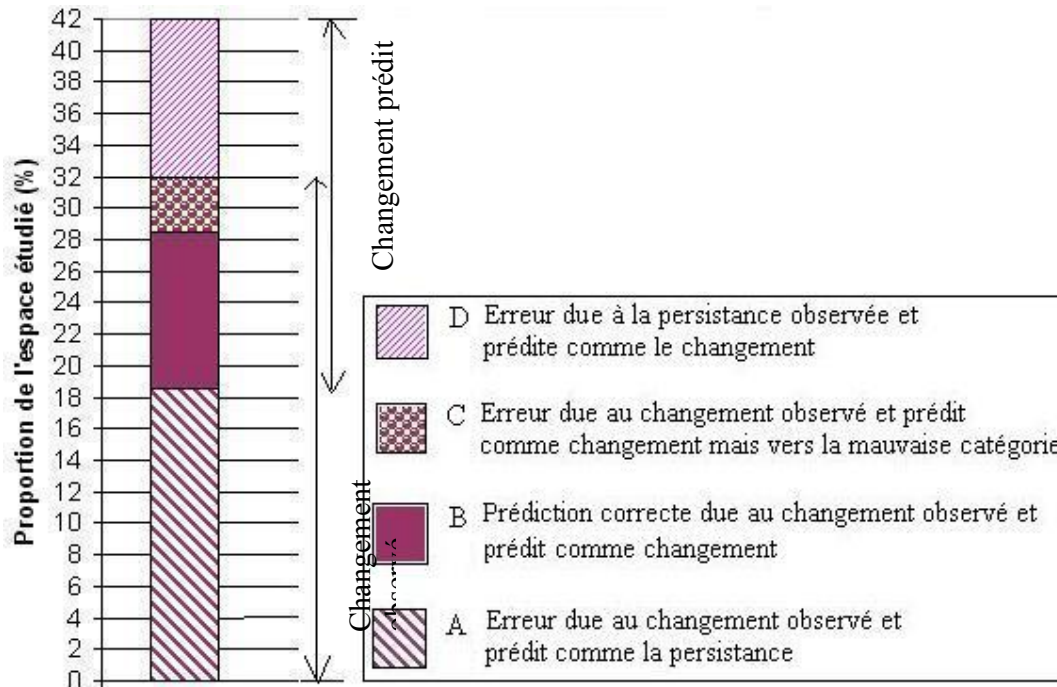


Figure 10.11 : Proportion des pixels correctement prédits et des sources d'erreur du modèle.

Soient les proportions A, B, C et D telles que définies plus haut et représentées dans la figure 10.11. Trois statistiques qui donnent une idée de la précision du modèle ont été calculées. Le niveau de mérite est évalué à 24%. Cette statistique, représente le ratio entre la proportion correctement prédite et la proportion totale des changements observés et prédits ( $B / (A+B+C+D)$ ). La précision du producteur est évaluée à 40% et la précision d'utilisateur est évaluée à 32%. La précision du producteur est la proportion de pixels que le modèle prédit correctement comme changement sachant que les cartes de référence indiquent un changement donné par la formule  $B / (A+B+C)$ . La précision d'utilisateur est la proportion de pixels que le modèle prédit correctement comme changement sachant que le modèle prédit le changement ( $B / (B+C+D)$ ). Ces résultats signifient en d'autres termes que le modèle prédit correctement 40% des changements qui ont effectivement eu lieu. De la même façon il prédit correctement 32% des pixels qu'il prédit comme changement. La comparaison effectuée avec d'autres modèles montre que seule l'application du Périnet sur les 13 applications considérées affiche un niveau de mérite supérieur à 50% (figure 10.12). La précision du producteur est supérieure à 50% pour 3 applications (Perinet, Honduras, et Costa Rica). La précision d'utilisateur est également supérieure à 50% pour 3 applications (Perinet, Haidian, et Costa Rica). Les applications où on a une proportion importante de changements observés ont tendance à afficher une précision de prédiction plus grande telle que mesurée par le niveau de mérite (figure 10.12). Toutes les 6 applications qui ont un niveau de mérite inférieur à 15% affichent une proportion de changement observé inférieure à 10%.

