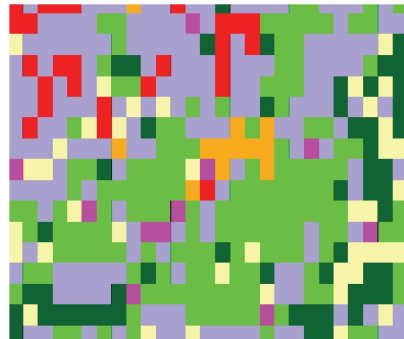


SMALL Savannah

Un Système d'Information pour l'analyse intégrée des changements
d'utilisation de l'espace à l'Extrême Nord du Cameroun

*An Information System for the integrated analysis of land use change
in the Far North of Cameroon*



Eric Fotsing

SMALL SAVANNAH

**An Information System for the integrated analysis of
land use change in the Far North Cameroon**

PROEFSCHRIFT

ter verkrijging van
de graad van Doctor aan de Universiteit Leiden,
op gezag van de Rector Magnificus prof.mr. P.F. van der Heijden
volgens besluit van het College voor Promoties
te verdedigen op 8 december 2009
klokke 16.00 uur

door

Eric Fotsing

geboren te Nkongsamba (Kameroen) op 11 januari 1973

Promotiecomissie :

Promotores : Prof. dr. W.T. de Groot
Prof. dr. M. Tchuenté, Université de Yaoundé, Cameroun

Co-promotor : Dr. J.-P. Cheylan, CIRAD, France

Overige leden : Dr. J.-Ph. Tonneau, CIRAD, France
Prof. dr. E.F. Smets
Dr. D.J. Snelder
Prof. dr. G.R. de Snoo

SMALL SAVANNAH

**Un Système d'Information pour l'analyse intégrée
des changements d'utilisation de l'espace
à l'Extrême Nord du Cameroun**

Eric Fotsing

La présente étude a bénéficié d'un appui financier, institutionnel et scientifique du :

PRASAC, Pôle régional de Recherche Appliquée au développement des Savanes d'Afrique Centrale, financé par le Fond français d'Aide à la Coopération à travers le Conseil Ouest et Centre Africain pour la Recherche et le Développement Agricole qui exerce la tutelle scientifique. Le PRASAC est désormais une institution spécialisée de la Communauté Economique et Monétaire d'Afrique Centrale. Le Pôle est une initiative des instituts de recherche agronomique du Tchad (ITRAD), de la République centrafricaine (ICRA) et du Cameroun (**IRAD**), avec la collaboration de partenaires scientifiques, instituts de recherche et Universités européennes (CIRAD et IRD en France, Université de Leiden au Pays-Bas). Le pôle mène des recherches pour résoudre les problèmes des producteurs, des économies nationales et régionales.



SIMES/WISE-DEV, Système d'Information Multimédia sur l'Environnement en Afrique Subsaharienne, financé par la Commission Européenne et la Banque Mondiale. SIMES est une initiative d'Universités africaines et laboratoires ou centre de recherche européens : IRD et INRIA en France, ERCIM en Angleterre, **Université de Yaoundé** au Cameroun, ESP de Dakar au Sénégal, IER au Mali, ESI au Burkina Faso, CNTIG d'Abidjan en Cote d'Ivoire. Le SIMES vise à associer ces partenaires pour l'application et l'adaptation des nouvelles technologies de l'information à la compréhension et à la maîtrise de l'environnement en Afrique subsaharienne. Ceci, à travers la mise en place des systèmes d'information adaptés aux observatoires environnementaux et socio-économiques.



CEDC, Centre d'étude de l'Environnement et du Développement au Cameroun est un centre de recherche, de formation et d'appui au développement. Le CEDC est le fruit d'un accord de coopération entre le Ministère de l'Enseignement Supérieure du Cameroun représenté par l'**Université de Dschang**, et l'Université de Leiden au Pays-Bas représentée par le CML.



CML, Institut des Sciences Environnementales de l'**Université de Leiden** au Pays-Bas, à travers son Programme 'Environnement et Développement' s'intéresse aux problématiques de dégradation, protection et réhabilitation des ressources naturelles, telles que les forêts, les ressources marines, les sols et la faune sauvage dans les pays en voie de développement.



Fotsing E., 2009.

SMALL SAVANNAH : Un Système d'Information pour l'analyse intégrée des changements d'utilisation de l'espace à l'Extrême Nord du Cameroun.

Thèse de PhD, Avec résumé général en français, en anglais et en néerlandais, et un résumé de chaque chapitre en français et en anglais.

Photos : Fotsing E., Mathieu B. et GR voir PRASAC, 2002.

ISBN 978 90 9024698 7

Table des matières

Prologue.....	9
Remerciements.....	13
Chapitre 1. Introduction générale et description de la zone d'étude.....	17
1.1. Introduction	18
1.2. Intérêt scientifique et opérationnel de l'étude	19
1.3. Description de la zone d'étude	23
1.4. Problématique des dynamiques agraires dans la zone d'étude.....	29
1.5. Objectifs et questions de recherche	33
PARTIE 1 : THEORIES ET OUTILS POUR L'ANALYSE INTEGREE ET LA MODELISATION DES CHANGEMENTS D'UTILISATION DE L'ESPACE	37
Chapitre 2. Théories et concepts pour l'analyse intégrée des changements d'utilisation de l'espace	39
2.1. Introduction	40
2.2. Concepts et modèle de représentation des systèmes d'utilisation de l'espace	41
2.3. Concepts et modèles explicatifs des dynamiques d'utilisation de l'espace.....	57
2.4. Approches et démarche d'analyse des changements agraires	58
2.5. Conclusion.....	62
Chapitre 3. Outils pour l'analyse et la modélisation intégrée des changements d'utilisation de l'espace	65
3.1. Introduction	66
3.2. Outils de télédétection et de traitement d'images.....	66
3.3. Outils de SIG et d'analyse spatiale.....	78
3.4. Outils et modèles d'analyse statistique.....	79
3.5. Outils et modèles de simulation	83
3.6. Conclusion	90

PARTIE 2 : ANALYSE PREALABLE ET CONCEPTION DU SYSTEME D'INFORMATION SUR L'ENVIRONNEMENT SMALL SAVANNAH	91
Chapitre 4. Un dispositif multi-échelle d'analyse des dynamiques agraires en zone des savanes	93
4.1. Introduction	94
4.2. Besoin d'une approche multi-échelle pour SMALL Savannah.....	96
4.3. Méthode d'identification et de changement d'échelle.....	98
4.4. Hiérarchie des échelles d'observation et d'analyse.....	100
4.5. Conclusion.....	110
Chapitre 5. Analyse préalable de la structure et des dynamiques du système agricole.....	113
5.1. Introduction	114
5.2. Occupation du sol et changements dans le système d'utilisation de l'espace	115
5.3. Dynamiques agricoles survenues dans chaque zone agroécologique	131
5.4. Facteurs déterminant les changements d'utilisation de l'espace	139
5.5. Hypothèses sur les trajectoires du système agricole et les facteurs déterminants.....	152
5.6. Conclusion.....	156
Chapitre 6. Architecture du Système d'Information sur l'Environnement SMALL Savannah.....	159
6.1. Introduction	160
6.2. Nature et structure d'un Système d'Information sur l'Environnement	162
6.3. Spécificités du Système d'Information sur l'Environnement SMALL Savannah.....	165
6.4. Conception du Système d'Information sur l'Environnement SMALL Savannah.....	168
6.5. Conclusion et perspectives.....	184

PARTIE 3 : MISE EN OEUVRE DU SYSTEME D'INFORMATION SUR L'ENVIRONNEMENT SMALL SAVANNAH	185
Chapitre 7. Analyse spatiale de l'extension récente du sorgho de contre saison en zone des savanes....	187
7.1. Introduction.....	188
7.2. Contexte et cadre méthodologique.....	189
7.3. Caractérisation des systèmes agraires à base de sorgho de contre saison	192
7.4. Analyse de l'extension du sorgho de contre saison.....	200
7.5. Hypothèses sur le processus d'expansion de la culture et les facteurs déterminants	210
7.6. Conclusion et perspectives	213
Chapitre 8. Analyse spatiale des changements d'occupation du sol dans la région autour de Maroua	217
8.1. Introduction.....	218
8.2. Contexte et cadre méthodologique.....	219
8.3. Caractéristiques des différentes classes d'occupation du sol	223
8.4. Analyse des changements d'occupation du sol au niveau régional	229
8.5. Analyse locale des changements d'occupation du sol et stratégie des acteurs.....	235
8.6. Conclusion et perspectives.....	240
Chapitre 9. Analyse spatiale et quantitative des facteurs déterminant l'utilisation de l'espace.....	243
9.1. Introduction.....	244
9.2. Contexte et cadre méthodologique	245
9.3. Représentation de l'utilisation de l'espace et des facteurs déterminants	249
9.4. Résultats de l'exploration des facteurs déterminants et construction des modèles de prédiction.....	259
9.5. Synthèse et discussions	281
9.6. Conclusion et perspectives.....	284

Chapitre 10. Un modèle intégré pour explorer les trajectoires des changements d'utilisation de l'espace	287
10.1. Introduction.....	288
10.2. Contexte et cadre méthodologique de l'étude.....	289
10.3. Structure et mise en œuvre du modèle dynamique.....	292
10.4. Résultats de la validation du modèle	302
10.5. Résultats de la simulation des dynamiques.....	312
10.6. Conclusion et perspectives.....	319
Chapitre 11. Conclusion générale et perspectives.....	323
11.1. Enjeux et spécificités des Systèmes d'Information sur l'Environnement	323
11.2. Résultats d'ordre méthodologique	325
11.3. Résultats mobilisables en faveur du développement rural	330
11.4. Conclusion et orientations pour les travaux de recherche futurs.....	333
Références bibliographiques.....	337
Liste des figures et tableaux	349
Résumé de la thèse	353
Summary of the thesis.....	359
Samenvating.....	365
Au sujet de l'auteur.....	369
Quelques publications pertinentes	371

Prologue

Pour une approche intégrée et interdisciplinaire

Après plusieurs siècles d'étude de notre environnement par une approche qui consiste à le diviser en composantes de plus en plus fines, nous parvenons à une ère où les scientifiques même les plus avérés commencent à reconnaître que cette approche réductionniste n'est pas assez puissante pour comprendre et résoudre les grands problèmes auxquels l'humanité fait face actuellement. Les dynamiques de populations et de la végétation, les processus d'érosion des sols, le réchauffement de la terre, les flux économiques et la résilience des écosystèmes sont quelques exemples de problèmes ou processus complexes qui constituent des défis majeurs pour la science moderne. Ce qui rend la plupart de ces phénomènes difficiles à comprendre est leur caractère dynamique et décentralisé. On est le plus souvent en présence d'un nombre tellement important de composantes qui changent d'état d'un instant à un autre et qui interagissent entre elles au point où il n'est pas possible de les comprendre en examinant uniquement une composante ou un aspect du système de façon isolée. Dans ces cas, on dit le plus souvent que l'ensemble n'est pas nécessairement la somme des parties.

La communauté scientifique qui s'intéresse à l'étude des systèmes complexes reconnaît de plus en plus la nécessité d'aborder ce type de problèmes complexes en élaborant des modèles intégrés dans le cadre d'approches interdisciplinaires. L'approche écosystème qui est par exemple fortement recommandée dans le cadre de la Convention des Nations Unies sur la diversité biologique est un signe révélateur de cette nouvelle tendance. Un autre signe assez révélateur de cette nouvelle approche scientifique au niveau des grandes Universités et centres de recherche est la création récente des instituts avec des noms tels que : *Center for expertise on rural area, Center for Spatially Integrated Social Science, Functional Genomics and Integrative Biology, Institute of Complex System, etc.* On y voit de plus en plus les biologistes, les sociologues, les géographes et les économistes constituer des équipes avec des informaticiens et les mathématiciens pour essayer de comprendre, interpréter, et prévoir l'évolution des processus naturels et/ou socio-économiques qui opèrent à différentes échelles. La présente thèse s'inscrit dans cette approche intégrée et interdisciplinaire de la science appliquée à la résolution de problèmes complexes et concrets. L'idée de ce projet est essentiellement le fruit des travaux de recherche antérieurs que j'ai menés dans le domaine des applications de l'Informatique à la gestion des ressources naturelles. Dans ce prologue, je voudrais resituer les origines de ce projet et présenter le contexte institutionnel et scientifique dans lequel il a été conduit.

Mes travaux antérieurs et les origines du projet de thèse

En effet, les travaux de recherche que j'ai menés après mes études de premier cycle universitaire m'ont permis de m'imprégner et de me familiariser progressivement à cette approche intégrée et interdisciplinaire. J'ai ainsi eu la possibilité de développer des applications dans les domaines tels que la gestion urbaine, la gestion de l'environnement et des ressources naturelles. Dans le cadre de mes travaux de Maîtrise en Informatique fondamentale initiés en 1994, j'avais été fasciné par la théorie des graphes et ses nombreuses applications. C'est ainsi que j'ai engagé une recherche sur les applications de cette théorie au problème d'optimisation et de gestion des réseaux. J'ai été amené à explorer les fonctionnalités des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et leur contribution à la résolution de ce problème. Avec la collaboration du laboratoire d'Aménagement Urbain de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de l'Université de Yaoundé I, j'ai travaillé sur la modélisation des données géographiques et la mise en place d'un SIG de gestion des réseaux d'eau et d'électricité de la ville de Yaoundé (Fotsing, 1996). Ce travail a été poursuivi dans le cadre d'un projet sur la résorption de

l'habitat spontané en milieu urbain et a donné lieu au développement de l'application SIGSADRE, un système d'aide à la planification et la gestion du réseau d'eau dans les quartiers à habitat spontané (Pettang et al., 1996 ; Pettang et al., 1997).

Grâce à un financement Aire-Développement, le laboratoire de Modélisation et Calcul Parallèle du Département d'Informatique de l'Université de Yaoundé I a initié à partir de 1995 des travaux de recherche sur les Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD) auxquels j'ai activement contribué. Mes travaux de recherche ultérieurs et les applications que j'ai ensuite développées ont été fortement influencés et orientés par les problématiques de gestion de l'information géographique dans une perspective d'aide à la décision. Dans le cadre d'un projet d'aide à la prise de décision exécuté par l'Institut de Formation et de Recherche Démographique au Cameroun (IFORD), j'ai d'abord contribué au développement d'une application sur la gestion des ressources renouvelables au Cameroun. L'application dénommée R+/Arcview intègre une base de données démographique avec un SIG. Ce système a été conçu dans le but d'aider les décideurs à mieux appréhender l'impact des paramètres démographiques sur l'approvisionnement en eau, électricité, pétrole et gaz (Kouamou et Fotsing, 1995). Faisant suite à cette expérience, j'ai été sollicité par le ministère des Mines de l'Eau et de l'Energie, pour contribuer à l'analyse de PROGRES (PROgrammation et Gestion des Ressources en eau Souterraine), un système de gestion des ressources en eau, en vue de le faire évoluer vers un véritable système interactif d'aide à la décision. Le système mis en place permet de gérer une base de données sur l'hydraulique rurale au Cameroun et assiste pour la planification et la programmation de nouveaux ouvrages (Fotsing et al., 1995). En 1997, je me suis intéressé dans le cadre de mes travaux de recherche pour le DEA à l'analyse et au traitement d'images de télédétection en vue de l'évaluation de la dynamique des ressources ligneuses (Fotsing et Madi, 1997). Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet sur la problématique du bois de feu mené dans la région de l'Extrême Nord du Cameroun par le Centre d'Etude de l'Environnement et du Développement au Cameroun (CEDC). C'est dans ce contexte que j'ai fait ma première expérience du monde rural dans la région de l'Extrême Nord du Cameroun où j'ai été marqué par son extrême diversité sur le plan physique et humain, la complexité des problèmes de gestion des ressources naturelles, la forte prédominance de la pauvreté mais aussi l'existence de plusieurs opportunités de développement. L'idée de projet de la thèse présentée dans ce document est le fruit de ces précédentes expériences et spécifiquement de celle de ce premier contact avec le milieu rural.

Ma première expérience avec le milieu rural dans le Nord du Cameroun et l'idée du projet

Lors des travaux de vérification sur le terrain, j'ai eu la possibilité d'effectuer des déplacements dans l'ensemble de cette région et j'avais été profondément impressionné par tout ce que j'avais pu voir. En effet, le visiteur qui découvre cette région au mois de juin comme c'était le cas pour moi, peut apprécier dès les premiers instants une remarquable richesse naturelle et culturelle. Le paysage entièrement verdoyant et le climat relativement agréable ne reflètent pas l'image d'une région sèche, la grandeur des troupeaux de bétail et l'occupation permanente des populations dans les champs témoignent de l'importance des activités agricoles et de l'élevage. On peut également percevoir l'accueil chaleureux des populations dans les villages. Toutefois, ces premières impressions contrastent avec le niveau de pauvreté des ménages en milieu rural qui ne serait que la conséquence d'un nombre récurrent de problèmes liés à l'exploitation et la conservation des ressources naturelles dont dépend la majorité de la population. De plus, cette région appartient à la zone soudano-sahélienne et ne fait pas exception des conditions difficiles des milieux à tendance sèche, qui sont les plus exposés aux épisodes de sécheresse et au phénomène de la désertification. L'augmentation de la

population qui induit des besoins en ressources naturelles plus importants, la diversité ethnique et les grandes mobilités humaine et animale sont des facteurs qui se combinent pour déclencher des dynamiques très complexes. Les causes et les effets de ces dynamiques ne sont pas bien connus dans l'espace et le temps. On constate par contre que les projets de développement et Organisation Non Gouvernementales opérant dans les domaines connexes du développement rural et la lutte contre la pauvreté sont relativement nombreux mais leurs résultats restent assez mitigés. Ce qui amène à s'interroger sur la stratégie de développement rural appropriée pour cette région qui connaît de sérieux problèmes liés à la dégradation des ressources naturelles, l'insécurité alimentaire et la sous-scolarisation. Au regard de ce contexte, l'idée principale du projet de thèse était de proposer des méthodes et technologies de l'information adaptées à la gestion et au suivi de la dynamique des ressources naturelles de cette région. Ce projet a d'abord été partiellement soutenu par l'Agence Universitaire de la Francophonie qui m'a accordé une bourse de formation doctorale de 4 mois dans le cadre de son réseau de télédétection. Les travaux de recherche menés dans le cadre de cette bourse ont porté sur la contribution de la télédétection et plus spécifiquement des traitements de morphologie mathématique à la cartographie de l'occupation du sol (Fotsing et Legeley, 1999).

A ce moment, le laboratoire de Modélisation et de Calcul Parallèle du Département d'Informatique de l'Université de Yaoundé I avait consacré un axe de recherche aux applications de l'informatique à la gestion de l'environnement dans une perspective d'appui au développement. Mon intérêt scientifique était prononcé pour la spécification des observatoires environnementaux et la mise en place des Systèmes d'Information sur l'Environnement. Les thèmes spécifiques explorés et étudiés dans cette perspective étant notamment les approches de modélisation spatiale, les SIG et des techniques de traitement d'image, les Systèmes de Gestion des Bases de Données et les techniques du multimédia. Une collaboration entre le LMCP et l'institut de formation et de recherche UNU/INRA (United Nation University, Institute for Natural Resources in Africa) initiée en 1998 a permis de développer un cours sur les applications de l'informatique à la gestion des ressources naturelles en Afrique. Ces formations destinées aux professionnels, chercheurs et universitaires sont illustrées par les diverses applications en cours de développement et devraient permettre d'identifier les besoins des utilisateurs en ce qui concerne le développement des outils d'aide à la décision dans le domaine de la gestion des ressources naturelles. Dans le cadre du projet SIMES (Système d'Information multimédia sur l'Environnement en Afrique subsaharienne), j'ai également bénéficié d'une allocation de recherche pour travailler sur la spécification des observatoires environnementaux et la proposition d'une méthodologie de mise en place de ce nouveau type de système d'information. Au cours de cette même période, le projet PRASAC (Pôle Régional de Recherche Appliquée au Développement des Savanes d'Afrique Centrale) était en cours de montage et l'un de ses objectifs qui rejoignait mes préoccupations de recherche était la mise en place d'un observatoire du développement. Une collaboration a ainsi été initiée avec le PRASAC afin de travailler sur un cas concret d'observatoire. Une convention de collaboration a été ensuite signée entre le CEDC et le PRASAC à travers l'Institut de Recherche Agronomique pour le Développement au Cameroun (IRAD) afin de mener une opération de recherche liée à cette problématique.