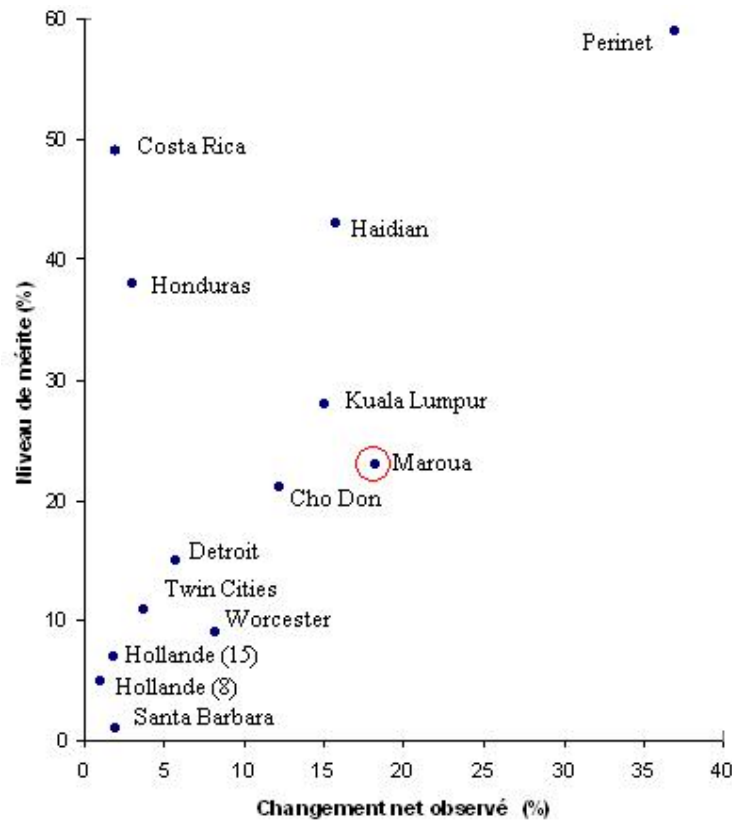
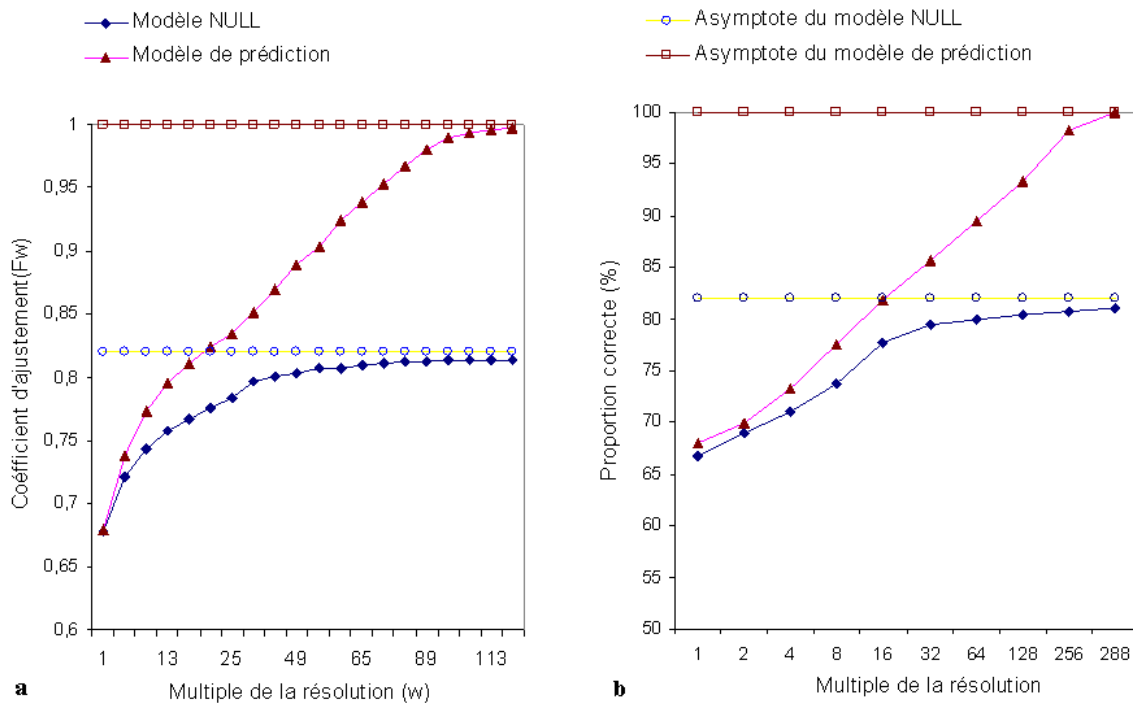


Figure 10.12 : Relation entre le niveau de mérite et la proportion de changements observés.

### Validation 3 : Validation par comparaison au modèle NULL à plusieurs résolutions

Le principe des méthodes de validation à plusieurs résolutions repose sur l'idée selon laquelle la mesure à une seule résolution n'est pas suffisante pour décrire des structures complexes. La technique de validation décrite dans Pontius et al. (2004), consiste à comparer les proportions de pixels correctement prédits par les modèles à plusieurs résolutions. Une procédure a été également proposée par Costanza (1989) pour quantifier les performances des modèles en comparant les mesures de similarité ( $F_w$ ) des structures entre deux cartes à plusieurs résolutions. La taille de la fenêtre de comparaison  $w$  est un multiple de la résolution initiale. Un coefficient de similarité global ( $F_l$ ) peut être calculé en utilisant plusieurs valeurs de  $F_w$ . Le principe de calcul et l'interprétation de ces coefficients ont été présentés au chapitre 3. Dans les deux cas, le modèle est comparé au modèle NULL correspondant qui prédit la persistance entre 1987 et 1999.

Le graphique de la figure 10.13a affiche les proportions de pixels correctement prédits à différentes résolutions. On peut voir que la proportion de pixels ayant une correspondance exacte croît avec la résolution et atteint un niveau où les seules erreurs qui persistent sont les erreurs de quantité. Ce niveau maximum est représenté par l'asymptote horizontale sur le graphique (82% pour le modèle NULL et 100% pour le modèle de prédiction). Cette convergence est compréhensible dans la mesure où en agrégeant les cellules, les différences de localisation proches sont résolues.



**Figure 10.13 : Comparaison des performances du modèle de prédiction avec le modèle nul à plusieurs résolutions. a) proportion de pixels correctement prédits ; b) coefficients de similarité des structures entre la carte observée et prédite.**

La figure 10.13b montre les coefficients de similarité des structures entre la carte de 1987 (modèle NULL) et la carte observée de 1999 d'une part et d'autre part entre la carte prédite de 1999 (modèle de prédiction) et la carte observée de 1999. Le coefficient de similarité global entre la carte prédite et la carte observée de 1999 est évalué à  $F_t = 0,749$  contre  $F_t = 0,725$  pour la similarité entre la carte de 1987 et la carte observée de 1999. Ce qui signifie que le modèle de prédiction est plus performant que le modèle NULL. On observe que la courbe des coefficients d'ajustement du résultat du modèle de prédiction augmente d'abord très rapidement avant de se stabiliser autour de la valeur 1, indiquant que les structures correspondent mieux, même si le coefficient d'ajustement initial pour la fenêtre de taille 1 est relativement faible (0,67). Par contre, la courbe des coefficients d'ajustement du modèle NULL commence à la même valeur mais se stabilise très vite autour de la valeur 0,82. Dans ce cas, il faut remarquer qu'il n'est pas possible d'obtenir un coefficient beaucoup plus élevé quelle que soit la taille de la fenêtre dans la mesure où la quantité de chaque type d'utilisation de l'espace change au cours du temps alors que dans le cas du modèle de prédiction, le coefficient peut atteindre la valeur 1 même avec une structure très différente. L'exercice de comparaison a montré qu'à fine résolution, il peut arriver que le modèle NULL soit plus précis que le modèle de prédiction. Ceci dépend le plus souvent des quantités de changements observées. 6 des 13 modèles comparés qui affichent moins de 10% des changements observés ont plus d'erreurs que le modèle NULL. Le modèle développé pour la région de Maroua est parmi les 7 applications qui sont plus précises que le modèle NULL à fine résolution.

## 10.5. Résultats de la simulation des changements d'utilisation de l'espace

Cette section décrit les dynamiques spatiales pour chaque scénario et discute les implications possibles pour le développement durable de la région. Les performances et les limites du modèle développé sont également discutées.

### 10.5.1. Dynamiques spatiales d'utilisation de l'espace correspondant à chaque scénario

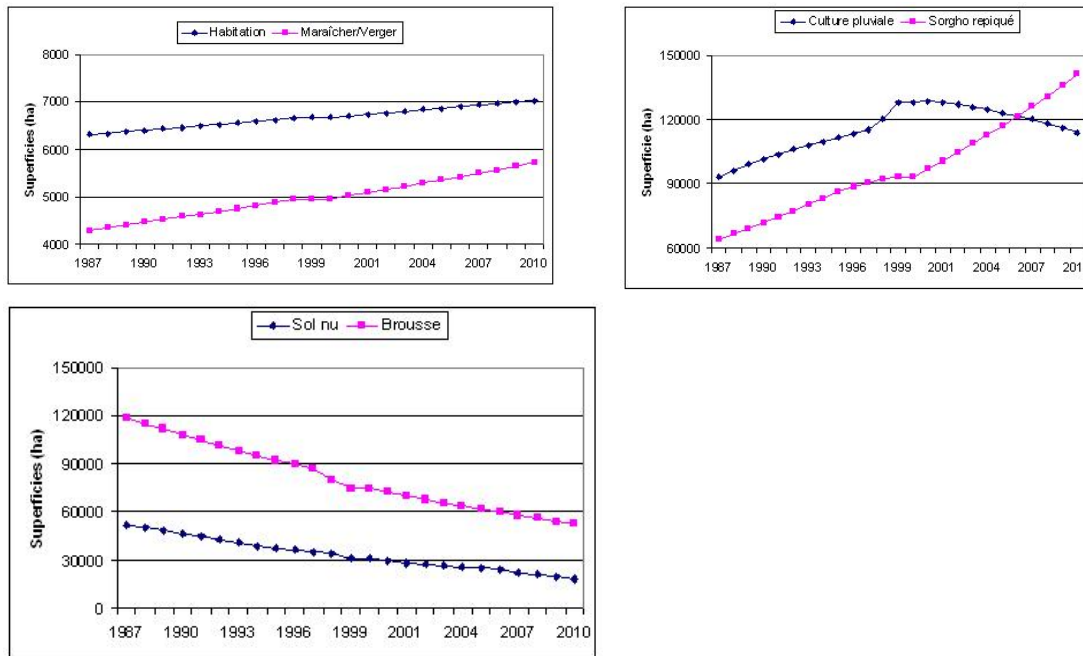
#### *Scénario 1 considérant le maintien des tendances observées dans le passé*

Dans le scénario 1, les superficies de chaque utilisation évoluent au même rythme qu'au cours de la période 1987-1999 comme le montre la figure 10.14. Les zones d'habitation et d'horticulture augmentent mais les superficies restent relativement faibles. A la fin de la simulation la différence avec la situation de 1999 n'est pas très perceptible pour ces deux utilisations de l'espace à l'échelle régionale. Par contre, les zones de culture pluviale et de sorgho repiqué augmentent significativement. Les zones de culture pluviales en particulier commencent à diminuer après la quatrième année au profit de la culture de sorgho de contre saison ou de la culture maraîchère. L'extension de la culture maraîchère se fait en général sur les terres alluviales qui peuvent également être utilisées pour les cultures pluviales. Les extensions récentes de la culture du sorgho de contre saison se font principalement entre la zone de Laf et de Mindif au détriment des savanes boisées notamment dans la réserve de Laf. Ces zones d'extension correspondent à des vertisols qui sont très aptes à la culture du sorgho repiqué. A la fin de la simulation, les meilleures terres (classées de très bonne à assez bonne aptitude) sont presque toutes occupées par le sorgho repiqué et on commence à observer des extensions sur les terres alluviales. Contrairement à quelques extensions de la culture observées dans la zone des piémonts notamment aux environs de Méri dans le nord ouest de la zone d'étude, la simulation montre que les extensions sont difficiles sur les sites en micro-topographie (faibles pentes).

#### *Scénario 2 considérant l'évolution suivant une trajectoire Malthusienne*

Dans le scénario 2 où la demande en superficie pour la culture du sorgho de contre saison est plus importante que la disponibilité des meilleures terres, la simulation permet de localiser les zones où on peut s'attendre à des changements (compétition). On observe quelques extensions dans la zone des piémonts notamment autour de Méri et au sud du terroir de Mowo. Toutefois, cette dynamique reste limitée du fait des contraintes du milieu et des investissements qu'il faut pour les aménagements. La demande en espace supplémentaire est satisfaite de plusieurs façons : d'une part, on observe des défrichements plus importants de la savane au sud de Maroua. D'autre part, on note une compétition plus importante sur les espaces où les sols de type « intermédiaire » se prêtent également aux cultures pluviales. C'est le cas également sur les vertisols qui se trouvent le long des cours d'eau. Dans la plaine du Diamaré, notamment autour du terroir de Balaza, des extensions de faibles superficies se font sur les zones de sols nus dont les terres sont pour la plupart dégradées (hardé). Ce sont des terres qui ont été par le passé utilisées pour la culture du sorgho de contre saison mais qui sont parvenues à un stade de dégradation avancé. Leur mise en valeur nécessite des aménagements tels que le binage et la mise en place ou l'entretien des diguettes. 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. 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. De plus, les espèces ligneuses présentes dans ces zones ne seraient pas pour la plupart

très appréciées comme bois pour le feu. Elles ne contribuent pas donc significativement à l’approvisionnement actuel de la ville de Maroua en bois de feu, mais constituent des réserves importantes de bois pour les populations rurales environnantes et des zones de pâturage pour le bétail. Comme le montre la figure 10.15a, le rythme d’accroissement des superficies utilisées pour l’horticulture est un peu plus faible que dans le scénario 1. 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.