Contexte des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse

Les travaux de terrain de cette thèse ont été ainsi effectués avec l'appui du projet PRASAC dans le cadre de l'opération de recherche sur le peuplement de l'espace et ses conséquences. La démarche adoptée s'est largement appuyée sur le dispositif de recherche mis en place au niveau régional en vue d'analyser entre autre, les grandes dynamiques agraires régionales dans la zone des savanes d'Afrique

centrale, au Tchad, en RCA et au Cameroun. Les problématiques définies par le comité scientifique et affinées par les comités recherche-développement ont permis d'élaborer des thèmes de recherche qui couvrent les domaines prioritaires du développement agricole et pastoral de la région. Ces thèmes ont été structurés sous les 6 composantes de recherche suivantes qui se situent à différents niveaux d'analyse: Observatoire du développement, Gestion des terroirs et des espaces, Conseil de gestion aux exploitations, Système de culture et d'élevage, Transformation des produits agricoles, et Productivité et compétitivité de la filière cotonnière.

Les opérations de recherche de chaque composante ont été planifiées par des groupes de concertation régionaux qui ont défini des problématiques communes aux trois pays concernés par le projet. Les ateliers régionaux organisés avec les partenaires de la recherche et du développement ont permis de préciser et approfondir les problématiques de recherche. Il ressort que l'opération de recherche sur le peuplement de l'espace et ses conséquences, que nous avons conduite se situe à l'interface entre les composantes « Observatoire du développement » et « Gestion des terroirs et des espaces ». Au sein de la composante « Gestion des terroirs et des espaces », il était question d'analyser la diversité des situations, les dynamiques en cours et les stratégies des acteurs au niveau local. La finalité étant de mieux orienter les interventions en milieu rural en définissant des règles et des outils pour mieux gérer l'espace et les ressources naturelles. Les informations de base ainsi collectées devraient constituer une entrée pour la composante « Observatoire du développement » qui est orientée vers l'analyse et la caractérisation des dynamiques agraires régionales. Les informations issues de l'observatoire devant contribuer à une meilleure planification des opérations de développement et des activités de recherche dans la région des savanes d'Afrique centrale. Les données collectées sur le terrain et les différents ateliers méthodologiques organisés dans le cadre de cette opération de recherche ont contribué à la conception et la mise œuvre de SMALL Savannah. SMALL Savannah est un Système d'Information sur l'Environnement qui intègre un module d'observation et d'analyse spatiale pour la représentation des phénomènes à partir de données géographiques de sources variées, un module de prédiction pour l'explication de la distribution de l'utilisation de l'espace et un module de simulation pour explorer les trajectoires d'évolution des changements. Ce système d'information peut être utilisé dans le cadre d'un observatoire des dynamiques agraires et du développement rural. Les principaux utilisateurs sont les scientifiques et les acteurs impliqués dans la planification et la gestion de l'espace. Toutefois, une utilisation peut être envisagée avec les acteurs locaux pour susciter les discussions et préparer la concertation ou la négociation dans le cadre de démarches participatives d'aménagement et de gestion de l'espace.

J'espère que le lecteur de ce document, trouvera ici les concepts, méthodes, outils, données, informations et des connaissances pouvant aider à mieux comprendre le fonctionnement et la dynamique des systèmes agraires, à stimuler des recherches complémentaires sur des questions qui resteraient posées et à entreprendre des actions concrètes en faveur d'un développement intégré et durable des zones de savanes d'Afrique centrale.

Remerciements

Lorsque j'initiais ce projet de thèse en 1998, je savais que l'un des défis majeurs à relever sur le plan scientifique devait être la capacité à mieux articuler les concepts, approches et outils aussi divers de l'informatique, de la géographie et des disciplines connexes aux sciences environnementales pour aborder le problème de la complexité des systèmes environnementaux et du développement rural. Je savais également que la réalisation de ce projet nécessiterait un soutien logistique important, étant donné les besoins en données de sources variées et le caractère spécialisé du matériel et des logiciels nécessaires pour leur acquisition et leur traitement. En réponse à ces deux appréhensions initiales, j'ai bénéficié de l'appui de plusieurs institutions et projets de recherche qui m'ont permis de surmonter les exigences financière logistiques et scientifiques de ce projet.

Le Pôle Régionale de recherche Appliquée aux Savanes d'Afrique Centrale a financé 2 ans de travaux sur le terrain au Cameroun et 5 mois de bourse doctorale en Europe (au CIRAD de Montpellier en France, à l'Université de Leiden et à l'Université de Wageningen au Pays Bas) ainsi que la production de ce document. Le projet Système d'Information sur l'Environnement en Afrique Subsaharienne (SIMES/WISE-DEV) a financé 7 mois de bourse à l'Université de Yaoundé I et à l'Université de Dschang au Cameroun. Le Service d'Action Culturelle et de la Coopération de l'ambassade de France au Cameroun a financé 3 mois de bourse doctorale au CIRAD de Montpellier en France, à l'Université de Leiden et à l'Université de Wageningen au Pays Bas. L'Agence Universitaire pour la Francophonie a financé 4 mois de bourse doctoral en France (IRD, Bondy). Le ministère de l'Enseignement Supérieur du Cameroun a pris en charge mes déplacements de Maroua à Dschang pour assurer mes enseignements, pendant un an et demi. L'Université de Leiden a pris en charge mes différents séjours au Pays-Bas et l'organisation de la soutenance comprenant les frais de déplacement et de production du document. Le CEDC a assuré l'appui logistique pour le matériel de bureau et les outils de cartographie, SIG et télédétection pendant toute la durée des travaux. Les scènes d'images du satellite SPOT de 1999 ont été acquises avec le soutien de la convention ISIS entre le CNES et SPOT IMAGE, un programme d'Incitation à l'utilisation Scientifique des Images SPOT. A travers ces différentes institutions, j'ai eu la possibilité et le privilège de travailler avec de nombreux acteurs du développement et scientifiques avérés et d'expertises diverses qui ont été pour moi une source importante d'apprentissage et d'inspiration. Il m'est donc particulièrement agréable de remercier toutes ces personnes et institutions qui ont ainsi, par leurs appuis, conseils, critiques et encouragements, contribué à la finalisation de ce travail.

A l'Université de Wageningen au Pays-Bas, j'ai obtenu un appui déterminant de l'Environmental Group et je remercie tout spécialement Dr Peter Verburg qui s'est impliqué dans ce projet dès notre première rencontre en acceptant de collaborer pour la réalisation du modèle que j'ai développé. Il a bien voulu étendre sa contribution en participant à la révision de l'ensemble du manuscrit de cette thèse. Je remercie aussi tous les autres membres du groupe de modélisation CLUE notamment Pr Tom Velkamp, Dr Kasper Kok, Dr Koen Overmars et Peter Leschen.

Je remercie ensuite les collègues, chercheurs avec qui j'ai eu une collaboration sur des thèmes spécifiques de ce projet et dont nos travaux conjoints ont débouché sur des publications dans les colloques ou revues internationales. Annick Legeley Padovani de l'IRD de Bondy en France, Dr Dieudonné Mouafo de Geomatics Canada, Dr Daniel Sighomnou et Dr Luc Sigha de l'Institut de Recherches Géologiques et Minières au Cameroun, Bertrand Mathieu et Denis Gauthier du CIRAD de

Montpellier, Dr Ntoupka Mama, Dr Félix Mainam de l'IRAD à Maroua, et Pr. Robert Gil Pontius de l'Université de Clarke aux Etat Unis.

Je remercie l'ensemble de mes étudiants de

l'Université de Dschang pour leur contribution à la collecte de données spécifiques et la numérisation des cartes. Je remercie également les responsables des différentes structures de recherche et de développement en Afrique pour leur remarques et suggestions sur ce projet lors des formations que j'ai organisées à leur intention sur les applications de l'informatique à la gestion des ressources naturelles à l'Université d'Accra au Ghana, à l'Université de Yaoundé I, à l'Université de Dschang, au CRESA Forêt Bois de Yaoundé, et au CEDC de Maroua. Je remercie les responsables des structures de développement et autorités administratives ainsi que les populations locales de la région de l'Extrême Nord du Cameroun qui ont facilité la collecte des données. Zaihad Olivier, Saidou Hamadou et Wadiébé Valentin, observateurs du PRASAC dans les trois terroirs villageois d'étude ont été d'excellents assistants de recherche et interprètes sur le terrain.

Je remercie le Dr Baidu-Forson et les autres staffs de l'UNU /INRA pour les différents projets de recherche et sessions de formation initiés à partir de 1998 sur le développement des applications de l'informatique à la gestion des ressources naturelles. J'espère que ce travail est une réponse aux espoirs placés en ces collaborations. Je remercie également les responsables du projet SIMES-WISE-DEV notamment Olivier Monga et Eric Chenin pour leur appui scientifique au démarrage de cette thèse. Je remercie le Dr Emmanuel Kamgnia, chef du Département d'Informatique à l'Université de Yaoundé I et l'ensemble des enseignants de ce département. Je pense à Kouamou Georges, Hypollite Tapamo, Athanase Molo Ngah et Patricia Dzéakou tous collègues de thèse du projet SIMES à qui j'adresse mes remerciements pour l'ambiance de travail et l'esprit d'équipe.

Je remercie le Directeur de l'Institut Universitaire de Technologie Fotso Victor (IUT/FV) de l'Université de Dschang, le Pr. Fogue Médard qui s'est impliqué personnellement dans le processus de recherche de financement complémentaire pour ce travail. Il a ensuite su trouver un arrangement institutionnel avec la Coordination du CEDC pour que je puisse mener mes activités de recherche à Maroua tout en assurant mes enseignements à l'Université de Dschang. Je remercie par la même occasion le Dr Marcellin Nkenlifack, chef de Département d'informatique de l'IUT/FV ainsi que les collègues Liénoù Jean-Pierre, Noulamou Thierry et Dr Tsochounie Jules qui ont su traduire en des actes concrets cette volonté du Directeur.

J'exprime ma gratitude et ma reconnaissance aux responsables du projet PRASAC. Je pense tout d'abord à Dr Seiny Boukar, Coordonnateur régional, Dr Aboubakar Njoya et Woin Noé, Délégué national. Le délégué des partenaires scientifiques, Guy Faure et les coordonnateurs scientifiques successifs, Patrick Bisson, Jean-Yves Jamin, Hubert Guérin et Phillipe Boumard. Je remercie par la même occasion les collègues du CIRAD-TERA qui m'ont accordé un accueil de qualité appréciable lors de mes différentes missions de recherche. Je pense à tous les membres de l'équipe Information Géographique (Corinne, Yves Augusseau, Michel Passouant, Cyrille Cornu) et de l'équipe multi-agents (François Bousquet, Christophe Lepage et Pierre Bommel).

J'exprime ensuite ma gratitude à Dr Denis Gautier du CIRAD de Montpellier dont les conseils et les différents ateliers de géographes qu'il a organisés dans le cadre du projet PRASAC ont contribué à renforcer la problématique du sujet. Je remercie par la même occasion mes collègues thésards du projet PRASAC, Florent Ankoguy-Mpoko de la RCA et Frédéric Réounodji du Tchad avec qui nous avons travaillé dans ce contexte sur des problématiques similaires.

A l'Institut des sciences Environnementales de l'Université de Leiden (CML), je remercie vivement la secrétaire Annelies Oskam et la bibliothécaire Edith. Elles ont toujours répondu à mes multiples sollicitations liées à l'inscription, aux recherches documentaires et l'édition finale de ce document. Je remercie particulièrement Dr Hans Bauer pour ses nombreuses remarques et critiques. Je pense également à son épouse Iris pour les moments sympathiques passés au Cameroun et au Pays-Bas. Je me sens redevable à tous les collègues du CML et spécialement Dr Hans de Iongh, Dr Ruth Norduying, Dr Paul Loth, Martin Zelfde, Dr Natascha Zwaal, Dr Denyse Snelder et Norbert Sonné pour le soutien sans faille qu'ils m'ont apporté lors de mes séjours de recherche au Pays-Bas. J'étends mes remerciements à Evelyn et à Lia pour leur hospitalité.

Au CEDC, je remercie les différents coordonnateurs et homologues coordonnateurs successifs : Dr Madi Ali, Dr Hans Bauer, Dr José van Santen, Dr Mvondo Awono Jean-Pierre, Stephen van der Mark et Ralph Buij. Au-delà des démarches institutionnelles qu'ils ont entreprises pour la mise en place de ce projet, ils ont contribué à titre personnel à lui donner un contenu. Dr José van Santen a bien voulu m'apporter son expertise en sciences sociales et sa bonne connaissance du milieu rural pour effectuer quelques interviews dans les villages et je suis reconnaissant pour cette disponibilité. Je remercie également tous les collègues chercheurs du CEDC qui ont contribué aux discussions sur les versions successives du projet. Je pense à Dr Théodore Mayaka pour les différentes lectures et corrections, Dr Charles Njomaha, Francis Tarla, Dr Wassouni, Ismailou Adama, Arabi Mohamam, Halidou Demba, Martine Prins, Honoré Beyegue et Bachirou Mohamadou. Je remercie tout le staff et le personnel d'appui du CEDC pour leur soutien logistique et pour l'ambiance familiale: je pense aux administrateurs et comptables, à tous les secrétaires, bibliothécaires, chauffeurs, mécaniciens et gardiens : Papa Maliki, Marcel Laurier, Ivo Tomo Engelbert, Maurice, Stéphane, Pagou, feu Bapetel, Fidèle, Hamidou, Falmata, Vincent, Frédéric, Bouba, Ibrahim, Samadan, Adamou, Nanga, Damdam, Léonie, Djamilat, Golton, Ramatou.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Jean Stéphane Biatcha et Monsieur Antoine Ngueuga qui ont toujours cru en mon travail depuis mon entrée à l'Université. Ils n'ont jamais cessé de me motiver et de m'aider à identifier des pistes pour mon orientation académique et professionnelle.

Ma profonde gratitude va à mes amis au Cameroun et en Europe pour le soutien moral et même matériel qu'ils m'ont apporté lors des difficiles passages à vide que j'ai connus pendant la réalisation de ce travail. Joël Monthé, Patrice Nolack, Godefroy Kouokam, Philippe Wangmegne, Sandrine Meyantchop, Innocent Bakam, Paulin Choudja, Alain Nkoyock, Clotaire Tchonlafi, Guillaume Siéwé, Duprince Tchakoté, Michel, Diny Timmermans, Iris et Karin! Vous avez été particulièrement aimables pendant tous ces moments.

Il me sera difficile d'exprimer suffisamment ma gratitude et ma reconnaissance à mon épouse, et les trois enfants que nous avons eus pendant la réalisation de ce travail. Ils ont été à mes côtés pendant les moments les plus difficiles et ont su persévérer pendant mes déplacements à l'étranger, à l'Université de Dschang ou dans les villages de l'Extrême Nord du Cameroun. Nicole, Diane, Gaétan et Yannick, trouvez en ce travail le fruit de vos sacrifices et de votre patience. Je pense enfin à tous les autres membres de ma famille qui m'ont toujours encouragé et tout spécialement à M. et Mme Tawetsing, Pengou, Kagmeni, Ecken, Tchana et Mba. Je pense à Emilie, Laura, Daniel, Hortense et Nathalie. Je regrette toutefois le décès brusque de ma petite sœur Honorine survenue au cours de la réalisation de ce travail et à qui je le dédie.



Photo 1. Les membres d'une exploitation dans le village de Gadas, sont ici dans leur champ, entrain de battre les épis de sorgho de contre saison après la récolte. Le grand troupeau de bétail en arrière plan se nourrit des résidus de récolte.

Chapitre 1. Introduction générale et description de la zone d'étude

Résumé:

Le développement durable des communautés rurales en zone de savanes africaines est une préoccupation importante qui implique pour les acteurs du développement de mieux comprendre les interactions dynamiques entre les systèmes naturels et socio-économiques. Avec l'émergence des problèmes environnementaux, on a assisté au cours des deux dernières décennies à la mise en place de nombreux projets internationaux visant à réaliser des Systèmes d'Information sur l'Environnement. Malgré cet intérêt croissant, les méthodes d'analyse et de conception qui ont été conçues pour des applications de gestion simples restent inadaptées pour le développement de cette nouvelle génération de Système d'Information qui présente de nombreuses spécificités. L'Extrême Nord du Cameroun est un exemple de région de savanes d'Afrique centrale où on a observé de nombreuses transformations des paysages agraires impulsées par la forte pression démographique et l'importance des mobilités humaine et animale. Ces dynamiques ont conduit dans plusieurs cas à une saturation foncière, à une compétition plus accrue entre les formes d'utilisation de l'espace et à des conflits entre les acteurs. Un enjeu majeur du développement dans ce contexte c'est d'identifier les stratégies que les acteurs impliqués dans la gestion du système d'utilisation de l'espace devront mettre en place pour éviter de basculer dans une spirale de dégradation des ressources et de pauvreté. La présente thèse porte sur la spécification et le développement d'un Système d'Information pour l'analyse intégrée de ces dynamiques en vue de l'exploration des trajectoires d'évolution des changements dans un avenir proche. Ce chapitre introductif justifie l'intérêt et pose la problématique du travail de recherche mené dans le cadre de cette thèse.

Mots clés : développement rural, dynamiques agraires, analyse intégrée, Système d'Information sur l'Environnement, savanes d'Afrique centrale, Extrême Nord du Cameroun.

Abstract:

Sustainable development of rural communities in African savannas region is a major issue that requires a better understanding of the dynamic interactions between natural and socio-economic systems. As a consequence of increasing environmental problems, there have been a growing number of international projects with the objective to develop Environmental Information Systems. However EIS present many particularities and development method that were designed for simple management application are not appropriate for their development. The Far North of Cameroon is an example of Central African savannas regions where an important number of agrarian landscape change were observed as a consequence of a rapid increasing population and the importance of human and animal movements. Theses changes have led to land saturation with more important competition between land types and conflicts between actors. A key to sustainable development in this context is to identify which strategies will prevent the actors involved in land use and management from the degradation and poverty spiral. The present thesis deals with the specification and development of an Information System for the integrated analysis of theses dynamics in view of the exploration of land use change trajectories in the near future. This introductory chapter justifies the relevance and describes the problem statement of the research carried out within the framework of this thesis.

Key words: rural development, agroecosystem dynamics, integrated analysis, Environmental Information System, Central African Savannas, Far North of Cameroon.

1.1. Introduction

Le développement durable des communautés rurales en zone de savanes africaines est une préoccupation importante qui implique pour les acteurs du développement de mieux comprendre les interactions dynamiques entre les systèmes naturels et les systèmes socio-économiques. Dans la plupart de ces régions, le développement est essentiellement lié aux ressources naturelles qui sont soumises à l'influence combinée des processus naturels et des activités humaines liées à l'exploitation ou la conservation de ces ressources. Les zones de savanes d'Afrique centrale en particulier subissent d'importantes mutations sociales et économiques qui s'accompagnent par des processus rapides de transformation des paysages ruraux. Ces transformations se traduisent le plus souvent par des changements d'occupation du sol ou de modes d'utilisation de l'espace. Les causes de ces transformations peuvent être multiples et complexes. Elles sont dans certains cas, liées à l'arrivée de populations migrantes à la recherche de terres agricoles où à l'installation temporaire des éleveurs transhumants en quête de pâturages pour leurs troupeaux. Dans d'autres cas, ce sont les besoins de plus en plus importants d'une population croissante qui, favorisent les pressions humaines qu'on peut observer sur les terres agricoles et sur les ressources forestières.