**Figure 10.14 : Evolution des superficies des 6 types d’utilisation de l’espace pour le scénario 1. La partie de la courbe entre 1987 et 1999 représente la tendance observée et la partie entre 1999 et 2010 représente la tendance prédite.**

### *Scénario 3 considérant l’évolution suivant une trajectoire Boserupienne*

Dans le scénario 3, la demande en quantité de graine est toujours aussi importante que dans les scénarios 1 et 2 mais la réponse en terme d’extension des superficies cultivées est plus faible à cause des investissements exigés pour l’amélioration de la qualité des terres et la conservation des ressources ligneuses. Les superficies de brousse baissent à un rythme très faible et devraient se stabiliser et éventuellement augmenter si la tendance est maintenue (figure 10.15e). Les cultures maraîchères et la plantation des arbres fruitiers prennent de l’importance et les augmentations de superficies sont observées 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. Malgré les besoins supplémentaires, on constate que la zone entre Laf et Mindif au sud de Marou n’est pas sollicitée pour l’extension de l’horticulture. Ceci se confirme par la réalité sur le terrain et s’explique par le fait que les ressources en eau souterraine dans cette localité sont réduites. On constate par contre que les zones de savanes boisées restantes dans cette zone sont relativement bien conservées. Aucune restriction représentant une quelconque politique de conservation n’a été incluse dans le 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.

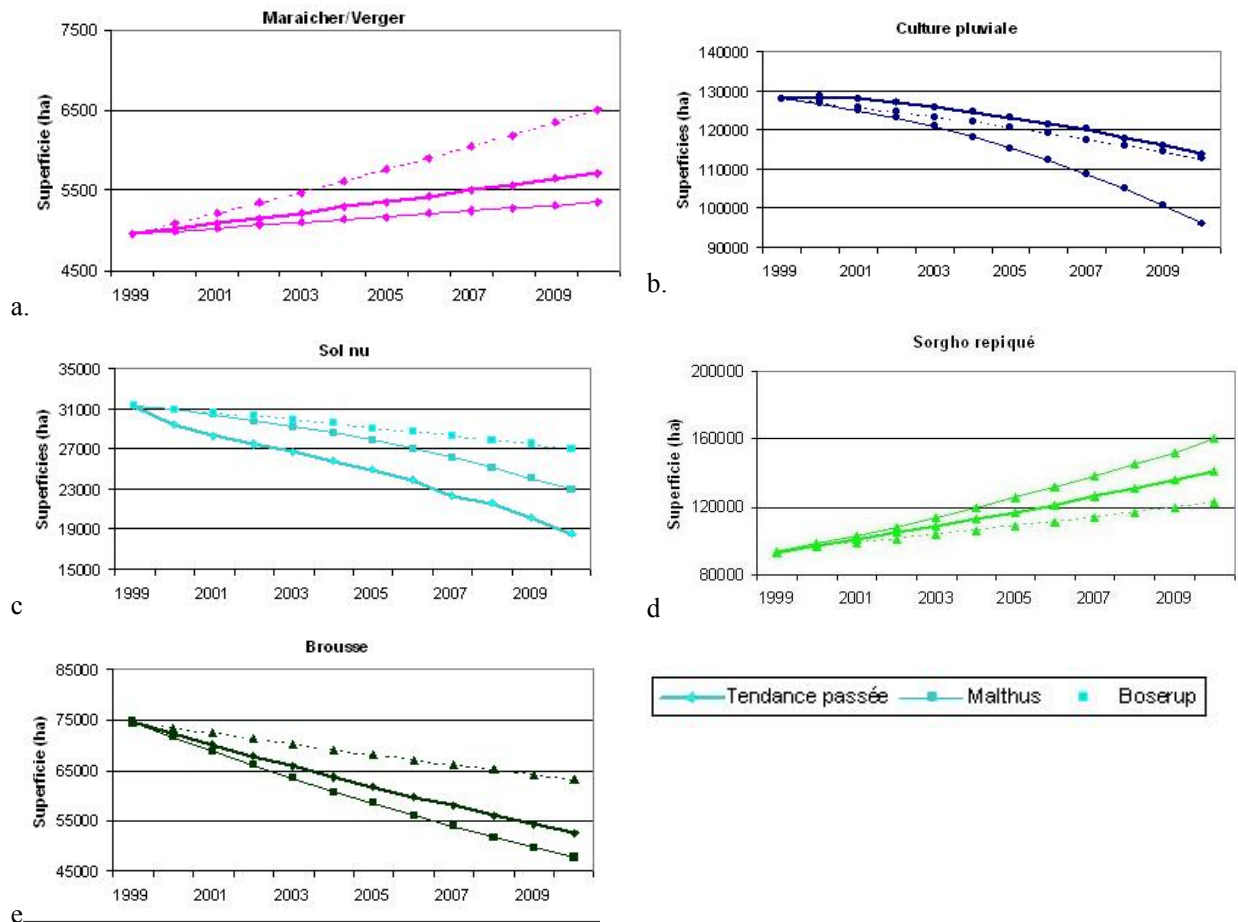


Figure 10.15 : Evolution des superficies des différents types d'utilisation de l'espace pour les trois scénarios.

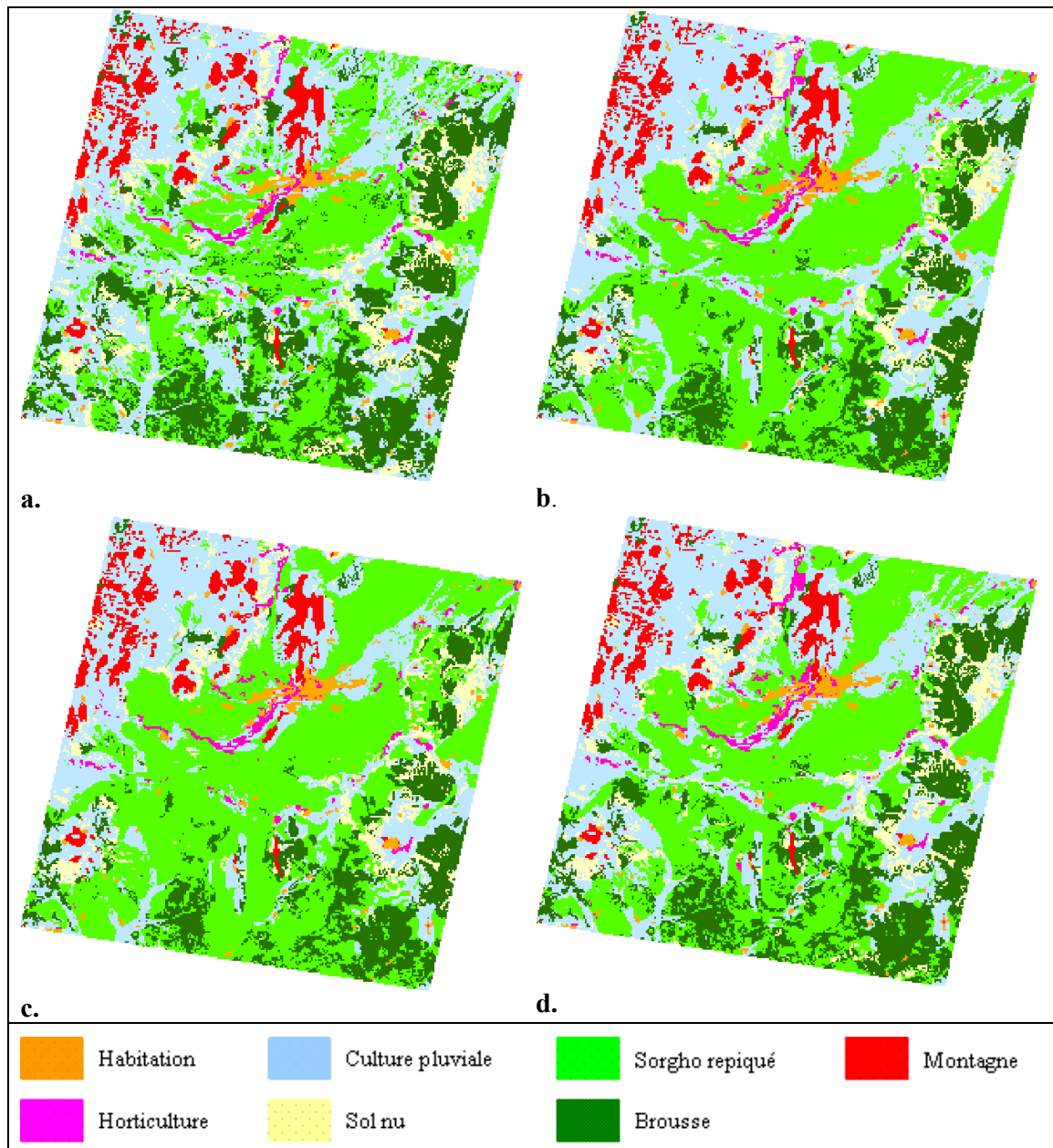


Figure 10.16: Cartes prédites de l'utilisation de l'espace en 2010. a) Cartes d'utilisation de l'espace en 1999 obtenue par analyse d'image, b) carte prédite pour le scénario 1 considérant une continuation des tendances passées, c) pour le scénario 2 considérant une trajectoire malthusienne et d) pour le scénario 3 considérant une trajectoire Boserupienne.

### **10.5.2. Synthèse des résultats de la simulation et implications pour l'utilisation durable de l'espace**

La simulation fournit des informations sur les dynamiques spatiales des différentes formes d'utilisation de l'espace et les processus sous jacents. Deux principaux types de changements ont été mis en exergue sur la période de simulation. Dans une première phase, les défrichements importants des brousses pour l'expansion agricole qui ont été observés dans le passé (1987-1999) continuent avant de se stabiliser ou de s'accroître en fonction de la trajectoire suivie (Boserup ou Malthus). En particulier l'extension récente de la culture du sorgho repiqué présente d'importantes interactions avec les autres utilisations de l'espace. Dans une deuxième phase qui est en cours, les résultats de simulation affichent des signes d'épuisement du système extensif caractérisé par les défrichements importants, les jachères, la mise en valeur des terres marginales etc. Ces dynamiques sont impulsées par les besoins alimentaires plus importants de la population. Les résultats des simulations montrent les zones où les impacts peuvent être escomptés. On remarque que la localisation et le type de changements observés dans l'espace dépendent de la trajectoire suivie par le système agraire. Ces trajectoires dépendent à leur tour des investissements que les populations peuvent consentir pour le développement des cultures maraîchères et la plantation des arbres fruitiers, pour l'amélioration de la qualité des terres, pour la conservation des ressources ligneuses et des aires protégées. Dans les deux premiers scénarios on remarque que les changements liés à la culture du sorgho de contre saison conduisent à des situations indésirables avec de nombreuses conséquences socio-économiques et environnementales. L'importance des défrichements observés pour l'extension agricole entraîne une dégradation profonde des ressources ligneuses et de la productivité des sols d'autant plus que très peu d'investissements sont consentis pour la conservation ou l'amélioration de la qualité de ces ressources. Ces conditions ne sont pas favorables pour garantir la sécurité alimentaire étant donné que les productions des diverses céréales et du coton continuent à baisser malgré l'extension des superficies cultivées (les rendements sont faibles). L'extension des espaces agricoles a pour corollaire le rétrécissement des espaces de pâturage et des zones d'exploitation du bois. Avec la croissance démographique, ces processus s'amplifient et entraînent des compétitions pour l'accès à la terre et les migrations permanentes des populations qui vont induire une précarité foncière plus marquée. Un enjeu important est d'analyser et de prendre en compte les mécanismes fonciers qui accompagnent ces différentes dynamiques d'utilisation de l'espace. Les travaux ultérieurs pourraient étudier l'influence du mode de tenure foncière sur les investissements pour l'amélioration des ressources et les conditions de passage à un système plus intensif et durable.