La région de l'Extrême Nord du Cameroun est un exemple de région de savanes sèche d'Afrique centrale qui est confrontée au défi de l'explosion démographique qui rend les changements inéluctables. Le doublement de la population en une génération soulève l'épineux problème de rareté et de gestion durable des ressources naturelles. On a observé au cours des deux dernières décennies d'importantes transformations du paysage agricole et de l'utilisation de l'espace (Triboulet, 1995). L'un des problèmes assez préoccupant de cette région est relatif aux faibles rendements de la production agricole qui est restée presque stable au cours des trois dernières décennies (Njomaha, 2004) alors que les besoins de la population ont continué à augmenter du fait de la croissance démographique. Les populations en quête d'espace cultivable et de pâturage exercent des pressions importantes sur les terres qui conduisent à la saturation foncière (Seignobos et al., 1995; Timmermans, 1998), à la dégradation des sols (Obale-Ebanga, 2001) et des ressources ligneuses (Madi et al., 2003). L'espace nécessaire à la continuation d'un tel système extensif est en cours d'achèvement mais les prévisions montrent que la population devra doubler dans les trois prochaines décennies. Une question importante pour le développement de cette région est de savoir les stratégies que les populations pourront mettre en place pour satisfaire leurs différents besoins en aliment et ou en bois de feu dans un futur proche. La réponse à cette question nécessite d'identifier les principaux facteurs et les mécanismes qui déterminent les changements d'utilisation de l'espace avant d'envisager toute prédiction. Malheureusement, il existe très peu de travaux sur les liens dynamiques entre les processus de dégradation des ressources naturelles et les conditions démographiques, économiques et sociales dans cette région.

La présente thèse contribue à répondre à cette question en proposant un Système d'Information pour l'analyse intégrée des changements d'utilisation de l'espace en vue de l'exploration des scénarios d'évolution future. Ce chapitre introductif a pour but de situer l'ensemble du travail de recherche mené dans le cadre de cette thèse. Il est organisé de la manière suivante. La section 2 justifie l'intérêt scientifique et les enjeux de cette recherche pour le développement rural. La section 3 introduit le concept de savane et décrit les grands traits géographiques de la zone d'étude. La section 4 permet de poser la problématique des dynamiques agricoles dans la zone d'étude. La dernière section présente les objectifs de

l'étude, les principales questions de recherche et la manière dont elles sont abordées dans le contenu de la présente thèse.

1.2. Intérêt scientifique et opérationnel de l'étude

1.2.1. Enjeu du développement durable dans les communautés rurales africaines

Le développement agricole en particulier est défini par Trebuil et al. (1994) comme un ensemble de changements sociaux, politiques ou économiques qui interviennent dans le système de production agricole et qui sont supposés bénéfiques pour les communautés rurales considérées. On a assisté dans les années 60 à un optimisme pour le développement agricole avec la révolution verte qui a contribué à l'introduction de nouvelles variétés à haut rendement pour les principales graines. Le développement rural est apparu dans les années 70 comme une réponse à l'échec de ces approches de planification du développement présentant un caractère sectoriel. La nouvelle stratégie, vise à atténuer le problème de la pauvreté et insiste sur le développement rural, vue comme un vaste processus structuré plutôt qu'un simple projet dont l'objectif est l'accroissement de la production agricole. La banque mondiale a ainsi défini le développement rural comme une stratégie conçue pour améliorer la vie sociale et économique d'un groupe spécifique de population : les pauvres ruraux. Le développement rural est donc vu comme une approche d'intervention dans les économies des régions sous développées, approche plus large que le développement agricole et orienté vers les problèmes de pauvreté et d'inégalité (Harriss, 1982). L'expression développement rural est aussi utilisée pour faire référence à l'ensemble des changements bénéfiques ou non, impulsés par le processus d'intervention dans les sociétés rurales. Certains de ces changements sont le plus souvent déclenchés ou accélérés par les politiques de développement mêmes. Lorsqu'on considère l'évaluation faite de nombreux projets de développement en milieu rural, on comprend que la plupart des changements ne sont pas toujours anticipés ni bien maîtrisés à cause de la complexité des interactions dynamiques entre les systèmes naturels et les systèmes socio-économiques (Loireau, 1998).

Dans la plupart des régions en Afrique subsaharienne par exemple, le développement dans les zones rurales est essentiellement lié aux ressources naturelles qui sont soumises à l'influence combinée des processus naturels (sècheresse) et des activités humaines liées à l'exploitation ou la conservation de ces ressources (Geny et al., 1992). Les zones de savanes africaines en particulier subissent d'importantes mutations sociales et économiques qui s'accompagnent par des processus rapides de transformation des paysages ruraux (Pourtier, 2003). Ces transformations se traduisent en particulier par des changements d'occupation du sol ou de modes d'utilisation de l'espace. Les causes de ces transformations peuvent être multiples et complexes. Elles sont dans certains cas, liées à l'arrivée de populations migrantes à la recherche de terres agricoles où à l'installation temporaire des éleveurs transhumants en quête de pâturages pour leurs troupeaux. Dans d'autres cas, ce sont les besoins de plus en plus importants d'une population croissante qui, favorisent les pressions humaines qu'on peut observer sur les terres agricoles et sur les ressources forestières. Dans l'une ou l'autre des situations évoquées, ce sont les enjeux du développement agricole, pastoral ou sylvicole des zones rurales qui sont au centre des préoccupations des populations locales et des acteurs en charge du développement rural. Une meilleure compréhension de ces dynamiques agraires serait donc d'une très grande importance pour ces différents acteurs impliqués dans les processus de planification, de gestion durable de l'espace et des ressources naturelles. Des financements importants

sont ainsi accordés dans le cadre de projets et programmes de développement nationaux ou régionaux afin d'atteindre ces objectifs.

1.2.2. Outils d'aide aux politiques de développement ou d'intervention en milieu rural

Contrairement aux attentes, on constate que plusieurs pays, qui ont pourtant bénéficié de nombreuses aides de la communauté internationale à travers les projets ou les structures nationales de développement, sont restés dans une situation de pauvreté et de dégradation des ressources naturelles (Loireau, 1998). De plus, de nombreux projets environnementaux ou de développement rural dont l'objectif est la gestion durable des milieux et des ressources naturelles n'atteignent pas souvent les résultats escomptés (Cernea, 1986 ; Chambers, 1983). Les résultats mitigés de la plupart des projets peuvent être justifiés par quelques observations liées aux difficultés de compréhension et de prise en compte des dynamiques globales. La première observation concerne l'absence d'une meilleure articulation entre les échelles d'intervention des différents projets. On verra par exemple qu'il n'existe pas de lien explicite entre les projets nationaux ou régionaux et les projets locaux. Lorsque les uns font la gestion des terroirs en prônant l'agriculture vivrière pour assurer une autosuffisance alimentaire, les autres vont prôner l'intégration au commerce international. La deuxième observation concerne le manque de coordination et de cohérence entre les projets dont les finalités différentes sont définies par rapport à des disciplines. Lorsque certains ayant une finalité strictement écologique s'intéressent d'abord au maintien et voire à l'amélioration des conditions du milieu physique, les autres à finalité socio-économique vont s'intéresser à la réduction de la pauvreté et l'amélioration du bien être des populations. Des exemples d'interventions en milieu rural qui ont débouché sur des échecs, parce que n'ayant pas maîtrisé les dynamiques globales ou pris en compte les interactions entre les composantes de l'écosystème, existent dans la région de l'Extrême Nord du Cameroun.

L'un de ces exemples concerne le projet Mindif-Moulvoudaye qui a commencé en 1978, sous l'initiative conjointe du Gouvernement camerounais et de l'assistance américaine à travers l'USAID. C'était un projet agropastoral qui devait travailler sur le problème de surpâturage et ses conséquences relatives à la dégradation de l'environnement. La finalité du projet était d'intensifier l'élevage et la production agricole dans la zone d'étude. Mais les rapports d'évaluation montrent que le projet a commencé sans une compréhension globale de la situation socio-économique et environnementale de la zone (Van der Berg et Van Est, 1991). Les études menées étaient d'un caractère sectoriel au point que, le projet durant la phase d'implémentation s'est transformé en un projet pastoral. Une synthèse effectuée par Requier-Desjardin (2001) révèle que même l'objectif écologique de réhabilitation des pâturages n'a pas été atteint. Un autre exemple concerne le projet SEMRY II qui a abouti en 1979 à la mise en eau du Lac de Maga et au développement de la riziculture irriguée dans la plaine d'inondation du Logone suite à cette intervention. Cette région bien connue à l'échelle nationale et internationale pour l'importance de ses ressources naturelles et de sa biodiversité, a subi pendant plusieurs années de nombreux changements du système agricole et pastoral. En effet, la baisse dramatique du niveau des inondations a entraîné une transformation importante de l'écosystème de la plaine se traduisant par une modification de la végétation originelle, une baisse de la productivité des terres agricoles ainsi privées de limons et autres minéraux dissous, une réduction de la superficie des pâturages qui a débouché sur la surexploitation et la dégradation des pâturages résiduels (IUCN, 1996 ; Scholte, 2005). Même si les effets néfastes des changements climatiques sont établis, les études et recherches réalisées en vue de mieux comprendre la dynamique de cet écosystème dans une perspective de réhabilitation ont montré que les aménagements hydro-agricoles et

l'introduction de nouvelles cultures n'auraient pas été basés sur une bonne connaissance de l'environnement écologique et socio-économique de la plaine (Mouafo et al., 2002). De façon générale, les échecs de nombreuses politiques d'intervention en milieu rural sont en grande partie attribués à une connaissance insuffisante ou la non prise en compte de la structure d'ensemble et de la dynamique des écosystèmes étudiés dont il faut reconnaître la complexité. Dans le cas du projet SEMRY II, on peut penser que la plupart des acteurs n'ignoraient pas les conséquences de la construction du barrage, mais l'introduction de la riziculture semblait être le seul objectif et les connaissances que les acteurs avaient n'étaient ni explicites, ni partagées et donc non existantes pour la prise de décision. Cet exemple qui est abordé avec un peu plus de détails au chapitre 5 de cette thèse, montre l'intérêt de mettre en place des Systèmes d'Information et de connaissances spatiales, explicites et partagées qui auraient été utiles à l'époque de la mise en eau du barrage. Un avantage des approches spatiales et de l'utilisation de tels outils, c'est qu'ils invitent les acteurs à mieux comprendre et prendre en compte un contexte plus global que les objectifs visés par l'intervention. Dans le cas du projet Mindif-Moulvoudaye, le problème était beaucoup plus celui d'une très faible intégration disciplinaire et dans ce sens, une approche plus intégrée aurait été utile.

Avec l'émergence des problèmes environnementaux qui ont donné lieu en 1992 au sommet de la terre à Rio et la signature de plusieurs conventions internationales dans le cadre des Nations Unies, les concepts de durabilité et de développement intégré ont pris de l'importance. Les pays signataires des conventions se sont engagés à réduire les effets des processus de dégradation des terres, d'assurer la conservation et l'utilisation durable des ressources naturelles en s'appuyant sur une approche intégrée. L'approche écosystème recommandée par la convention sur la diversité biologique propose à cet effet plusieurs principes répondant à ces besoins de prise en compte des interactions dynamiques entre les composantes des systèmes étudiés et de la durabilité. Malheureusement, il existe très peu de travaux sur les liens dynamiques entre les processus de dégradation des ressources naturelles et les conditions démographiques, économiques et sociales dans ces régions. Le problème serait principalement lié à la nature complexe des systèmes agraires qui sont vus comme des agro écosystèmes. D'autre part, on a assisté au cours des deux dernières décennies à la mise en place de nombreux projets internationaux visant à développer des Systèmes d'Information sur l'Environnement le plus souvent sous dans le cadre d'observatoires environnementaux. Malgré cet intérêt croissant manifesté pour les SIE, les méthodes qui ont été conçues pour des applications de gestion simples restent inadaptées pour le développement de cette nouvelle génération de SI. Le travail de recherche réalisé dans cette thèse a donc pour finalité de contribuer à la définition et la spécification de l'architecture des SIE, que nous considérons comme une étape préalable à l'élaboration ou l'adaptation de toute méthode de conception appropriée (chapitre 6).

1.2.3. Démarche d'analyse et de conception de SIE adaptée à la complexité des systèmes agraires

Selon la Convention des Nations Unies sur la Diversité Biologique, un écosystème est défini comme un ensemble complexe et dynamique composé de plantes, des communautés d'animaux et leur environnement non vivant interagissant comme une unité fonctionnelle. Les systèmes agraires sont des écosystèmes modifiés par les activités humaines afin de produire les aliments, les fibres et d'autres produits dérivés de l'agriculture ou de l'élevage, conduisant ainsi à des systèmes plus ouverts dans la mesure où ils reçoivent et communiquent des flux divers sous forme de produits ou d'informations à travers des actions de gestion

(Convey, 1987). Les systèmes agraires présentent donc à priori un degré plus important de complexité. En effet, la complexité de ces systèmes agraires émerge des dynamiques spatio-temporelles des différentes formes d'utilisation de l'espace, du nombre important d'interaction entre ses composantes et de l'imbrication des échelles auxquelles opèrent les processus. Dans le cas des systèmes d'utilisation de l'espace par exemple, la complexité provient de l'existence d'un nombre important de facteurs qui se combinent pour influencer la structure de l'occupation du sol et les processus de changement d'utilisation de l'espace (Turner et al., 1995). Comprendre les processus sous-jacents aux changements d'occupation du sol observés et analyser les facteurs qui les déterminent est une priorité de la communauté scientifique impliquée dans les études sur le changement global. La compréhension de ces processus spatiaux en terme de diversité et de dynamique est également un préalable à toute intervention ou recommandation en vue d'une meilleure gestion de l'espace et des ressources naturelles à l'échelle régionale ou locale (Toxopeus, 1996).

L'analyse des systèmes agraires présente donc un enjeu important mais nécessite des approches appropriées pour les décrire, mieux comprendre leur fonctionnement et arriver à pronostiquer leur évolution. Si on considère l'espace comme le lieu où les systèmes socioéconomiques et les systèmes biophysiques interagissent pour produire les paysages agraires, la démarche adoptée pour la compréhension des systèmes agraires devrait intégrer nécessairement une composante spatiale (Loireau, 1998). En ce sens, une des clés du développement rural des régions de savanes africaines se retrouverait davantage dans l'organisation de l'espace (Pourtier, 2003). Plusieurs travaux en écologie se sont appuyés sur les approches systémiques et les théories des systèmes complexes pour mettre en évidence les propriétés des écosystèmes. Les notions de hiérarchie et d'échelle, de résilience et d'adaptabilité sont des concepts clés lorsqu'on analyse la structure et la dynamique d'un écosystème (Allen et Roberts, 1997). Ces concepts peuvent également être utilisés pour représenter et décrire les propriétés des systèmes agraires (chapitre 2). Dans cette même perspective, les approches de type modélisation revêtent également une très grande importance dans la mesure où elles permettent d'envisager et de tester plusieurs scénarios d'évolution de l'écosystème étudié. L'intérêt étant de faire des projections correspondant à des hypothèses données, d'apprécier les éventuelles conséquences et de mieux formuler les mesures d'anticipation. La modélisation est nécessaire parce que l'utilisation de l'espace est le résultat de processus complexes, exigeant des réflexions sur la non linéarité et les décalages spatio-temporels (chapitres 9 et 10).

Comme nous le montrerons dans les chapitres 2 et 3, de nombreuses approches et outils d'analyse et de modélisation des changements d'utilisation de l'espace ont été développés pour prendre en compte ces propriétés complexes des systèmes d'utilisation de l'espace. Leur application à des problèmes concrets dépend le plus souvent de plusieurs critères comme les objectifs visés par l'étude, la discipline scientifique, l'échelle d'analyse (Levin, 1992). La figure 1.1 adaptée de Verburg et Veldkamp (2001) montre que ces méthodologies ne peuvent être considérées isolément mais qu'elles devraient être intégrées et liées entre elles dans une séquence logique afin d'étudier la très vaste question de l'analyse des changements qui surviennent dans le système d'utilisation de l'espace. La démarche d'analyse du système d'utilisation de l'espace et la conception d'un SIE associé pourrait obéir à cette séquence. Les principales phases couvertes par cette séquence sont les phases d'identification du problème, de description du système, de conception, de négociation et de planification. Celles-ci correspondent aux principales phases de développement des SI classiques qui incluent le plus souvent l'analyse préalable, la conception du SI et la mise en oeuvre.

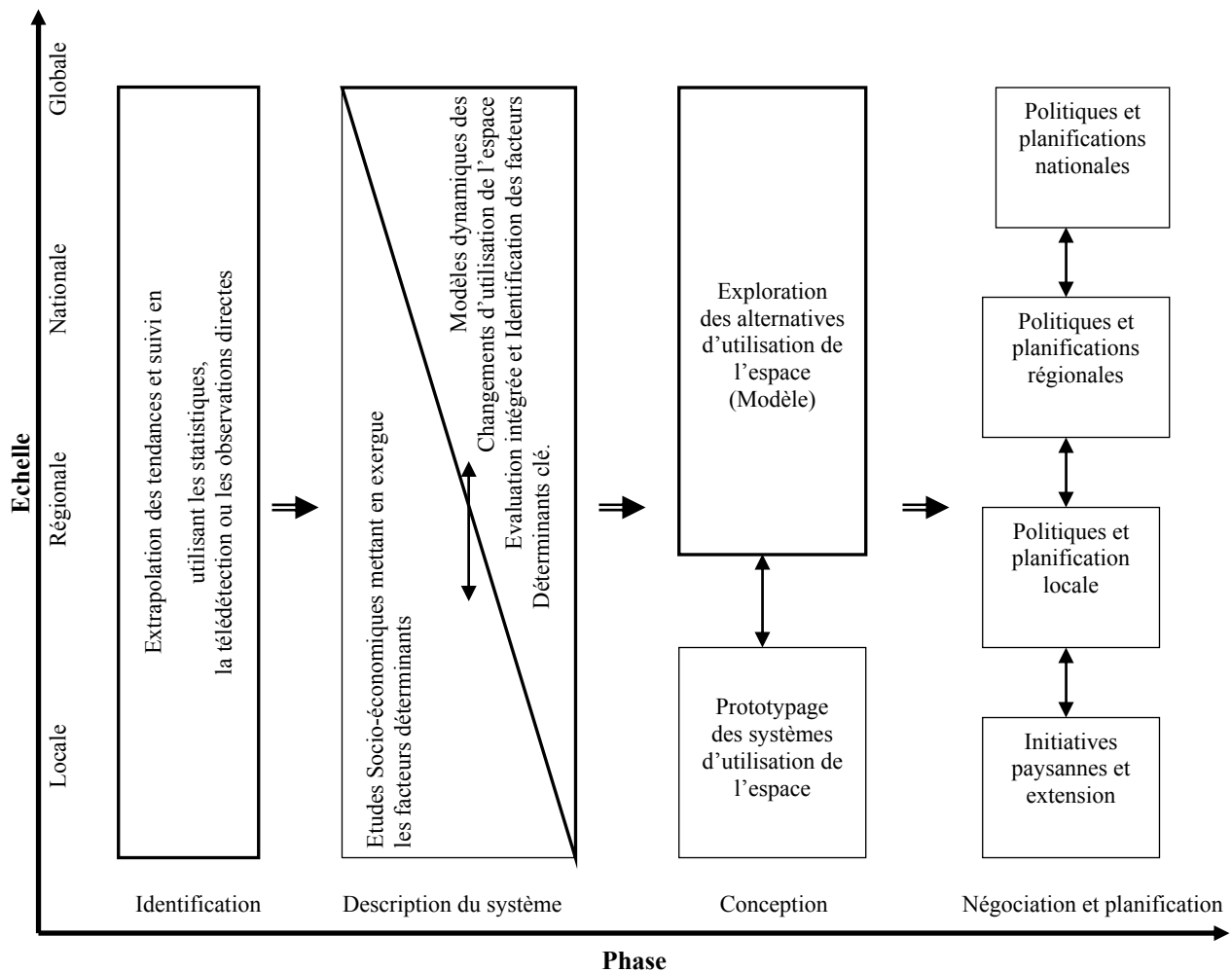


Figure 1.1 : Séquence des recherches contribuant à l'analyse des changements d'utilisation de l'espace.