L'analyse préalable des systèmes agraires à base de sorgho repiqué a montré que les extensions du sorgho repiqué et du coton se sont opérées parallèlement. Le coton ayant toujours eu un rôle très important sur le plan économique à travers les revenus qu'il procure aux paysans. Le sorgho repiqué qui était initialement une culture vivrière a commencé à entrer dans le circuit de commercialisation régional avec l'implication des grands commerçants urbains qui favorisent la spéculation et encouragent la production. La compétition pour l'espace entre la culture du sorgho de contre saison et les autres cultures vivrières est importante dans les trois scénarios. Ce qui exigera d'adopter des pratiques culturelles plus intensives et des politiques de gestion de l'espace appropriée. Contrairement à ce qu'on peut observer dans plusieurs contextes africains, le passage de cette culture du statut de vivrière à « vivrière-rente » se fait sans impacts importants sur les capacités de production pour l'autoconsommation (Pieri, 1989 ; Milleville et Serpantié, 1994). Au contraire c'est un bon complément en période de soudure et de famine. De plus, on a observé une très bonne intégration entre



cette forme d'utilisation agricole de l'espace avec le système d'élevage. Le contexte actuel caractérisé par une baisse des rendements de la culture cotonnière, la dégradation des sols et les difficultés de la filière cotonnière dans l'ensemble, porte à croire qu'on va assister dans un avenir proche à une perte d'intérêt croissante pour la culture cotonnière. Les paysans auront dans ce cas une forte tendance à s'orienter vers des utilisations de l'espace qui procurent des revenus importants. Le sorgho repiqué se présente comme un substitut immédiat pour compléter les revenus des paysans. Le développement des cultures maraîchères impulsé par la forte demande urbaine se présente également comme une source de revenus potentielle. Les évolutions à venir vont davantage dépendre de l'organisation des marchés en faveur de ces deux filières agricoles émergentes et des systèmes de gestion de l'espace qui vont se mettre en place (conservation, aménagement et sécurisation foncière).

Dans les trois scénarios, l'installation des cultures maraîchères et les défrichements des brousses évoluent dans l'espace suivant un gradient déterminé par l'accessibilité aux centres urbains de la région. Ce qui traduit l'importance du poids des villes dans les dynamiques observées. Toutefois, la résistance au changement de certaines zones boisées situées à une distance relativement faible de la ville révèle l'influence d'autres facteurs déterminants comme la qualité des sols et la diversité des ressources ligneuses. La stratégie pour l'approvisionnement en bois de feu de la ville devrait s'orienter vers les espaces identifiés afin de mettre en place des actions de gestion intégrée avec l'utilisation pastorale existante. Ces actions sont envisageables dans le cadre de la création des forêts communautaires qui est encouragé par l'administration dans ces régions de savane sèche. Une concertation est nécessaire entre les acteurs concernés pour identifier les espaces et négocier les conditions de mise en œuvre de telles actions. Les résultats de simulation peuvent constituer un support utilisable dans cette perspective. D'autres scénarios différents peuvent être testés en collaboration avec les responsables des différentes administrations impliquées et avec les représentants des populations pour explorer les alternatives de développement futur. Le scénario 3 par exemple montre les impacts d'une politique de gestion intégrée de l'utilisation de l'espace qui devra impliquer les différents acteurs notamment les paysans ruraux ou urbains, les services des ministères de l'agriculture, de l'élevage et de l'environnement et des forêts. Les résultats des simulations peuvent servir de base au zonage de l'espace et à l'identification concertée des zones prioritaires d'intervention de chaque acteur.

### **10.5.3. Performances et limitations du modèle de prédiction développé**

Les résultats de simulations et les interprétations en relation avec la réalité de terrain montrent que le modèle développé restitue assez bien la structure et les fonctions de l'utilisation de l'espace dans la région. Le comportement du modèle lors de la calibration montre qu'il est capable de capturer des propriétés importantes des paysages et de l'utilisation de l'espace. On a vu par exemple des espaces très proches de la ville qui restent boisés malgré le fait que les défrichements s'effectuent suivant un gradient décroissant en partant de la ville. Ceci montre que les interactions complexes entre type d'utilisation de l'espace et des changements des probabilités relatives peuvent conduire à des changements non linéaires dans la distribution de l'utilisation de l'espace. L'étape de validation a montré que les performances du modèle dépendent du processus de préparation des données et de leur format de représentation. A titre d'exemple, une évaluation de la précision des cartes utilisées par le modèle a été effectuée et les résultats indiquent que le processus de cartographie tend à confondre les cultures pluviales et les sols nus. Certaines différences entre les cartes de 1987 et de 1999 sont liées aux erreurs de cartographie et ne sont pas des changements. Certaines transitions entre ces deux classes sont donc apparentes et non réelles. Lorsque l'on procède à une agrégation des sols nus et des cultures pluviales, on s'aperçoit que les changements observés entre les deux dates passent de 32% à 27% de la

zone d'étude, influençant ainsi considérablement la précision du modèle. Ceci s'explique par le fait que les gains nets de la classe culture pluviale sont fusionnés avec les pertes de la classe sol nu et donnent une nouvelle catégorie où les erreurs dues aux confusions entre les deux classes sont éliminées (Pontius et Malizia, 2004). Toutefois, après la fusion de ces deux classes, il n'est plus possible d'étudier le processus de récupération des sols dégradés pour l'agriculture, qui est pourtant un phénomène observé sur le terrain.

La matrice de transition du modèle prend en compte les conversions simples entre les types d'utilisation de l'espace et limite la validité de la période de simulation. Les simulations au-delà de 20 ans ne maintiennent pas la stabilité de la structure du système (relations entre facteurs déterminants et utilisation de l'espace). La durée de la période de simulation peut être allongée et la qualité des prédictions améliorée en intégrant les séquences de conversion de l'utilisation de l'espace dans la procédure d'allocation des changements. Un exemple de séquence de conversion qu'il serait intéressant d'intégrer dans le modèle et apprécier son influence sur la stabilité du système concerne le passage d'un espace cultivé à une brousse qui correspond en fait à une mise en jachère. En effet, une portion cultivée ne se convertit pas spontanément en brousse d'une année à l'autre. Elle passe en réalité par un état intermédiaire qui est celui de sol nu. Dans le cas du sorgho repiqué, la portion pourra rester cultivée plusieurs années successives (10 à 15 ans). En cas d'abandon, la brousse se reconstitue un peu plus rapidement (au moins 3 ans). Par contre, la fréquence de rotation avec les cultures pluviales est plus grande (maximum après 5 ans de cultures) et la régénération de la végétation ligneuse est plus longue en cas d'abandon (5 à 10 ans).

A fine résolution, le modèle affiche plus d'erreurs de prédiction que de changements prédits correctement. Ce résultat est obtenu pour 12 sur les 13 modèles comparés. Toutefois, la précision augmente lorsque la résolution augmente. La quantité des changements simulés aurait une influence sur les performances du modèle. Parmi les 13 modèles comparés, le modèle développé pour la région de Maroua est parmi les 7 qui sont plus performants que le modèle NULL correspondant. On peut remarquer que les 6 autres qui affichent plus d'erreur que le modèle NULL sont tous ceux où on a moins de 10% des changements observés entre les deux dates. Les modèles qui utilisent les informations d'une date antérieure pour simuler les changements entre une date de départ et de fin (plus de la moitié) ont tendance à être plus précis.

Le modèle développé ne peut capturer certains processus à cause de l'approche de modélisation choisie qui est de type inductif. Cette limite se rapporte à la manière dont les mécanismes de changement d'utilisation de l'espace sont pris en compte dans le modèle. En effet, les influences de causalité entre les facteurs déterminants (ville, marché, système foncier) et l'utilisation de l'espace ou entre l'utilisation de l'espace et les acteurs à différents niveaux (urbains, administration) ne sont pas pris en compte explicitement dans le modèle. Elles sont certes traduites implicitement dans les modèles de régression ou la formulation des scénarios. Dans le premier cas, on a remarqué qu'une corrélation n'entraîne pas nécessairement une causalité et lorsque c'est le cas, le modèle de régression n'est pas suffisant pour traduire les mécanismes qui gouvernent les processus étudiés. Le modèle s'appuie essentiellement sur les observations passées et ne pourrait pas capturer de nouveaux phénomènes comme l'introduction d'une nouvelle culture ou encore l'implication récente des acteurs urbains dans les filières d'approvisionnement en bois ou de production de sorgho de contre saison.

Le type de modèle développé est plus dépendant des données que des processus. L'indisponibilité de données spatiales explicites représentant les processus étudiés ou le mode de représentation de ces données constitue également une limite. Les variables d'utilisation de l'espace utilisées sont plus des occupations de l'espace que des formes d'utilisation qui traduisent des pratiques comme par exemple le niveau d'intensification ou des types d'aménagement de l'espace. Le modèle développé est adapté pour analyser les phases extensives du système observé dans le passé. La compréhension des dynamiques d'utilisation de l'espace qui vont se mettre en place va nécessiter d'utiliser des variables qui représentent au mieux les phénomènes d'intensification et les facteurs déterminants. Ce travail va également exiger de mettre en place de grandes bases de données spatiales explicites. Une solution plus radicale aux contraintes posées par l'approche de modélisation choisie consiste à enrichir le modèle développé par des aspects de raisonnement déductif. L'avantage d'une approche déductive c'est qu'elle conduit aux meilleures chaînes de causalité et d'explication que les approches inductives. Koen et al. 2006 discutent des principes et mérites de chacune de ces approches dans les études de changement d'utilisation de l'espace en comparant des exemples de modèles de chaque approche. Les auteurs donnent un exemple de modèle de type déductif construit en s'appuyant sur les concepts de la méthodologie AiC (Action-in-Context), un cadre conçu pour l'explication des actions humaines dans le domaine des sciences environnementales (De Groot, 1992). L'idée de ce cadre conceptuel est qu'il part de l'action à expliquer et identifie les acteurs individuels ou collectifs qui initient cette action. On identifie également les options disponibles pour ces acteurs et les motivations liées à ces options. On identifie ensuite les acteurs et facteurs qui influencent ces options et motivations. Ce cadre conceptuel offre plusieurs avantages pour la démarche suivie dans cette thèse, qui vise à combiner et intégrer différentes approches de modélisation. La première c'est qu'elle permet de remettre les différentes actions dans leur contexte sans orientation disciplinaire. En effet, ce cadre peut être utilisé pour représenter les processus de changement d'utilisation de l'espace étudiés sous forme de sous-modèles interconnectés avec les relations entre actions, acteurs et facteurs qui définissent les liens de causalités. Chacun des sous-modèles peut ensuite être représenté et mis en oeuvre en utilisant l'approche la plus adaptée. On pourrait par exemple avoir d'une part un modèle multi-agents qui représente les actions et les décisions d'acteurs individuels ou collectifs et d'autre part un modèle d'optimisation qui explique le choix d'un ensemble d'acteurs.

## **10.6. Conclusion et perspectives**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une application du SIE SMALL Savannah qui porte sur la modélisation des changements d'utilisation de l'espace dans la région autour de la ville de Maroua. La construction de ce modèle de simulation s'appuie sur la connaissance des processus de changements qui ont été analysés dans les applications présentées dans les chapitres précédents (chapitres 5, 7, 8 et 9). Les différentes étapes de la méthodologie utilisée (représentation des processus, calibration, validation et analyse des scénarios) montrent que la modélisation est un outil approprié pour capturer la complexité des systèmes et mieux comprendre les processus qui les gouvernent. La modélisation peut également être utilisée pour mieux identifier et représenter la réalité. Le modèle développé simule les changements de 6 catégories d'utilisation de l'espace entre 1999 et 2010. Les simulations effectuées ont permis d'explorer les conditions et les impacts de l'évolution du système agraire suivant trois trajectoires déterminées par les réponses des populations aux mutations observées dans la zone d'étude. Deux principaux processus ont été mis en exergue : 1) le développement d'un système extensif caractérisé par les défrichements importants pour l'extension agricole, 2) l'émergence des cultures maraîchères et des arbres fruitiers qui nécessitent plus d'investissement. Dans l'hypothèse de