1.3. Description de la zone d'étude

Le but ultime de cette recherche est de spécifier et développer un Système d'Information sur l'Environnement (SIE) utilisable dans le cadre de l'observatoire du développement des savanes d'Afrique centrale. Toutefois, l'étude s'est focalisée sur le cas spécifique des zones de savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. Dans cette section, nous introduisons le concept de savane et nous présentons ensuite les grands traits géographiques de la zone d'étude.

1.3.1. Les zones des savanes africaines

La savane représente un type de structure de végétation ou formation végétale composée d'une association herbeuse des régions tropicales pauvres en arbres et en fleurs, mais très fréquentée par les animaux (Dictionnaire de langue française, Petit Robert). La première utilisation du terme savane pourrait être retracée à 1535, par un certain Oviédo, à propos du Vénézuéla. Celui-ci désignait par ce terme les étendues de terrain sans arbres et avec des herbes plus ou moins hautes ou sans végétation. Ce terme a ensuite donné

lieu à un nombre d'interprétations différentes et parfois contradictoires. C'est ainsi qu'un congrès de spécialistes de groupements végétaux africains, tenu à Yangambi en 1956 a défini la savane comme une formation herbeuse comportant : une strate herbacée supérieure continue d'au moins 80 cm de haut qui influence une strate inférieure ; graminées à feuilles planes, basilaires et caulinaires ; ordinairement brûlées annuellement ; une strate de plantes ligneuses ordinairement présentes. Elle peut être herbeuse, arbustive, arborée ou boisée en fonction de la densité et du recouvrement des arbres (Hoock, 1971).

Les savanes peuvent être vues comme des milieux résultant d'une transformation des forêts où certains arbres sont éliminés sous l'effet d'actions anthropiques, de processus naturels comme les vents violents (savanes édaphiques) ou les changements climatiques globaux. Dans cette thèse, la savane est vue comme un milieu provenant des défrichements agricoles, des feux provoqués ou spontanés. Ces feux constituent un élément vital des savanes dans la mesure où ils permettent de mettre en valeur la fertilité accumulée par les ligneux. Toutefois, ils sont également une source de dégradation des ressources naturelles ou de conflit entre utilisateurs de ces milieux notamment les agriculteurs, les éleveurs et les chasseurs. Ntoupka (1999) a proposé un schéma général des trajectoires des formations végétales des savanes de la zone soudano-sahélienne du Nord Cameroun dans lequel il distingue une série d'états qui correspondent à différents types de savane ou de forêt : forêt claire et sèche, forêt plantée, savane boisée à graminées pérennes, savane arborée à *Anogéissus* et *Combretum* ou savane arborée à épineux, savane arbustive, savane herbeuse à graminée pérenne, savane herbeuse à graminée annuelle et savane très dégradée sur sol dégradé ou hardé. Les trajectoires de ces formations sont déterminées par l'intensité des pressions anthropiques et par les interventions effectuées telles que la protection, la restauration et la réaffectation.

Sur le plan géographique, les milieux de savanes correspondent à des espaces dont la délimitation spatiale est difficile étant donné la variabilité des critères biophysiques et climatiques qui permettent de les définir. En effet, les changements climatiques et les processus de modification de la végétation qui sont en cours créent des perturbations qui peuvent suggérer des décalages spatiaux de toute limite tranchée. On distingue par exemple à l'échelle mondiale, les savanes du Mexique, celles de la Guyane française en Amérique du Sud, les savanes de l'Inde et les savanes d'Afrique au sud du Sahara. La figure 1.2 montre que les savanes africaines sont situées dans la zone soudanienne et occupent une position médiane entre les zones sahéliennes d'extrême sécheresse au nord et les zones équatoriales caractérisées par une humidité permanente au sud (Mondain, 1993). Cette zone couvre une quinzaine de pays et correspond à une bande au climat semi-aride située entre le désert du Sahara et la zone tropicale humide, caractérisée par une très longue saison sèche. La végétation constituée de graminées et de ligneux, assure la transition entre les steppes sahéliennes au nord et les milieux de forêt dense au sud. L'équilibre de ces milieux dépend fortement des pluies qui déterminent les récoltes et la disponibilité des ressources pastorales (Pieri, 1989).

Sur le plan social, les zones des savanes africaines se caractérisent par les processus de développement et les mutations spatiales et politiques que ces milieux subissent. Contrairement aux zones sahéliennes où les activités sont principalement orientées vers le pastoralisme ou alors aux zones forestières où domine la figure du planteur et du nomade pratiquant l'agriculture itinérante sur brûlis, les zones de savanes quant à elles abritent une société paysanne, agropastorale, en majorité sédentaire ancrée dans le terroir. On y trouve souvent éleveurs qui pratiquent des mobilités pendulaires d'ampleur variable qui induisent une certaine complexité dans les modes d'organisation pour l'accès aux ressources.

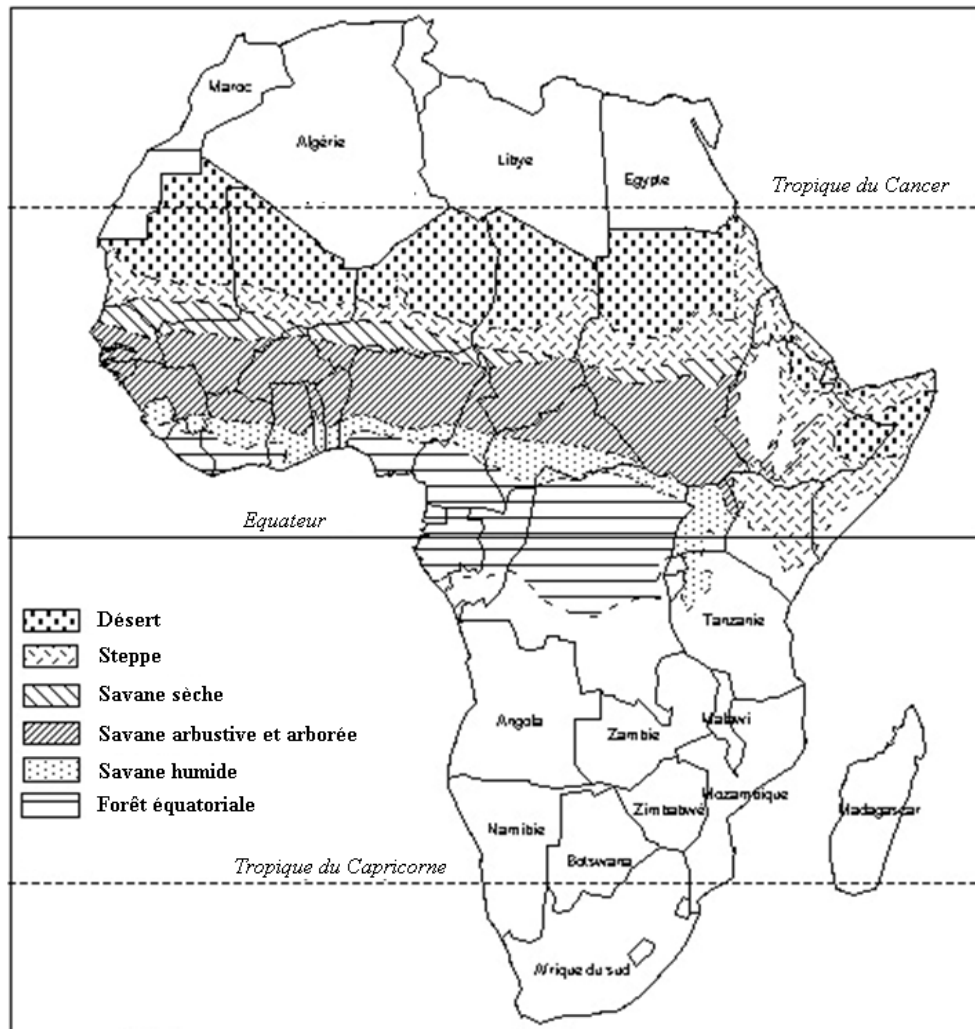


Figure 1.2 : Délimitation des savanes africaines entre le désert du Sahara et la zone tropicale humide (source : Mondain, 1993).

Les caractéristiques des zones de savanes varient également en fonction de l'échelle ou du niveau d'organisation. Au niveau local on peut observer dans l'espace des régularités qui autorisent la définition d'entités spatiales homogènes : les terroirs de savane. La structure d'ensemble de ces entités spatiales présente successivement les zones d'habitation au centre associées aux champs de case, des terres cultivées associées ou non à un parc arboré sélectionné et de brousses périphériques utilisées pour la chasse, la collecte de bois, la cueillette ou le parcours de troupeaux. Les territoires villageois sont ainsi constitués des utilisations de l'espace qui s'organisent en auréoles plus ou moins concentriques autour des zones habitées. Au niveau régional, on peut identifier des unités paysagères type qui forment des ensembles régionaux : paysages de savane. Vues à cette échelle, les zones de savanes sont des milieux ouverts associant graminées et ligneux, se distinguant clairement des milieux fermés de la forêt dense. Au niveau national ou étatique, les pays de savane sont souvent des états sahélo-soudaniens enclavés, par opposition aux états côtiers. Au niveau international, les régions de savanes constituent une zone à faible intégration dans l'économie mondiale mais dont la tendance à l'intégration est croissante si on considère le cas des zones de savanes d'Afrique de l'Ouest. La croissance démographique qui s'accompagne de la « saturation

foncière » que perçoivent certains auteurs à l'échelle des terroirs est un problème qui se pose à l'ensemble des savanes africaines (Pellissier, 1995).

1.3.2. Les zones de savanes de l'Extrême Nord du Cameroun

La zone d'étude est la province de l'Extrême Nord du Cameroun. Cette région correspond à une unité du zonage des grands ensembles de production des zones de savanes d'Afrique centrale (Beclier, 1997). A l'échelle nationale, la région de l'Extrême Nord du Cameroun appartient à un ensemble géographique plus vaste qui est communément appelé le grand Nord du Cameroun (figure 1.3). Ce grand ensemble qui inclut toutes les savanes camerounaises est composé des trois provinces les plus septentrionales du pays, qui présentent chacune des spécificités. La province de l'Adamaoua correspond à un paysage de hautes terres, dominé par de savanes humides et fait interface avec les régions de forêt équatoriale du Sud Cameroun. La province du Nord correspond à un paysage de cuvettes dominé par des savanes soudano-sahéliennes. La province de l'Extrême Nord est composée d'une mosaïque de paysages incluant les montagnes situées à l'ouest, et de basses plaines appartenant à la cuvette tchadienne.

La province de l'Extrême Nord couvre un total d'environ 34260 Km² et s'étend entre les latitudes 10° et 13° nord et les longitudes 13° et 15° Est. Elle est limitée à l'est par deux cours d'eau permanents : le Logone qui prend sa source sur les hautes terres de Ngaoundéré au sud et son confluent le Chari qui prend sa source au Tchad. Ces cours d'eau se jettent dans le lac Tchad qui constitue également la frontière au nord. La limite ouest avec le Nigeria est constituée dans sa partie méridionale par les monts Mandara, dans sa partie centrale sur terre ferme par une démarcation conventionnelle et dans sa partie septentrionale par l'El beid, un cours d'eau à écoulement temporaire qui se jette également dans le lac Tchad (figure 1.4). Le climat de la région est de type tropical ou soudanien. En effet, l'alternance entre une longue saison sèche et une très courte saison de pluies sur toute la zone définit un climat de type tropical. A l'exception de la bande des monts Mandara où on enregistre une pluviométrie annuelle moyenne de 975 mm, et qu'on peut caractériser de climat soudanien d'altitude humide, le reste de la zone a un climat marqué par une diminution des pluies annuelles et de la durée de la saison des pluies du sud vers le nord. Toutefois, les moyennes de pluie annuelles dépassant 700 mm, Suchel (1972) qualifie ce climat de soudanien. De plus, si on se réfère à la classification anglo-saxonne qui définit le Sahel comme un ensemble de régions où la pluviosité annuelle est inférieure à 500 mm, toute la zone se retrouverait dans la zone soudanienne.

La végétation ligneuse et herbacée présente à la fois les éléments des savanes soudano sahéliennes, des savanes sèches et des steppes sahéliennes. Letouzey (1968) caractérise la végétation des savanes soudanienne par la présence d'*Anogeissus leiocarpus* sur sols meubles non défrichés, et de *Boswellia dalzielii* sur les sols rocaillieux. Les plaines sud du Diamaré, les collines de Maroua et l'ensemble des monts Mandara où s'imposent ces espèces soudanienne ont amené ces auteurs à rattacher cette région à la zone soudanienne. Toutefois ces savanes soudanienne font interface dans sa partie nord avec des steppes à épineux sur sols lourds et argileux. Certaines de ces steppes sont le résultat de transformations de la végétation soudanienne suite à l'occupation humaine.

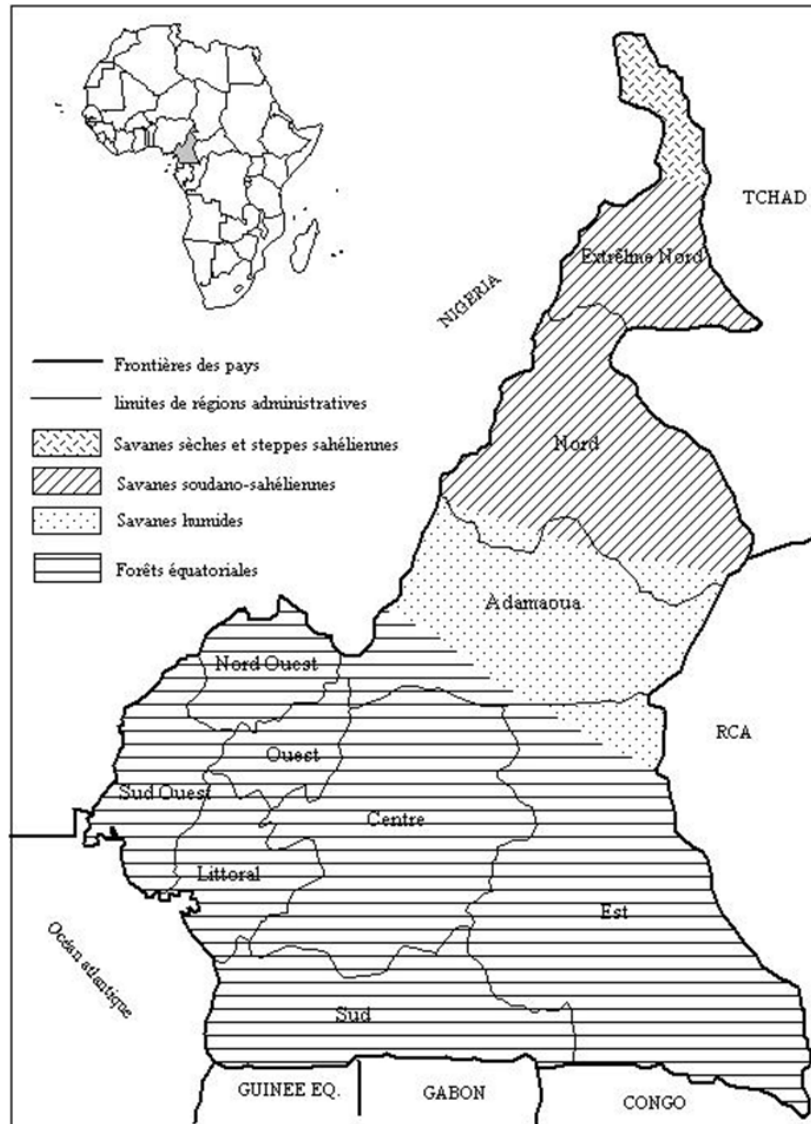


Figure 1.3 : Délimitation des grands ensembles écologiques du Cameroun. La zone d'étude est partagée entre les savanes sèches soudano-sahéliennes et les steppes sahéliennes.

L'influence des activités anthropiques et des changements climatiques contribuant à la propagation d'espèces végétales caractéristiques du Sahel. Letouzey (1968) distingue deux grands ensembles de végétation dans ce secteur soudano-sahélien : les prairies périodiquement inondées et les steppes à épineux. Les prairies inondées, localement appelées yaérés sont dominées par des espèces comme *Pennisetum ramosum*, *Echinochloa obtusifolia*, *E. pyramidalis*, *Eriocloa fatmensis*, *Oryza longistaminata*, *Corchorus olitorius*. Les steppes à épineux sont en fait des savanes arborées avec un tapis herbacé très irrégulier et dominées surtout par ces épineux que l'on retrouve généralement sur des vertisols ou sur des sols dégradés (hardé). Les espèces les plus représentées dans la strate ligneuse sont *Acacia hockii*, *Acacia seyal*, *Acacia ataxacantha*, *Acacia senegal*, *Albizia chevalieri*, *Balanites aegyptiaca*, *Combretum aculeatum*, *Dichrostachys glomerata*, *Ziziphus mauritania*, *Piliostigma reticulatum*, *Strychnos spinosa*, *Ximenia americana*. La strate herbacée est riche en espèces comme *Loudetia togoensis*, *Schoenefeldia gracilis*, *Aristida spp.* ou *Pennisetum pedicellatum*.

La région de l'Extrême Nord du Cameroun est caractérisée par une grande diversité de paysages naturels qui, en fonction de leur pente, du type de sol ou de leur capacité de rétention en eau, offrent des conditions et des opportunités différentes d'occupation du sol et d'usages. On passe d'ouest en Est, d'un relief de montagne très accidenté dans la zone des monts Mandara à d'immenses plaines d'inondation le long du fleuve Logone, en passant successivement par des piémonts et des plaines intérieures de Mora, du Diamaré, de Kaélé et du Bec de Canard (figure 1.4).

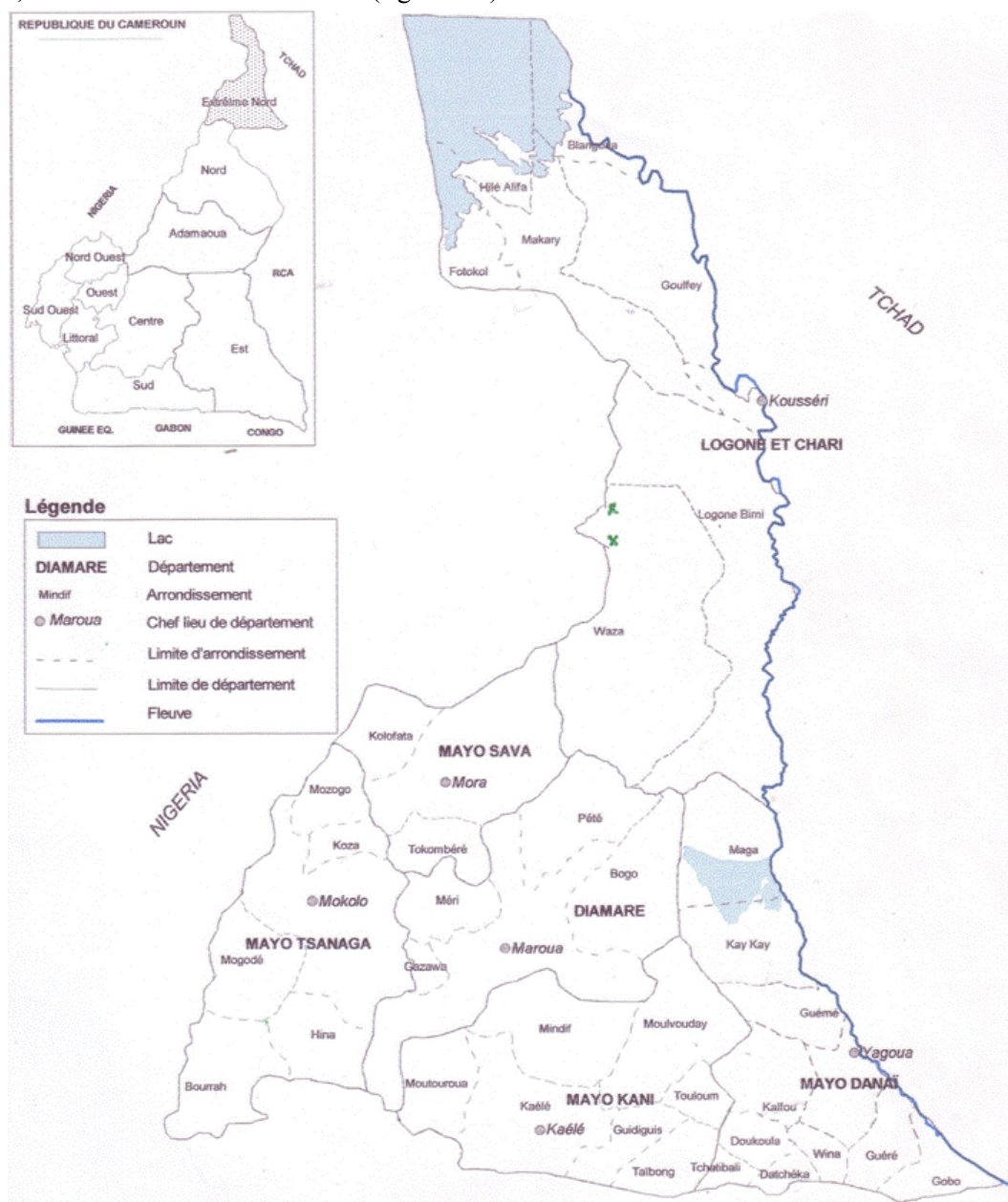


Figure 1.4 : Localisation de la région de l'Extrême Nord du Cameroun

Les monts Mandara constituent une bande de massifs montagneux longue de 150 Km à cheval entre la frontière camerounaise et Nigériane. Cette bande s'étend au Cameroun sur une largeur d'environ 50 km. L'altitude contribue à une réduction importante des températures et favorise les pluies. L'occupation du sol

tient ici compte en priorité de la pente qui s'impose comme le facteur naturel le plus contraignant. Les piémonts sont constitués des basses terres recevant les épandages des montagnes. Ils présentent des conditions privilégiées pour l'occupation humaine avec des sols plus riches et plus profonds. C'est le domaine des *Acacia albida* sélectionnés et entretenus dans les champs par les populations sous forme de parc arboré. Cette zone conquise au 19^{ème} siècle par les Foulbés, les Sirata et les Mandara a servi de relais pour la surveillance des montagnards. Elle a ensuite été une zone d'accueil des populations venant des montagnes voisines. Toutefois le transfert des populations s'est heurté au droit foncier institué par la conquête peule (MINEF, 1993). Les plaines des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun se subdivisent en quatre sous-ensembles : (1) les plaines argilo-sableuses de Mora, (2) les plaines argileuses du Diamaré et la pénéplaine de Kaélé, (3) les plaines sableuses de Kalfou et du Bec de Canard sur le bassin tchadien, et enfin (4) la plaine d'inondation du Logone sur la dépression tchadienne qui est séparée des autres plaines par un cordon dunaire. En se déplaçant du cordon dunaire vers les rives du Logone, les sols sont composés successivement d'une petite bande de terre sableuse d'une vingtaine de kilomètre et d'une très vaste bande de terres argileuses noires (karal) plus ou moins inondées. Les paysages de ces zones sableuses présentent d'une part, une physionomie de hardé dominée par une végétation parsemée de *Balanites aegyptiaca* et *Lannéa Humilis*, et d'autre part des bas fonds humides portant une végétation plus dense constituée d'*Anogéissus leiocarpus* et d'*Acacia*. Les vastes plaines argileuses se présentent sous deux formes de paysage, en fonction de l'importance de l'inondation : les karals qui ne connaissent qu'une inondation superficielle mais régulière pendant quelques mois de l'année et les Yaérés dont l'inondation d'une profondeur et d'une durée plus importante provient du déversement des eaux du Logone. La végétation des Karals est dominée, dans la strate arbustive, par les acacias (*seyal* ou *nilothica*), la strate herbacée plus présente en saison des pluies, atteint 2 à 3 mètres. Selon Letouzey (1968), tous les Karals comportaient une végétation boisée. Les karals sans strate ligneuse ont certainement subi un déboisement. La végétation caractéristique des Yaérés est par contre une savane herbeuse qui s'assèche au retrait des eaux. L'absence de végétation arborée s'explique par les alternances brutales du sol entre les périodes d'engorgement et d'assèchement prolongé.

1.4. Problématique des dynamiques agraires dans la zone d'étude

1.4.1. Contexte des zones de savanes d'Afrique centrale

Les pays de zones de savanes d'Afrique centrale sont confrontés au défi commun de l'Afrique tropicale qu'est l'explosion démographique qui rend les changements inéluctables : développement d'une agriculture périurbaine, création de marchés potentiels pour les produits agricoles, et besoins de systèmes de production plus intensifs ou accédant à de meilleures plus-values. La révolution urbaine est une expression de cette mutation sociale. Le doublement de la population en une génération soulève l'épineux problème de disponibilité et de gestion durable des ressources naturelles (Pourtier, 2003). Dans les zones à forte densité de population, les paysans ne disposent plus, à système de mise en valeur constant, de réserve de terre. Ce qui limite les possibilités de défrichements et la pratique de la jachère avec certains corollaires tels que la baisse de la fertilité des sols et les flux migratoires. Dans ce contexte, la question concernant la capacité de ces milieux à supporter les nouveaux besoins d'une population croissante prend de l'importance. La tendance à l'échelle régionale et les modes d'utilisation de l'espace montrent qu'on passe progressivement et inéluctablement d'un espace ouvert à un espace limité. Pieri (1989) traduit bien cette conception de la

trajectoire des formes d'utilisation de l'espace en affirmant que « tous les terroirs, quel que soit leur degré de peuplement initial enregistrent une montée de la pression démographique et une reproduction homothétique des systèmes de production qui les amènent tôt ou tard à une saturation de l'espace ». Dans les zones encore très peu peuplées, les réserves en terre sont considérables mais ne sont pas toujours accessibles du fait des conflits liés à leur exploitation par plusieurs communautés d'utilisateurs dont les pratiques et les intérêts peuvent être divergents. Les populations sédentaires doivent s'adapter avec l'arrivée des populations migrantes alors que les éleveurs doivent s'adapter à l'extension des surfaces cultivées qui sont des corollaires de l'accroissement de la population rurale. L'un des multiples enjeux de développement des zones de savanes d'Afrique centrale dans ce contexte est l'appui à la planification et à la gestion des espaces et des ressources naturelles aux échelles appropriées (région, zone de référence ou territoire villageois) en s'appuyant sur les connaissances acquises par la recherche ou par des cellules de suivi-évaluation des projets de développement (Bisson et Dugué, 1999). Cette orientation est d'autant plus pertinente lorsqu'on sait que les services en charge de cette planification dans ces régions, ne disposent pas des informations nécessaires comme des cartes d'occupation du sol actualisées ou les statistiques agricoles et les recensements fiables de la population ou du bétail.

1.4.2. Cas des savanes de l'Extrême nord du Cameroun

La région de l'Extrême Nord du Cameroun en particulier est caractérisée par des fortes densités de population, d'importants flux migratoires et une prédominance des activités agro-pastorales. La répartition de la population n'est pas uniforme. La densité moyenne estimée à 50 hab./km² en 1987 est passée à 75 hab./km² en 2002 et on atteint 300 hab./km² par endroits. La population essentiellement rurale a été estimée à 80% de la population totale (RGPH, 1987). Le secteur agricole y est en pleine expansion du fait qu'il constitue la principale activité et se traduit par l'extension des surfaces cultivées. Le cotonnier y est resté longtemps la principale culture de rente. La production cotonnière à l'Extrême Nord du Cameroun est toutefois marginale au regard des rendements et de la production de l'ensemble des zones de savanes d'Afrique Centrale. La production vivrière est assez forte, associée à l'élevage qui est considéré comme une source d'investissement importante. On note qu'une très grande diversité de cultures vivrières est pratiquée parmi lesquelles le sorgho pluvial, le sorgho de contre saison ou *Muskuwaari*, le maïs, l'arachide, le haricot, le riz, et l'oignon. En 1992, les terres agricoles incluant les terres cultivées et les jachères de courte durée étaient estimées à 24% pour les provinces du Nord et de l'Extrême Nord et des projections prévoyaient qu'en 2002, 90% des terres de l'Extrême Nord uniquement, serait à vocation agricole (BONIFICA, 1992). Même si les données concernant l'occupation du sol ne sont pas toujours disponibles sur l'ensemble de la région, la situation actuelle ne serait certainement pas très loin de ces prévisions.

Dans le même sens que les projections effectuées par BONIFICA (1992) au sujet de l'extension agricole, de nombreux auteurs ont signalé de profondes transformations du paysage agraire et de l'utilisation de l'espace au cours des dernières décennies. Pour justifier une étude par télédétection, Triboulet (1995) a montré que ces transformations se manifestent à travers les paysages de la plaine du Diamaré. L'un des problèmes assez préoccupant de cette région est relatif aux faibles rendements de la production agricole qui est restée presque stable au cours des trois dernières décennies (Njomaha, 2004) alors que les besoins de la population ont continué à augmenter du fait de la croissance démographique. Les populations en quête d'espace cultivable et de pâturage exercent des pressions importantes sur les terres qui conduisent à la saturation foncière (Seignobos et al., 1995; Timmermans, 1998), à la dégradation des sols (Obale-

Ebanga, 2001) et des ressources ligneuses (Madi et al., 2003). A l'origine de ces transformations, on peut également citer à côté de la très forte pression démographique, les courants migratoires qui ont marqué l'histoire de cette région (Berghausser, 1996), le déplacement des troupeaux venant des zones sahéliennes à la recherche de nouveaux pâturages (Ligthart, 1993; Moritz, 1994), le problème que pose l'accès au bois de feu par les ménages et son impact sur les zones d'approvisionnement (Assan, 1991; Van Well, 1998). Le foisonnement de tous ces processus au sein d'un même territoire est de nature à déboucher sur des conflits d'activités, la dégradation de la productivité du milieu et la perte de sa biodiversité. A ces processus classiques, est venu se combiner très récemment, un processus particulier : l'extension de la culture du sorgho de contre saison qui se poursuit au-delà des terres traditionnelles, sur des terres auparavant jugées marginales, ce qui contribue significativement à la saturation foncière. Cette dynamique spécifique de la culture du sorgho de contre saison aurait profondément modifié l'organisation des espaces agricoles et pastoraux dans l'ensemble du bassin du lac Tchad au cours des trois dernières décennies (Raimond, 1999).

Malgré la qualité et le nombre important des travaux, la littérature actuelle sur la zone d'étude manque de travaux récents sur une analyse globale des changements de l'occupation du sol et des facteurs déterminants. Les travaux de Triboulet (1995) ont fourni des premiers éléments de base pour la caractérisation des paysages à partir de la télédétection. Toutefois, cette étude s'est limitée à une analyse saisonnière des transformations du paysage. L'observation des changements d'occupation du sol sur une échelle de temps plus grande serait plus appropriée pour l'analyse et la compréhension des grandes dynamiques régionales. Une étude plus récente a été menée par Yengue (2000) mais porte spécifiquement sur l'évolution du couvert ligneux de la région. Les études de BONIFICA (1992) et Beauvilain (1984) sont relativement plus anciennes et fournissent des informations sur les changements de l'occupation du sol dans des zones spécifiques sans faire explicitement un lien entre ces changements et les facteurs déterminants potentiels. Dans ce contexte, l'étude de la dynamique des paysages agraires, des changements d'occupation du sol à plusieurs échelles dans une perspective d'analyse des facteurs déterminants et de modélisation de la compétition entre les différentes formes d'utilisation de l'espace prend de l'importance.

L'analyse des dynamiques agraires en termes de problèmes et d'objectifs, structurés en fonction des liens de cause à effet a permis de construire une représentation graphique des processus de changement d'utilisation de l'espace, leurs causes et leurs conséquences. Ce modèle graphique obtenu est un arbre à problèmes qui met en exergue les interconnexions entre les problèmes potentiels, les processus en cours et les conséquences ou les solutions alternatives (Toxopeus, 1996). On arrive ainsi à connecter l'ensemble des dynamiques d'utilisation de l'espace avec les dynamiques sociales, économiques et politiques. L'analyse peut ensuite être focalisée sur un problème spécifique ou prioritaire dont les processus correspondant seront étudiés, tout en examinant les relations de cause à effets avec les autres processus ou problèmes du système tel que spécifié dans le graphique. L'arbre à problème de la figure 1.5 montre que les dynamiques agraires de la zone d'étude se traduisent dans l'espace par trois principaux processus qui correspondent aux principales formes d'utilisation de l'espace : l'extension des terres cultivables, la disparition des formations boisées de savanes, la dégradation et la raréfaction des zones de pâturages. La production agricole de la région, assez diversifiée est en grande partie de type extensif dans la mesure où la principale stratégie actuelle d'augmentation de la production repose

sur l'augmentation des superficies cultivées. La culture du coton et la culture du sorgho de contre saison (Muskuwaari) jouent un rôle déterminant dans le processus d'extension agricole qui occupe une place centrale dans les mutations en cours. Dans plusieurs des cas étudiés, ces trois processus ont conduit à la saturation foncière avec les nombreuses conséquences environnementales liées à la dégradation des pâturages, des ressources ligneuses et des terres agricoles. On assiste à une compétition plus importante entre les acteurs et les formes d'utilisation de l'espace qui peut être source de conflits. La réponse paysanne la plus couramment observée est le déplacement des populations vers les zones les plus productives confirmant une forte prédominance de la thèse Malthusienne. Très peu d'exemples indiquent une évolution vers des systèmes plus intensifs et durables caractérisés par des innovations. Ce modèle porte à croire que les transformations des paysages agraires et les changements d'occupation du sol dans cette région sont comme dans la plupart des régions tropicales liées à la pauvreté et au sous-développement qui sont considérés comme des conséquences et des causes dans une boucle qui se réitère au cours du temps (Lambin, 1994).

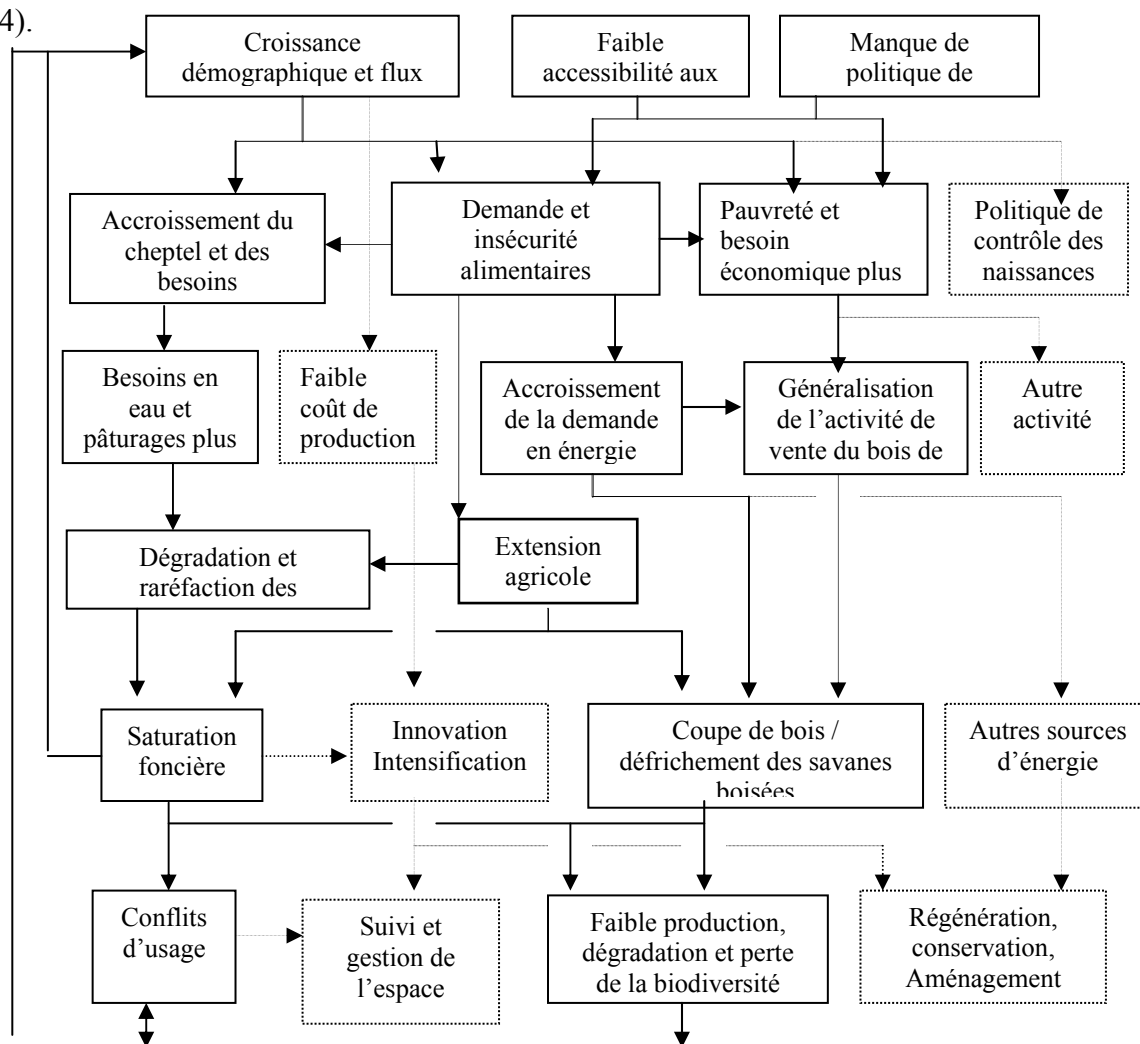


Figure 1.5 : Un modèle descriptif des dynamiques en cours dans la zone d'étude. Les flèches et cases en trait continu représentent les phénomènes ou processus couramment observés alors que ceux en pointillé représentent des trajectoires alternatives ou souhaitables.

On a observé en particulier au cours des deux dernières décennies un intérêt de plus en plus croissant des producteurs pour la culture du sorgho de contre saison qui conduit à une extension des surfaces cultivées au détriment de la brousse, en particulier dans les zones de plaines argileuses. Cette culture présente de nombreux avantages mais l'ampleur de la pression et les pratiques culturelles associées peut avoir des conséquences sur la durabilité des ressources forestières et des terres agricoles. Cette culture qui est apparue dans le Nord Cameroun vers le début du 19^{ème} siècle était initialement destinée uniquement à l'autoconsommation (Seignobos, 1998). Aujourd'hui, elle entre dans le circuit local et de plus en plus dans le circuit régional de commercialisation des produits agricoles. Dans ce contexte, la connaissance de l'extension actuelle et des évolutions en rapport avec les facteurs socio-économiques et biophysiques, sont des enjeux majeurs pour le développement agricole et rural des localités de la zone d'étude. C'est ce qui justifie l'attention portée à l'étude des conséquences de l'extension de la culture du sorgho de contre saison sur la dynamique globale du système agraire des zones de savane de l'Extrême Nord du Cameroun (chapitre 7). Etant donné que nous ne disposons pas toujours de données statistiques ou dans certains cas, seulement des données incomplètes, fragmentaires ou peu fiables sur l'évolution des différentes formes d'utilisation de l'espace, la télédétection peut être d'une grande importance. Toutefois la qualité des images satellites enregistrées, la couverture irrégulière et l'hétérogénéité des structures spatiales des paysages agraires de la zone d'étude constituent une contrainte majeure et nécessitent de proposer et appliquer une méthode de traitement, d'analyse et d'interprétation adaptée afin de tirer le maximum d'interprétation des processus étudiés.