la prédominance d'une trajectoire Malthusienne caractérisée par la pauvreté des populations et la dégradation des ressources naturelles, les résultats des simulations montrent les zones les plus affectées par les défrichements. Réciproquement, les résultats montrent les zones prioritaires pour l'intensification du système si on suppose que le système évolue suivant une trajectoire Boserupienne caractérisée par des investissements importants sur la qualité des terres et des institutions. Les zones où on peut s'attendre à l'extension des cultures maraîchères et la plantation d'arbres fruitiers sont localisées. Les cartes produites montrent également les zones boisées qui peuvent encore faire l'objet d'actions de conservation, de gestion ou d'exploitation plus durables. Le modèle ainsi construit constitue un support d'aide à la planification de l'utilisation de l'espace. Les résultats obtenus à chaque étape de la construction et de l'exécution du modèle ont mis en exergue certaines limites qui ouvrent des perspectives d'amélioration ou d'adaptation. Ces limites peuvent être classées sous les thèmes suivants : le changement d'échelle, la collecte et la représentation des données, l'approche de modélisation.

### **Le changement d'échelle**

L'étape de validation du modèle a montré que les performances du modèle changent avec la résolution spatiale. De plus une plage de résolution a été identifiée comme pertinente pour l'analyse lors de la préparation des données. Une première façon d'améliorer les performances du modèle consisterait à explorer les effets du changement de résolution sur les performances du modèle. L'analyse spatiale effectuée au chapitre 8 a montré que chacune des trois zones agroécologiques de la région présentait des spécificités en terme de dynamiques et de stratégies. Or les relations entre l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants utilisés dans le modèle s'appliquent à l'ensemble de la région. Ce qui suppose une homogénéité de la région. Cette supposition peut empêcher de capturer certaines dynamiques locales. L'introduction des régressions spécifiques à chaque zone dans la procédure d'allocation des changements permettrait de prendre en compte cette diversité des situations et améliorer ainsi les performances du modèle. L'approche de modélisation utilisée fait que les résultats thématiques obtenus ne concernent que la région autour de Maroua et ne saurait être appliqués à l'ensemble de la zone des savanes du Nord Cameroun. Toutefois la méthodologie suivie est en tout point applicable à des espaces plus vastes. La principale contrainte reste le problème de manque de données spatiales explicites sur tous les facteurs qui sont importants dans l'analyse des processus de changement d'utilisation de l'espace.

### **Collecte et représentation des données**

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. Pour les données d'utilisation de l'espace obtenues par télédétection, la méthode de cartographie doit minimiser les erreurs de confusion des classes d'occupation du sol. De façon générale, les données d'utilisation de l'espace doivent représenter au mieux les processus étudiés. Les données qui ont été utilisées ont permis de représenter et de simuler le phénomène d'extension agricole dans la région d'étude. Toutefois, ces données ne seraient pas suffisantes pour analyser le processus d'intensification qui fait référence aux concepts comme par exemple la force de travail ou de production à l'unité de surface. Il en est de même pour les variables explicatives. L'indisponibilité où la difficulté de disposer des données spatiales explicites pour certains facteurs de type socio-économiques ou liés aux motivations, logiques ou stratégies des acteurs constitue une limite du modèle développé. Un effort important est nécessaire pour développer des bases de données spatiales explicites intégrant les données socio-démographiques et culturelles plus pertinentes.

### **Approche de modélisation des processus de changement d'utilisation de l'espace**

La difficulté de prendre en compte les aspects socio-démographiques et culturelles dans le modèle n'est pas seulement liée à la disponibilité des données mais constitue une limite inhérente à l'approche de modélisation. 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 ne peuvent être facilement représentés sous forme spatiales ou les effets de leur interaction ne sont pas toujours visibles dans l'espace. On peut citer l'exemple de l'ethnicité qui n'a pas été pris en compte dans le modèle développé. Une première solution à cette difficulté est de développer des bases de données spatiales explicite en intégrant de plus en plus des données de type socioéconomiques et culturelles. Une deuxième solution plus radicale aux contraintes posées par l'approche de modélisation choisie consiste à coupler le modèle développé avec les modèles utilisant des approches déductives qui présentent l'avantage de conduire aux meilleures chaînes de causalité et d'explication que les approches inductives. Les approches de types multi-agents couplées aux Systèmes d'Information Géographique semblent appropriées pour répondre à certaines de ces préoccupations liées à la complexité du système agricole. On a observé très récemment un intérêt croissant pour l'application de la modélisation multi-agents à l'étude des changements d'utilisation de l'espace, une tendance qui se justifie par la nécessité pour les chercheurs de disposer d'approches plus appropriées pour projeter les dynamiques d'utilisation de l'espace et mieux comprendre les décisions des communautés ou des individus qui sont à la base de ces changements (Parker et al., 2003). La modélisation multi-agents propose des concepts nouveaux et différents de ceux des approches classiques de modélisation et fournit par conséquent des éléments complémentaires de compréhension des dynamiques d'utilisation de l'espace (agents, émergence, organisation, adaptation, etc.). Dans un environnement multi-agents, les modèles de prise de décision humaine et les modèles de processus sont combinés dans une plateforme spatiale commune (Bousquet, 1994 ; Bousquet et al, 1998; Parker et al., 2003). Cette technique de modélisation appliquée à l'étude des changements d'utilisation de l'espace ouvre ainsi des perspectives nouvelles et intéressantes pour la modélisation intégrée des interactions Homme - Environnement. De plus, les simulations qui dérivent ce type de modèle se sont avérées être de précieux outils de négociation et d'accompagnement de la gestion de l'espace et des ressources naturelles (Barreteau et al., 2001). La modélisation multi-agents se présente comme une approche prometteuse et complémentaire aux approches classiques. Elle offre des possibilités qui permettraient de répondre à un nombre important de questions concernant l'analyse des dynamiques d'utilisation de l'espace qui restent ouvertes et méritent une attention de la recherche. Ces questions concernent notamment la modélisation des processus de prise de décision individuelle, l'influence des facteurs politiques et institutionnels tels que le système foncier, les dynamiques de marché et les pratiques traditionnelles d'utilisation et de gestion des terres.