1.5. Objectif de l'étude et questions de recherche

L'objectif général cette recherche est de spécifier et développer un Système d'Information sur l'Environnement (SIE) pour les zones de savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. La finalité d'un tel Système d'Information étant de mettre à disposition des informations et connaissances nécessaires à une meilleure compréhension de la structure et des dynamiques des systèmes agraires. Ce SIE devrait permettre de : 1) caractériser à différentes échelles, les grandes dynamiques agraires survenues au cours des dernières décennies ; 2) explorer les facteurs déterminants potentiels et identifier les relations avec la structure et les changements d'utilisation de l'espace ; et 3) simuler les dynamiques d'utilisation de l'espace en vue d'explorer les trajectoires d'évolution des changements d'utilisation de l'espace.

Les principales questions de recherche que nous avons essayées de répondre dans cette perspective sont les suivantes : 1) comment peut on représenter les systèmes agraires et décrire leur dynamique de manière à mieux comprendre leur fonctionnement ? 2) quels sont les théories, approches et les outils les plus appropriés pour analyser les dynamiques agraires ? 3) quelles sont les spécificités et la structure d'un SIE destiné à l'analyse des dynamiques d'utilisation de l'espace ? 4) quelle est la démarche la plus appropriée pour la conception et la mise en œuvre de ce type de SI ? En faisant un aperçu de ces questions de recherches, on distingue d'une part des questions méthodologiques liées à l'analyse des dynamiques agraires et la conception des SIE, d'autre part des questions substantielles concernant le fonctionnement du

système agricole de la zone d'étude et enfin, des questions plus spécifiques liées à la modélisation. Ces observations ont conduit à organiser le contenu de cette thèse autour de trois principales parties telles que, la succession des chapitres et leurs articulations conduisent à un ensemble cohérent qui donne une réponse compréhensible aux différentes questions.

Les questions de recherche 1 et 2 sont abordées dans la première partie de cette thèse qui regroupe les théories et outils pour l'analyse et de modélisation des dynamiques agricoles. Le chapitre 2 est une synthèse des concepts et théories relatifs à la dynamique des systèmes agricoles et des approches pluridisciplinaires qui sont sollicitées pour l'analyse et la modélisation. Les concepts d'occupation du sol, d'utilisation de l'espace, de dynamique, de territoire et de système agricole qui sont centraux dans cette thèse sont clarifiés. Les théories et modèles de changement d'utilisation de l'espace qui servent de support conceptuel à notre analyse sont introduits. Le chapitre 3 décrit les outils et modèles utilisés, ainsi que les choix méthodologiques effectués pour analyser les changements d'utilisation de l'espace dans la zone d'étude. Il s'agit notamment des outils de la télédétection et de traitement d'image qui sont utilisés pour identifier les structures et les changements d'occupation du sol, les outils de Système d'Information Géographique (SIG) et d'analyse spatiale qui sont utilisés pour représenter les phénomènes géographiques, les outils et le modèle statistique utilisés pour quantifier les relations entre les structures d'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants, et les outils de simulation des dynamiques d'utilisation de l'espace.

Les questions 3 et 4 sont abordées dans la deuxième partie de cette thèse qui est consacrée à l'analyse et la conception de SMALL Savannah, un SIE conçu pour l'analyse intégrée des dynamiques d'utilisation de l'espace dans les zones de savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. Le chapitre 4 décrit le dispositif multi-échelle sur lequel repose ce système d'information et montre comment les problématiques d'échelle sont prises en compte au cours des phases d'analyse, de conception et de mise en œuvre. Le chapitre 5 est consacré à l'analyse préalable de la structure de l'utilisation de l'espace et des dynamiques agricoles de la zone d'étude. Cette description empirique fournit des connaissances sur la problématique et le fonctionnement du système d'utilisation de l'espace. Le chapitre 6 porte sur la spécification de l'architecture fonctionnelle et informatique de SMALL Savannah.

La mise en œuvre de SMALL Savannah est présentée dans la troisième partie de cette thèse qui fournit des résultats correspondant aux objectifs spécifiques fixés par cette étude. Le premier objectif spécifique est de caractériser la structure et les dynamiques des systèmes agricoles au cours des dernières décennies en les reliant aux grands processus sous-jacents. Le chapitre 5 fournit des résultats correspondant à cet objectif en décrivant l'occupation du sol et l'évolution des formes d'utilisation de l'espace associées à l'échelle de la région de l'Extrême Nord du Cameroun. Les dynamiques agricoles observées dans les différentes zones agroécologiques au cours des deux dernières décennies sont analysées à la lumière des théories et modèles introduits au chapitre 2. Le chapitre 7 propose une caractérisation des systèmes agricoles à base de sorgho de contre saison. Les analyses effectuées fournissent des informations sur les causes et les conséquences de l'extension récente de la culture du sorgho de contre saison aux échelles régionales et locales en mettant en exergue les interactions avec les autres formes d'utilisation de l'espace. Le chapitre 8 porte sur une évaluation des changements d'occupation du sol et une analyse multi-niveau des dynamiques d'utilisation de l'espace sur la région autour de Maroua, le principal centre urbain. A cet effet, la méthode d'analyse d'images présentée au chapitre 3 a été appliquée à un couple d'images satellites pour extraire les structures

d'occupation du sol et caractériser leur forme d'organisation spatiale. L'analyse spatiale des changements est faite à plusieurs niveaux en vue d'affiner les hypothèses sur les facteurs déterminants les changements d'utilisation de l'espace et montrer comment les processus régionaux se traduisent au niveau local.

Le deuxième objectif spécifique est d'explorer l'ensemble des facteurs déterminant les structures d'utilisation de l'espace et leurs interactions dans les processus de changement observés. La collecte et la structuration sous forme de base de données géographiques, les données sur les facteurs déterminants potentiels de type biophysiques, sociodémographiques et géoéconomiques. Le chapitre 5 a permis de faire une revue de la littérature et une synthèse des connaissances concernant les interactions entre la structure de l'utilisation de l'espace et les potentiels facteurs déterminants. Le chapitre 9 porte sur une exploration spatiale et quantitative des facteurs déterminants l'utilisation de l'espace et ses changements. La méthode proposée de type spatio-statistique, combine une approche inductive et déductive. On arrive ainsi à construire les modèles de prédiction les plus pertinents qui représentent les interactions entre l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants.

Le troisième objectif spécifique est de construire un modèle intégré de simulation en vue de mieux expliciter les dynamiques en cours et projeter les changements d'utilisation de l'espace dans un avenir proche. Une revue des approches de modélisation et de simulation des changements d'utilisation de l'espace est effectuée afin d'identifier celles qui paraissent les plus appropriées aux questions de recherche (chapitres 2 et 9). Le chapitre 10 décrit une première version du modèle intégré de simulation des changements d'utilisation de l'espace appliqué à une petite région autour de Maroua. Dans ce chapitre, une validation des prédictions du modèle est effectuée et les simulations sont conduites pour trois scénarios d'évolution différents. Le premier correspond à une extrapolation linéaire des tendances observées et les deux autres correspondent aux trajectoires d'évolutions telles que formulées par les thèses de Boserup et de Malthus. Les résultats de la simulation permettent d'explorer les scénarios d'évolution des changements et des modes de gestion de l'espace par les acteurs du développement rural. En conclusion, le chapitre 11 propose une synthèse de la démarche d'analyse suivie tout au long de ce travail de recherche et une discussion des résultats obtenus. Les implications de ces résultats sur le plan scientifique et pour le développement rural de la région sont abordées. Ce chapitre présente les limites des méthodes et modèles développés et ouvrent ainsi de nouvelles perspectives de recherche et de développement durable des espaces ruraux de la zone d'étude.

Partie 1

Théories et outils pour l'analyse intégrée et la modélisation des changements d'utilisation de l'espace

Chapitre 2. Théories et concepts pour l'analyse intégrée des changements d'utilisation de l'espace

Chapitre 3. Outils pour l'analyse et la modélisation intégrée des changements d'utilisation de l'espace



Photo 2. Une scène de pêche dans la plaine d'inondation du Logone, entre le lac de Maga et le fleuve Logone, en novembre au moment du retrait des eaux.

Chapitre 2. Théories et concepts pour l'analyse intégrée des changements d'utilisation de l'espace

Résumé

Les systèmes agraires sont des écosystèmes modifiés par les activités humaines, liées à différentes formes d'utilisation de l'espace, conduisant ainsi à des systèmes plus ouverts, et donc plus complexes. La complexité de ces systèmes émerge des dynamiques spatio-temporelles, du nombre important d'interactions entre ses composantes et de l'imbrication des échelles auxquelles opèrent les processus. La compréhension de ces liens interactifs et dynamiques est une priorité pour le développement durable des communautés rurales. C'est une étape préalable pour le développement des outils de gestion et d'aide à la décision. L'espace en tant que support des activités humaines et des processus naturels, est au centre des interactions au sein des systèmes d'utilisation de l'espace. Les concepts liés à ce sujet sont souvent ambigus d'une discipline à une autre ou d'un courant de pensée à un autre. Les approches existantes n'intègrent pas toujours explicitement les aspects spatiaux et sont influencées par les traditions disciplinaires qui ne permettent pas toujours de considérer l'influence de toutes les composantes du système et fournir une compréhension plus complète. Cette thèse propose une démarche interdisciplinaire et intégrée qui est appliquée à l'analyse des dynamiques d'utilisation de l'espace dans la région de l'Extrême Nord du Cameroun. La démarche qui s'articule autour des approches d'analyse spatiale, d'analyse systémique et de modélisation dynamique vise à prendre en compte les propriétés complexes des systèmes d'utilisation de l'espace. Ce chapitre est consacré à une description des concepts et théories relatives aux changements d'utilisation de l'espace et une présentation des principes de cette démarche.

Mots clés : dynamique des systèmes agraires, interaction, échelle et hiérarchie, occupation du sol/utilisation de l'espace, théorie des systèmes, analyse intégrée.

Abstract

Agroecosystems are ecosystems modified by human activities for a variety of land use purpose, and leading to more open and more complex systems. The complexity of these systems stems from the existence of spatial and temporal dynamics, in combination with a large number of interactions and cross-scale processes. A better understanding of these interactive linkages is of great importance for the sustainable development of rural communities. This is a preliminary step in the development of management and decision support tools. Land, which supports both human activities and natural processes, constitutes the backbone of the interactions within land use systems. The main concepts related to this subject are ambiguous depending on the discipline or scientific thought. Existing approaches for analysing land use are not always spatial explicit and are influenced by traditions in disciplines which do not always allow to consider the influence of all the system components in order to provide a more complete explanation. This thesis proposes an interdisciplinary and integrated approach which is applied for the analysis of land use change in the far north region of Cameroon. The approach appropriately combines spatial analysis techniques and system theories with modelling in order to capture key characteristics and the complex nature of agroecosystems. This chapter describes concepts and theories related to land use change and presents the principles of this approach.

Key words: agroecosystem dynamics, interaction, scale and hierarchy, land use/cover, system theory, integrated analysis.

2.1. Introduction

Les principales préoccupations dans l'analyse ou la gestion des questions environnementales en Afrique sont le plus souvent liées aux changements d'utilisation de l'espace comme la déforestation, l'érosion ou la dégradation des sols, la perte de la biodiversité, l'intensification agricole, etc (Bilsborrow, 1992). Ces changements affectent les conditions sociale, économique et écologique des zones concernées. Les effets sociaux comprennent le changement du niveau de vie, d'éducation et des conditions de santé (Turner et al., 1995). Les répercussions économiques des changements d'utilisation de l'espace incluent le changement des revenus des ménages et des prix des biens et services (O'Neill et al., 1993). Sur le plan écologique, les processus de changements d'utilisation de l'espace affectent directement l'occupation du sol qui a de nombreuses implications relatives à la biodiversité, à la désertification et aux changements climatiques (Turner et al., 1997). La compréhension de ces changements présente donc un double enjeu : celui du développement des communautés rurales concernées et celui de la communauté scientifique mondiale travaillant dans le domaine des changements environnementaux. L'objectif général dans ce domaine est de contribuer à améliorer notre compréhension sur les causes et les conséquences des dynamiques d'utilisation de l'espace à différentes échelles spatiales et temporelles. Une attention particulière est portée sur l'amélioration de notre capacité à modéliser et projeter de tels changements. Cet objectif se traduit dans le programme scientifique du groupe LUCC¹ (Land Use and Cover Change) par cinq grandes questions qui orientent les recherches dans ce domaine : 1) comment l'occupation du sol a-t-elle évoluée sous l'influence de l'utilisation humaine au cours des années antérieures ? 2) quelles sont les principales causes sociales de ces changements d'utilisation de l'espace dans les différents contextes géographiques et historiques ? 3) comment les changements d'utilisation de l'espace pourront-ils affecter l'occupation du sol dans les années à venir ? 4) comment les dynamiques humaines et biophysiques affectent-elles la durabilité d'utilisations spécifiques de l'espace ? 5) comment les changements climatiques globaux affectent-ils l'occupation du sol et l'utilisation de l'espace et inversement ? Le projet LUCC est un programme international et interdisciplinaire visant à améliorer la compréhension des dynamiques de changement d'occupation du sol et d'utilisation de l'espace et leur relation avec les changements environnementaux et globaux. Les réponses à ces grandes questions, contribueraient significativement à améliorer notre compréhension des facteurs déterminant les changements d'utilisation de l'espace (variables exogènes), les conséquences des utilisations de l'espace sur l'occupation du sol, la variabilité temporelle et spatiale des changements d'occupation et d'utilisation de l'espace, les modèles régionaux et globaux ainsi que les projections des changements.

Pendant plusieurs décennies, les travaux visant à comprendre les changements d'utilisation de l'espace se sont basés sur des approches très simplifiées. Ces dernières étant influencées par les traditions disciplinaires, examinent le plus souvent les effets socioéconomiques et écologiques de façon indépendante ou alors se focalisent sur une échelle à priori. Dans cette même perspective, plusieurs chercheurs notamment en sciences naturelles supposent que la projection des changements d'utilisation de l'espace dans le futur est facile. Dans ces cas, les changements considérés sont principalement la conversion des forêts pour l'utilisation agricole ou la destruction de la végétation naturelle suite au surpâturage, conduisant aux conditions désertiques. Ces conversions sont supposées irréversibles,

¹ Le projet LUCC est une composante des grands programmes IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) et IHDP (International Human Dimensions on Global Environmental Change)

homogènes dans l'espace, et évoluer de façon linéaire. La croissance de la population et dans une moindre mesure l'augmentation des besoins de consommation, sont considérées comme les seuls facteurs déterminant l'utilisation de l'espace. Ces approches et modèles, qui ont été développés pour répondre à des questions spécifiques, ne sont pas donc appropriés lorsqu'on veut comprendre le comportement du système de façon plus complète (Kok, 2001; Riebsame et al., 1994).

Les recherches récentes réfutent ces simplifications et présentent les systèmes d'utilisation de l'espace comme des systèmes assez complexes qui sont soumises à l'influence combinée d'un nombre important de facteurs qui agissent à différentes échelles spatiales et temporelles (Lambin et al., 2003 ; Parker et al., 2003). La compréhension des causes et conséquences des changements d'utilisation l'espace exige donc de développer des méthodes d'analyse et des modèles intégrés qui prennent en compte les caractéristiques complexes de ces systèmes. Face à ce défi, la nécessité d'une approche interdisciplinaire est de plus en plus reconnue par la communauté scientifique qui travaille sur les changements environnementaux (Turner et al., 1995). Le travail effectué dans le cadre de la présente thèse rejoint cette préoccupation scientifique. Il porte à cet effet sur la spécification et le développement d'un Système d'Information pour l'analyse et la modélisation intégrée des changements d'utilisation de l'espace dans la région de l'Extrême Nord du Cameroun. L'objectif spécifique de ce chapitre est de clarifier les concepts liés aux systèmes d'utilisation de l'espace et de faire un aperçu des théories prises en compte dans la démarche interdisciplinaire qui a été suivie dans cette thèse pour analyser les dynamiques agraires dans la zone d'étude. Le contenu du chapitre est structuré en six sections comme suit. La section suivante clarifie les concepts de base qui sont ensuite utilisés pour décrire un modèle de représentation de la structure des systèmes agraires. La section 3 introduit les concepts de dynamique et de changement appliqués aux systèmes agraires. La section 4 fait aperçu de quelques théories qui sont utilisées comme cadre conceptuel pour l'analyse et la modélisation des changements agraires. La section 5 fait une synthèse des approches d'analyse et de modélisation dynamique existantes et justifie les choix qui ont été opérés dans le cadre de cette étude.

2.2. Concepts et modèle de représentation des systèmes d'utilisation de l'espace

2.2. 1. Concepts d'occupation du sol et d'utilisation de l'espace

On distingue deux principales approches d'analyse des systèmes agraires : l'une partant de l'occupation du sol à l'échelle régionale vers les processus de changement d'utilisation de l'espace et l'autre abordant directement des relations entre acteurs et formes d'utilisation de l'espace à l'échelle locale (Turner et al., 1995). La démarche adoptée dans cette thèse part de la structure d'occupation du sol pour dériver les informations sur les processus de changement d'utilisation de l'espace aux échelles régionales et locales (chapitre 3). Ces informations spatiales sont ensuite combinées à celles fournies par les approches partant d'enquêtes socio-économiques et historiques où l'accent est mis sur les acteurs, leurs décisions et leurs stratégies de mise en valeur de l'espace (chapitres 7 et 8). L'occupation du sol ou l'utilisation de l'espace et leurs changements sont donc des indicateurs pertinents de la nature du système agricole surtout lorsque la différence socio-économique des producteurs se traduit dans l'espace sur le mode de mise en valeur. Cette sous-section est consacrée à la clarification des concepts de base qui sont ensuite utilisés pour décrire la structure, le fonctionnement et les dynamiques des

systèmes agraires. Il s'agit des concepts d'espace, d'occupation du sol, d'utilisation de l'espace et l'échelle.

Espace

L'espace n'est pas à l'origine un terme réservé à la géographie. Il est défini très simplement comme le lieu plus ou moins délimité où peut se situer quelque chose (Dictionnaire Robert). Cette définition renvoie toutefois à la notion géographique d'espace ou à la conception géométrique de l'espace qui le considère comme le cadre de référence défini par un système de coordonnées dans lequel on localise les objets dont on parle. Le lieu est un point repérable en plusieurs coordonnées (longitude, latitude, altitude et temps). Il permet de répondre à la question géographique : « où ? ». Les figures 2.1a et 2.1b donnent respectivement une représentation en coordonnées rectangulaires et cartésiennes de l'espace absolu. Dans les études sur les systèmes agraires l'espace ne représente pas seulement un ensemble de lieux mais inclut également les éléments de caractérisation. Ainsi, l'espace recouvre les notions de paysage, région ou territoire qui se réfèrent respectivement à la nature ou la composition de l'espace, une unité homogène de l'espace d'un point de vue et une étendue de l'espace appropriée par une communauté. La carte est un bon exemple de représentation de cet espace géographique fait à la fois de coordonnées, de distance, de surfaces, mais aussi de forêts, de routes, de surfaces bâties et de diverses propriétés (Bailly et Begin, 1996). Cette définition de la notion d'espace permet de mieux clarifier les concepts d'occupation du sol et d'utilisation de l'espace, de préciser les liens qui existent entre eux et de mieux comprendre leur pertinence dans le cadre de cette étude. En effet, l'espace en tant que support de toutes les activités rurales et des processus naturels, est au centre des différentes interactions des composantes du système agricole notamment les changements d'occupation du sol et de ses formes d'utilisation.

Occupation du sol

L'occupation du sol peut être tout simplement rattachée à la notion d'espace pour désigner ces éléments de caractérisation ou propriétés qui occupent l'espace. Certains auteurs préfèrent parler d'occupation de l'espace mais nous la désignerons plus simplement par occupation du sol pour des raisons de commodité. En conclusion, l'occupation du sol qui correspond dans la littérature anglaise à « land cover » est strictement considérée dans cette thèse comme l'état biophysique de la surface de la terre ou de la sous surface immédiate. Elle rend compte de la physionomie d'un espace et concerne entre autre la forêt, la savane, les cultures, les zones humides ou les zones d'habitations (Turner et al., 1995). L'occupation du sol n'est qu'un aspect du paysage qui est un concept plus complexe et souvent difficile à cerner. Plusieurs définitions du paysage ont été données en fonction des disciplines scientifiques. Pour les écologistes, le paysage est un ensemble d'éléments biophysiques et socio-économiques dont les interactions déterminent les possibilités de vie et s'inscrivent dans l'espace. Pour les géographes, le paysage sous un angle statique est une portion de l'espace terrestre vue sous un certain point d'observation. De ce point de vue, le paysage n'est que la manifestation visible des faits qui sont inscrits dans l'espace et qui sont de plus visibles par un observateur (Loireau, 1998). Le dictionnaire de géographie de Levy et Lussault, (2003) considère que c'est un agencement d'espace naturel et social tel qu'appréhendé visuellement, de manière horizontale ou oblique par un observateur. C'est le produit visible du milieu aménagé par l'homme ou encore l'expression spatiale des pratiques sociales (Bailly et Ferras, 1997). En se référant à la hiérarchie des composantes du

système agraire présentée à la figure 2.4, nous considérons le paysage agraire comme un autre niveau du système agraire qui peut être situé entre l'espace agraire et les formes d'occupation. Cela signifie que c'est un système composé de sous systèmes de niveaux inférieurs (occupation du sol) et des caractéristiques qui émergent de leurs interactions telles que le flux des eaux souterraines, les métapopulations, les interactions entre écotopes, etc.

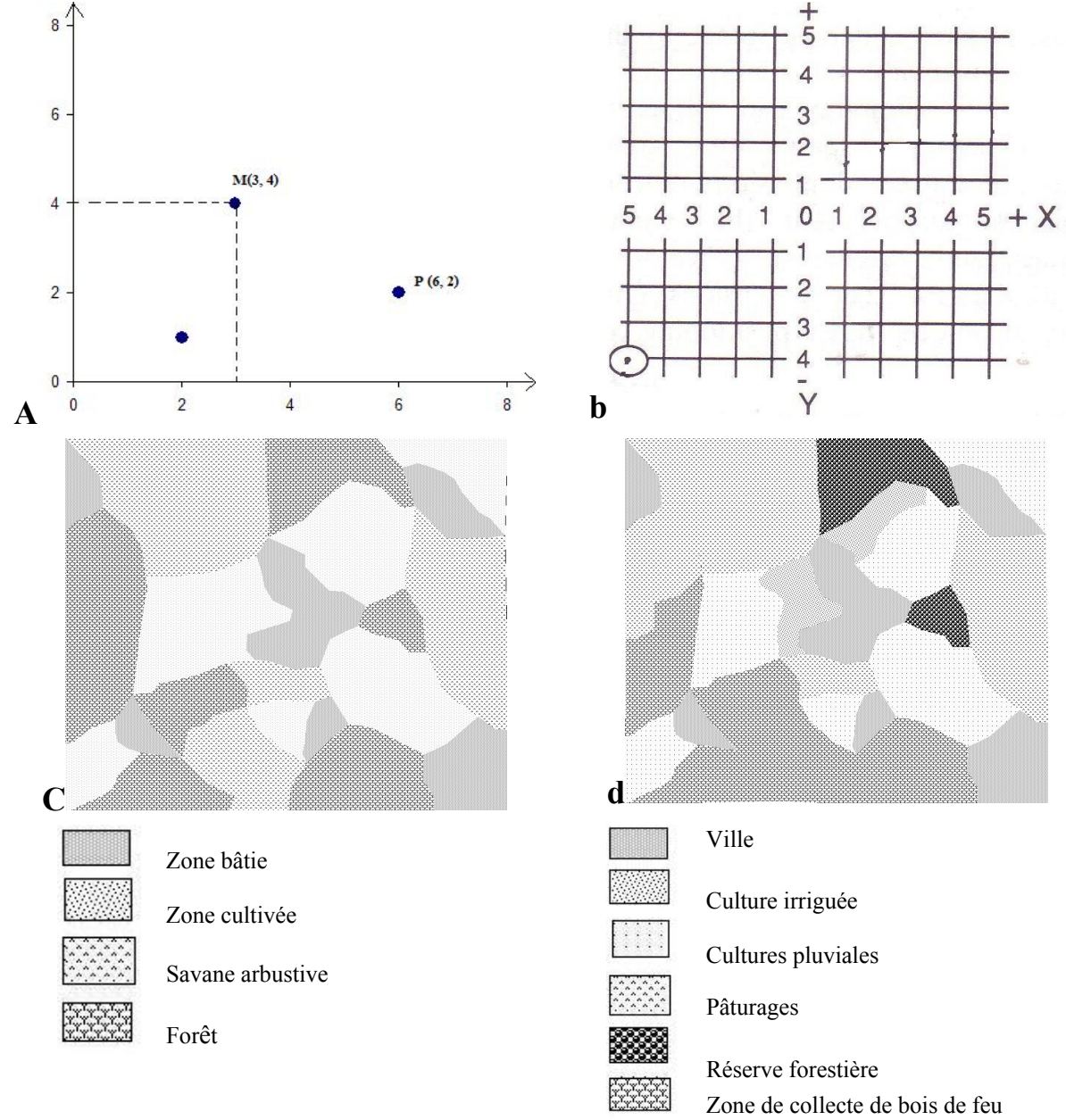


Figure 2.1 : Illustration de la différence entre les concepts d'espace (a, b), d'occupation du sol (c) et d'utilisation de l'espace (d).

Utilisation de l'espace

Le terme «occupation du sol» est le plus souvent utilisé dans la littérature française pour signifier l'occupation et l'utilisation. Dans ce cas, la différence pourtant indispensable dans l'étude des transformations des paysages, n'est pas explicite entre l'occupation de l'espace et l'utilisation qui en est faite (Burel et Baudry, 2003). Si la traduction du terme anglais «land cover» en français pose relativement moins de problèmes, il faut toutefois reconnaître que la traduction du terme «land use» est assez ambiguë. Mot à mot, on obtiendrait occupation des terres pour «land cover» et utilisation des terres pour «land use». Certains auteurs utilisent indifféremment les termes utilisation des terres ou utilisation du sol pour signifier «land use». Ce concept est désigné dans cette thèse par utilisation de l'espace pour éliminer toute ambiguïté avec les acceptations françaises des mots «terre» et «sol» qui renvoient plus naturellement aux potentialités du milieu ou aux types de sol et sont plus restrictifs que l'acceptation anglaise de «land use». L'utilisation de l'espace se réfère aussi bien à la manière dont les différents attributs biophysiques de l'environnement sont manipulés, qu'à l'intention ou la finalité pour laquelle ces attributs sont exploités (Turner et al., 1995). La production du bois, l'élevage, la pêche, l'agriculture et la conservation de la biodiversité sont des exemples de finalité. La manipulation biophysique se réfère à la pratique, le procédé spécifique par lequel l'homme transforme les attributs tels que l'eau, la végétation ou le sol pour atteindre la finalité en question. L'agriculture itinérante sur brûlis, l'utilisation des engrais ou des pesticides, l'irrigation pour l'agriculture dans les zones arides ou humides sont des formes d'utilisation de l'espace. On peut remarquer qu'une seule utilisation de l'espace peut correspondre à plusieurs occupations différentes et réciproquement (figure 2.1). L'agriculture qui est une forme d'utilisation de l'espace intègre par exemple les jachères longues issues de l'agriculture itinérante sur brûlis, les zones irriguées annuellement avec chacune une dynamique différente, les zones cultivées intensivement en association avec les parcs arborés et les sols nus.

Concepts d'échelle

Les concepts d'échelle sont très importants dans l'étude des processus de changement d'utilisation de l'espace. Toutefois la signification qui est donnée à la notion d'échelle varie en fonction des différentes disciplines ou des contextes dans lesquels elle est utilisée (Bian, 1997). Ainsi, les termes comme échelle, résolution, étendue et niveau sont le plus souvent utilisés les uns à la place des autres. Les besoins d'une approche interdisciplinaire et intégrée exige une clarification et un minimum de compréhension commune des concepts et problèmes d'échelle. **L'échelle** est un terme qui fait référence aux dimensions spatiale, temporelle, quantitative ou analytique utilisées par les scientifiques pour mesurer et étudier des objets ou processus. On parle souvent d'échelle géographique ou spatiale, d'échelle temporelle ou d'échelle d'opération d'un processus. Elle peut être par exemple la taille d'une entité ou la fréquence d'un processus. L'échelle d'observation correspond aux dimensions temporelle, spatiale ou analytique auxquelles un phénomène est observé. La notion d'échelle recouvre donc en réalité les trois notions complémentaires suivantes : l'étendue, la résolution et le niveau d'organisation (figure 2.2). **L'étendue** est la taille spatiale, temporelle, quantitative ou analytique d'une échelle. L'étendue est la superficie ou la durée totale pour laquelle les observations sont faites. La notion d'étendue est désignée par la notion de domaine dans la littérature écologique. **La résolution** représente la précision de la mesure d'un phénomène. C'est le plus petit intervalle spatial ou temporel dans un ensemble d'observations. Elle représente la taille de la plus petite entité distinguable dans un jeu de données spatiales. Les écologistes utilisent la notion de grain qui est une mesure de la taille des entités (patches) dans un paysage fragmenté

en habitats discrets. En informatique les notions de pixel ou cellule sont utilisées pour la représentation des images. **Le niveau** par contre est une caractéristique d'un système organisé ou hiérarchisé. C'est une unité d'analyse située à une position donnée dans une échelle. Elle peut donc correspondre à un niveau d'organisation biologique, social, de l'espace ou du territoire. A titre d'exemple, les huit principaux niveaux d'organisation le plus souvent utilisés en écologie sont : le cellule, l'organisme, la population, la communauté, l'écosystème, le paysage, le biome et la biosphère. Les niveaux d'organisation du territoire utilisés dans cette thèse incluent : l'exploitation agricole, le village et la région. Ces niveaux se situent sur une échelle spatiale et traduisent la taille du phénomène étudié.

La hiérarchie est une représentation du système d'interactions ou des relations de causalité entre des objets ou des processus le long d'une échelle analytique. Les niveaux de la hiérarchie d'un système peuvent être définis à partir des relations et des différences spatio-temporelles des processus en terme de flux d'information, d'interaction entre les composantes (commande et contrôle). C'est pourquoi on dira que des sous-systèmes qui ont des flux ou interactions similaires occupent le même niveau dans un système hiérarchique (Allen et Robert, 1997). On distingue grossièrement trois types de hiérarchie des systèmes : 1) les hiérarchies nom imbriquées où les entités de niveau inférieur de la hiérarchie ne sont pas contenues ou des subdivisions des entités de niveau supérieur; 2) les hiérarchies imbriquées de type inclusive où les entités de niveau inférieur de la hiérarchie sont contenues ou des subdivisions des entités de niveau supérieur; 3) Les hiérarchies imbriquées de type constitutive où les entités de niveau inférieur sont combinées en de nouvelles entités qui ont une nouvelle organisation, de nouvelles fonctions et des propriétés émergentes (Gibson et al., 2000).

Il existe un nombre important de variantes, d'usage et de relations entre les différents concepts d'échelle qui expliquent les confusions usuelles (Allen et Hoekstra, 1990). Nous clarifions quelques unes de ces relations et variantes du concept d'échelle qui sont importantes pour comprendre la manière dont l'échelle est prise en compte dans la démarche suivie dans cette thèse. **L'étendue et la résolution** peuvent donc être considérées comme des échelles de mesure ou d'observation d'un phénomène donné. La résolution utilisée pour observer un phénomène dépend de l'étendue. Si on s'intéresse à un processus sur une très vaste étendue, la résolution sera plus grande que si l'on s'intéresse à une plus petite étendue. Dans cette thèse on parlera de l'échelle locale pour signifier une petite étendue ou une faible résolution, ce qui est bien conforme à la perception intuitive de la notion d'échelle mais contraire à la perception de l'échelle par le cartographe. Pour ce dernier, l'échelle représente le ratio entre la distance mesurée sur la carte et la distance mesurée sur le terrain. Pour une grandeur de restitution fixée, une carte à grande échelle fournit des informations plus détaillées et couvrira une petite étendue géographique alors qu'une carte à petite échelle couvrira une grande étendue géographique et aura le plus souvent moins d'informations détaillées pour des besoins de lisibilité.

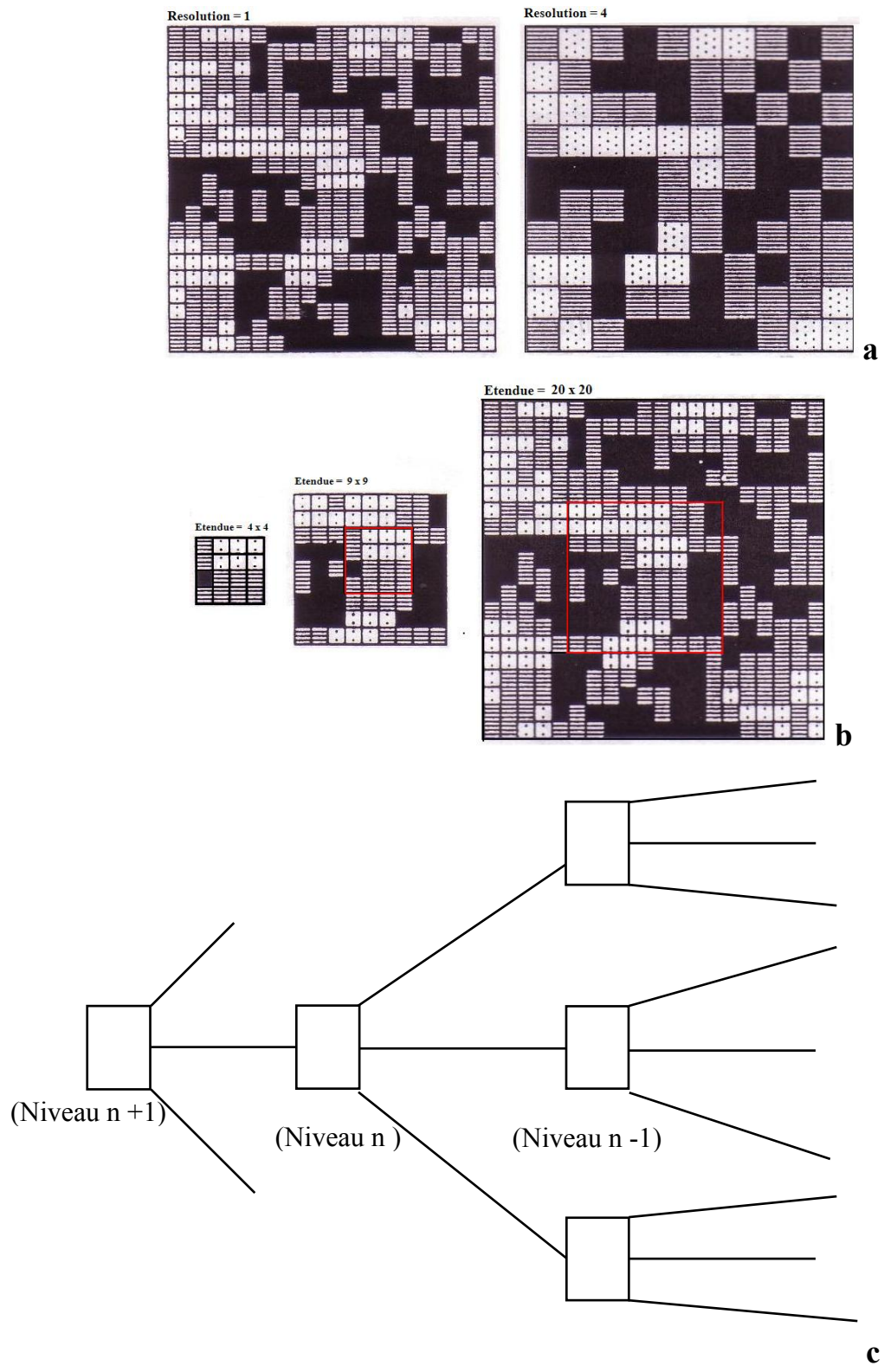


Figure 2.2. Illustration des trois variantes de la notion d'échelle. a) effets du changement de résolution b) effets du changement d'étendue c) hiérarchie des niveaux d'organisation (adapté de Gibson et al., 2000).

Un niveau d'organisation est souvent considéré à tort comme une échelle. Toutefois, il peut le plus souvent être associé à une échelle. Ainsi, on peut parler de l'échelle spatiale d'un niveau d'organisation pour indiquer l'étendue ou la taille du grain sur lequel opèrent les processus définissant le système à ce niveau. L'échelle temporelle du niveau d'organisation caractérise le rythme d'évolution des processus à ce niveau du système. A titre d'exemple un village c'est-à-dire une entité réelle associée au niveau d'organisation d'une communauté ou d'un territoire est caractérisé par sa taille qui peut être définie en terme de population ou d'étendue spatiale qu'elle occupe. **Les hiérarchies non imbriquées** sont souvent caractéristiques des systèmes où les interactions entre niveaux portent principalement sur les contrôles ou commandes. C'est le cas par exemple de la structure représentant les autorités en charge de la gestion du système d'utilisation de l'espace dans la zone d'étude qui comprend le gouverneur, les délégués provinciaux, les délégués départementaux etc. (chapitre 5). Toutefois il existe des hiérarchies non imbriquées ou le concept de commande et de contrôle est absent. C'est le cas par exemple du système représentant la chaîne alimentaire entre les plantes, herbivores et carnivores. La plupart des processus de changements d'utilisation de l'espace sont liés sous forme **d'une hiérarchie imbriquée de type constitutive**. Les acteurs individuels impliqués dans l'utilisation et la gestion de l'espace appartiennent à des groupes d'acteurs organisés ou non, qui sont à leur tour contenus dans des communautés villageoises. Ces communautés rurales font également partie d'un système ville-campagne qui forme le niveau régional. Ce système agricole régional est également une composante d'un système de filière agricole au niveau national ou international. Dans un tel système, les processus qui se déroulent à un niveau affectent les processus des niveaux inférieur et supérieur. L'analyse des changements d'utilisation de l'espace devrait donc se faire à ces différents niveaux si on veut avoir une compréhension complète des mécanismes en jeu. Lorsque nous observons le monde réel, les entités que nous discernons, les structures des phénomènes et les relations entre elles sont déterminées par l'échelle à laquelle nous observons, aussi bien l'étendue spatiale que la résolution. Quand on change par exemple l'échelle d'observation (résolution ou étendue), on effectue un déplacement à travers une discontinuité d'échelle et ceci peut entraîner l'émergence à la perception de nouvelles relations ou interactions et le changement ou la disparition de l'organisation hiérarchique (Levin, 1992). Avec le changement d'échelle, les processus dominants changent. Ce ne sont pas seulement les entités qui deviennent grandes ou petites, les phénomènes et les dynamiques changent également. Les systèmes instables peuvent devenir plus stables et les contrôles ascendants peuvent devenir descendants. Cette remarque sur la modification de la structure et de la dynamique des systèmes est à la base de la théorie de la hiérarchie qui s'est développée comme une solution à la difficulté de prédire le comportement des systèmes complexes (Peterson, 2000).

2.2.2. Modèle de représentation des systèmes agraires

Concepts de la systémique appliqués à la définition des systèmes agraires

Les systèmes agraires peuvent tout simplement être considérés comme des écosystèmes spécifiques. Or, un écosystème est défini comme un ensemble complexe et dynamique composé de plante, des communautés d'animaux et leur environnement non vivant interagissant comme une unité fonctionnelle (Convention des Nations Unies sur la Diversité Biologique). Les systèmes agraires sont des écosystèmes soumises à des transformations par les activités humaines afin de produire les aliments, les fibres et d'autres produits dérivés de l'agriculture ou de l'élevage, conduisant ainsi à des systèmes plus ouverts dans la mesure où ils

reçoivent et communiquent des flux divers sous forme de produits ou d'informations à travers des actions de gestion (Convey, 1987). Les systèmes agraires présentent donc à priori un degré plus important de complexité qui émerge des dynamiques spatio-temporelles, du nombre important d'interactions entre ses composantes et de l'imbrication des échelles auxquelles opèrent les processus.

Plusieurs travaux en écologie se sont appuyés sur les approches systémiques et les théories des systèmes complexes pour mettre en évidence les propriétés des écosystèmes. Les notions de hiérarchie et d'échelle, de résilience et d'adaptabilité sont des concepts clés lorsqu'on analyse la structure et la dynamique d'un écosystème (Allen et Roberts, 1997). Les travaux sur les systèmes agraires dans le domaine de la géographie mettent l'accent sur les paysages et les structures agraires considérées comme l'ensemble des éléments dont l'interaction et le fonctionnement concourent à l'activité dans le secteur agricole. Ce sont notamment le système de culture, les modes de propriété, les modes de faire valoir et les dimensions des exploitations (Levy et Lussault, 2003). En agronomie, les travaux s'intéressent en priorité aux facteurs, techniques et processus de production agricole (Blanc-Pamard et Lericollais, 1991).

La science des systèmes encore appelée systémique, a pour finalité d'analyser des phénomènes complexes et proposer des modèles à des fins de compréhension d'anticipation et d'éventuelles interventions (Nancy et al., 1992). La combinaison des concepts de système avec les théories de l'écologie du paysage (Verburg et al., 1999; Burel et Baudry, 2003) fournit un cadre conceptuel qui peut être utilisé pour représenter ou décrire les systèmes agraires et leur dynamique. Cette sous-section utilise les concepts présentés à la sous-section précédente pour décrire un modèle de représentation du système agricole. Le concept de système véhicule trois idées clés : la complexité, le rôle essentiel des interactions et l'organisation. Le concept de complexité organisée qui est à la base de la pensée systémique se fonde à son tour sur deux couples d'idées : l'émergence et la hiérarchie, la communication et le contrôle. Un système est un ensemble d'éléments en interaction, une totalité organisée, plus ou moins ouverte sur l'environnement (Dauphiné, 2003). Un système est défini par la connaissance de sa structure, son fonctionnement / évolution et son environnement. La structure est définie par les caractéristiques des composantes ou sous-systèmes et par leurs interactions. Le système possède également des caractéristiques émergentes, c'est à dire nées de l'interaction de ses composantes. Un système est donc plus que la somme de ses composants. La fonction du système est définie par le processus par lequel l'interaction des différentes parties du système transforme les intrants en produits. Les principaux éléments fonctionnels sont par exemple les flux d'énergie, de matière et d'information et les vannes qui contrôlent ces flux. Les vannes peuvent être considérées comme des centres de décision, des délais résultant des frictions à l'intérieure du système et des mécanismes de rétroaction ou feed-back pouvant être positifs ou négatifs. Le plus souvent, ces éléments confèrent au système des mécanismes d'autorégulation lui permettant de maintenir sa propre cohérence et de préserver cette cohérence face aux forces internes ou externes de changement (Hal, 1994). L'environnement d'un système comprend tout ce qui est autour du système et interagit avec celui-ci (Le Moigne, 1977).

Représentation des interactions et hiérarchie entre les composantes du système agricole

Dans le contexte spécifique des savanes d'Afrique centrale où on note une très forte intégration entre l'agriculture et les autres activités rurales comme l'élevage, la pêche et la sylviculture, il est difficile dans une étude des systèmes agraires de restreindre le qualificatif agricole essentiellement aux activités agricoles.

Par conséquent, nous proposons une représentation plus large qui considère un système agricole comme un ensemble composé de l'espace rural utilisé par une communauté humaine, de l'ensemble des activités que cette communauté mène afin de subvenir à ses besoins en aliments, bois de feu ou fibres, ainsi que l'ensemble des interactions entre ces éléments. Dans ce sens, le système agricole est un sous système du système rural comprenant deux composantes essentielles : 1) l'espace agricole considéré comme support de l'occupation du sol et des paysages et 2) le sous-système d'utilisation de l'espace qui traduit les finalités et les modes de mise en valeur par les populations ou les gestionnaires. Ces deux composantes sont en interaction et sont soumises à l'influence du sous système social et du sous-système écologique qui forment l'environnement du système (Figure 2.3).

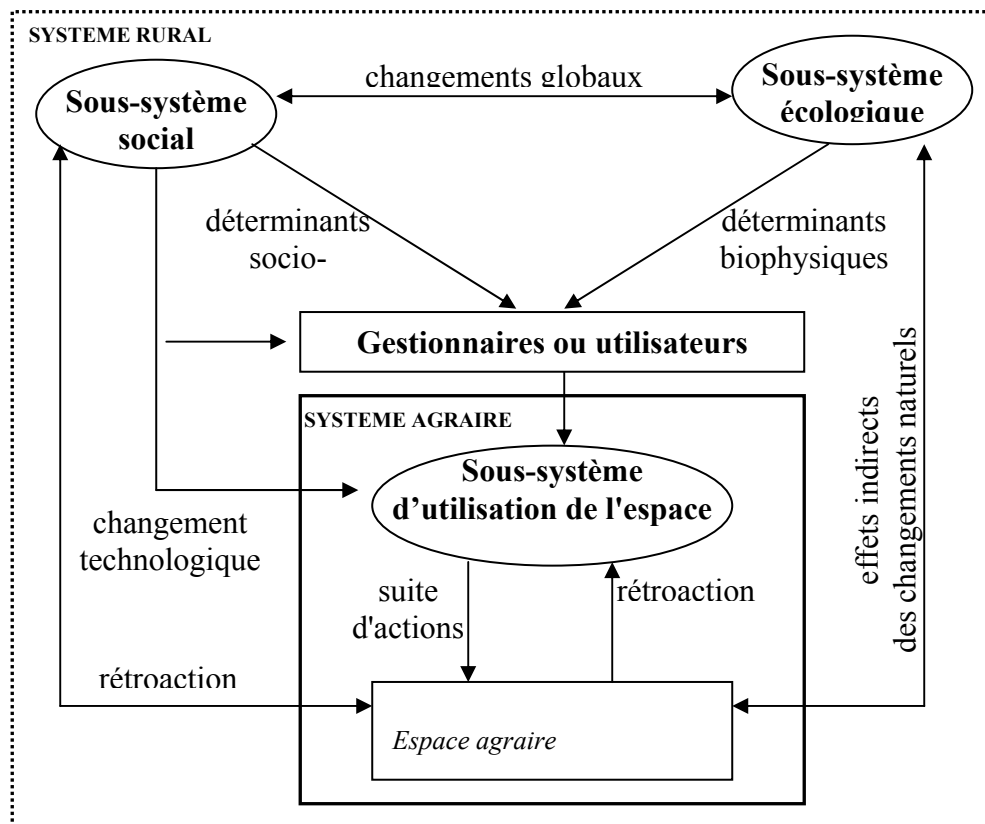


Figure 2.3. : Interactions entre les composantes du système agricole et du système rural.

La définition et la représentation du système agricole mettent en exergue un nombre important d'interactions entre ses composantes et son environnement (figure 2.3). De plus, ces interactions forment un cycle caractérisé par de nombreuses relations d'action et de rétroaction. En effet, les activités humaines et les facteurs d'ordre socioéconomiques ou politique déterminent les formes d'utilisation de l'espace et les pratiques associées. Les différents types d'occupation du sol et les changements qui les affectent sont la conséquence directe des différentes utilisations de l'espace. Les changements d'occupation du sol sont à leur tour susceptibles d'être à la source des flux de matière et d'énergie qui sont à la base des grands cycles de la nature. De nombreux travaux dans le domaine des sciences naturelles et physiques sur l'état et les flux de la biosphère montrent que les dynamiques d'occupation du sol et d'utilisation de l'espace ont des effets importants sur les processus et les systèmes écologiques et sur la dynamique terre-atmosphère

(Turner et al., 1997). Les changements globaux que ces flux induisent affectent directement ou indirectement certains facteurs du milieu physique et peuvent conduire à des mutations dans l'environnement socio-économique. Les réponses humaines à cette suite de rétroactions se traduisent par des changements des formes d'utilisation de l'espace.

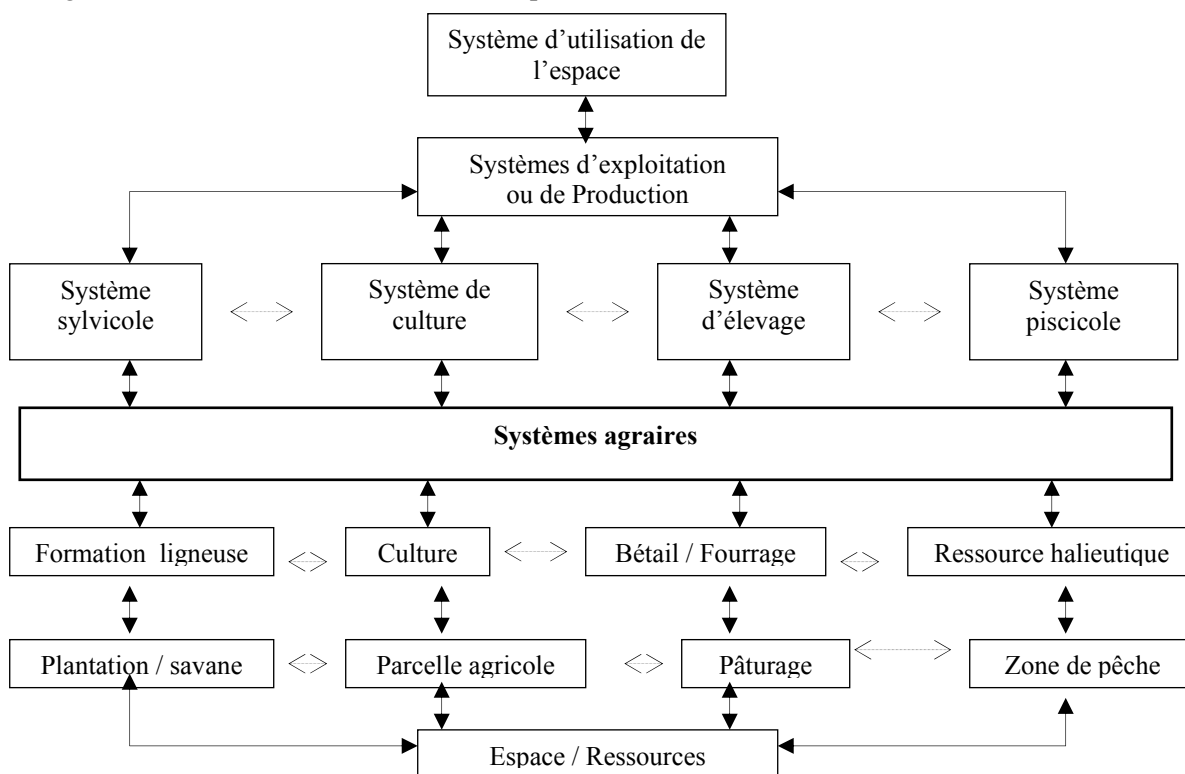


Figure 2.4 : Hiérarchie et interaction entre les composantes du système agraire. Les flèches en trait continu représentent les interactions liées à l'organisation hiérarchique et ceux en traits pointillés représentent les interactions spatiales (horizontales) entre les occupations, les utilisations ou les processus de changement.

Chacune des interactions décrites s'effectue à différentes plages d'échelles temporelles et spatiales. Sur le plan spatial, le système agraire peut être vu comme une hiérarchie de sous-système allant de la cellule aux organes de plante, en passant par la plante, la culture, le champ, l'exploitation, le village, le terroir, la région agricole (Hal, 1994). L'espace agraire en particulier est une composante du système agraire se trouvant à un niveau supérieur, et donc qui peut être décomposé en systèmes de niveaux inférieurs (formations ligneuses, cultures, fourrage ou ressources halieutiques). Le système agraire devient la résultante des interactions entre les éléments composant l'espace agraire et les éléments composant les systèmes de mise en valeur. Les Figures 2.3 et 2.4 montrent que le système agraire se trouve à l'interface entre l'espace agraire et les systèmes de mise en valeur (utilisation de l'espace) et constitue ainsi une hiérarchie de sous-systèmes. Dans cette hiérarchie, les sous-systèmes de niveau supérieur sont composés de sous-systèmes de niveau inférieur (composants) et des caractéristiques propres qui émergent des interactions et des structures définies par les composants.

2.3. Concepts et modèles d'explication des dynamiques d'utilisation de l'espace

La compréhension des changements présente donc un double enjeu : celui du développement des communautés rurales concernées et celui de la communauté scientifique mondiale travaillant dans le domaine des changements environnementaux. L'objectif général dans ce domaine est de contribuer à améliorer notre compréhension sur les causes et les conséquences des dynamiques d'utilisation de l'espace à différentes échelles spatiales et temporelles. Une attention particulière est portée sur l'amélioration de notre capacité à modéliser et projeter de tels changements. Dans cette section, nous présentons les concepts de dynamique des systèmes agraires et les modèles explicatifs existants. Les notions plus spécifiques de changement qui y sont associés telles que la conversion, la modification ou transformation évolution, mutation, et transition sont définies avec des références à l'occupation du sol et l'utilisation de l'espace.

2.3.1. Concepts de dynamique des systèmes agraires

Notions de dynamique et changement

La dynamique est considérée comme la partie de la science qui étudie les objets dans leur mouvement, leur devenir. Ce terme est également utilisé pour décrire les variations d'un phénomène dans le temps, en identifiant les processus qui sont à l'origine. La caractéristique dynamique d'un système au sens général est définie par la manière dont la sortie évolue au cours du temps pour aller d'un état d'équilibre vers un autre état d'équilibre. Cette notion se traduit tout simplement par la notion de processus qui est un ensemble de phénomènes conçus comme actifs et organisés dans le temps (Petit robert). Le mot dynamique en géomatique, recouvre également une très large gamme de termes dont les sens ont été précisés par Cheylan et al. (1999) qui proposent un lexique des mots les plus utilisés pour représenter et traiter l'information spatio-temporelle. En géographie, cette notion essentiellement temporelle est de plus en plus associée à la description de processus ou d'entités spatiaux. Lorsqu'on étudie la dynamique d'un système, on est amené à identifier les changements qui surviennent et mieux, analyser les trajectoires possibles de ces changements.

Un changement se produit si et seulement si, il existe une proposition P et des instants distincts t et t', tels que P est vraie à t, mais fausse à t'. P peut être par exemple de la forme suivante : la nature de l'occupation du sol est de type forestier sur un espace donné ou encore l'utilisation est de type agricole sur un espace donné. Les changements d'occupation du sol se traduisent par la conversion ou la modification qui sont deux processus bien différents. Le passage de la forêt à la culture est une conversion alors que la diminution de la densité d'arbre d'une forêt est une modification. La définition des changements d'occupation du sol selon la FAO permet d'illustrer cette différence : si la forêt est considérée comme toutes les occupations du sol avec un recouvrement en arbre supérieur ou égale à 10%, alors, les changements entre 100% et 10% sont des modifications de l'occupation du sol. Les changements qui vont conduire le recouvrement en deçà du seuil de 10% sont des conversions de la forêt en d'autres types d'occupation. Les changements d'occupation du sol incluent également la qualité du sol, la diversité biotique, la capacité de production actuelle ou potentielle. Un changement d'utilisation de l'espace peut consister en un changement de forme d'utilisation ou une modification de l'intensité d'usage qui peut par exemple se traduire par une augmentation de la pression de pâturage, une suppression ou un apport de la

fertilisation organique ou minérale, une nouvelle forme d'intégration entre agriculture, élevage ou pêche (Turner et al., 1995 ; Burel et Baudry, 2003).

Notions d'évolution, mutation et transition

Le terme de changement est assez vague et très englobant. Il peut renvoyer aux notions plus précises d'évolution, de mutation et de transition. L'évolution est un changement graduel qualitatif ou quantitatif dans le temps alors que la mutation et la transition sont des changements discrets c'est à dire entre deux états. Une analyse de l'évolution d'un système à long terme peut mettre en exergue des mutations ou des transitions à court terme. Dans ce cas il est intéressant d'étudier la notion de trajectoire du système qui est explicitée dans la section suivante. La mutation est un changement entre deux états stables, où on s'intéresse aux états et non au passage de l'un à l'autre contrairement à la transition qui est considérée comme le passage d'un état à un autre, structurellement différent et stable. On étudie soit le processus du changement qui aboutit à ce nouvel état, soit la période de transition qui correspond, en général dans les exemples classiques en géographie, à une échelle de temps longue. Le sens physique de transition de phase peut être associé à celui du terme bifurcation qui est le plus souvent utilisé en géographie (Cheylan et al., 1999). Dans l'étude du comportement des systèmes complexes, la transition représente une phase d'évolution instable du système qui se trouve intermédiaire entre deux phases en équilibre (Kok, 2001). La transition agraire est un concept qui traduit le fait que le système d'utilisation de l'espace d'une communauté change rapidement d'une situation non durable à un développement durable sous l'influence d'un accroissement de la densité de la population. Plusieurs exemples de ce phénomène de transition agricole sont décrits dans De Groot et Kamminga (1996). Un exemple bien connu est celui des transformations spectaculaires observées dans le district du Machakos au Kenya (Tiffen et al., 1994). Dans les années 40, cette région était dans un état de pauvreté désespérée et les terres faisaient place à un désert rocheux, de pierres et de sable. Dans les années 90, la densité de la population a triplé mais, le revenu moyen par habitant a également triplé grâce à d'importants investissements pour la construction des terrasses et la gestion de l'eau, la gestion de la matière organique, les plantations d'arbre et de fourrage.

Notion de trajectoire des changements agraires

La notion de trajectoire dans les systèmes agraires revêt plusieurs significations. La trajectoire peut être considérée comme une séquence type de changement d'occupation du sol ou d'utilisation de l'espace (forêt—champs sur brûlis--savane—etc.). Dans un système agraire où l'on pratique la rotation des cultures associée à la jachère, on pourra parler de la trajectoire d'une parcelle agricole pour indiquer la succession des différentes formes d'utilisation ou d'occupation de la parcelle au cours du temps. On pourra également parler de trajectoire d'une formation végétale de savanes soumise à des actions anthropiques pour indiquer les successions dans le temps, entre une savane boisée et un sol nul dégradé en passant par des états intermédiaires (Ntoupka, 1999). L'analyse des changements survenus dans l'ensemble du système agraire sur une longue période peut être effectuée tout simplement sous la forme d'une chronique qui est une liste d'événements ou d'états datés, rapportés dans l'ordre de leur succession sans faire aucune hypothèse sur les processus. En effet, l'analyse du changement pose successivement les problèmes de son identification (observation), de sa structuration et de sa modélisation. La modélisation peut donner lieu à la constitution de trajectoires. La trajectoire est dans ce cas vue comme une vision continue et extrapolée d'une chronique (Cheylan et al., 1999). C'est cette notion de trajectoire qui est abordée explicitement dans les paragraphes

suivants et qui est considérée dans cette thèse pour l'analyse des dynamiques du système agricole de la région de l'Extrême Nord du Cameroun (chapitre 5).

Pour mieux représenter la trajectoire du système agricole, on va supposer que son évolution est caractérisée par un ensemble de phases. Au cours de toute phase, le système subit des changements et passe d'un état à un autre sous l'action des processus successifs. Au cours d'un processus, la mesure du changement d'état du système se fait en général par le biais d'une variable comme la productivité du système, l'étendue de l'espace exploité ou la rentabilité économique. On pourra donc distinguer deux types de transitions entre les processus d'évolution du système agricole qui peuvent affecter les techniques de production (pratiques) ou les états du milieu (espaces et ressources) en fonction de leur impact sur la dynamique du système : les transitions progressives et les transitions se traduisant par contre par des effets de seuils plus ou moins marqués qui vont faire passer le système d'une phase à une autre. Ainsi, les phases successives correspondant à des configurations techniques caractéristiques et/ou à des combinaisons spécifiques des facteurs de production. Une phase est une période au cours de laquelle le système peut évoluer progressivement sous l'influence des facteurs naturels ou humains (croissance démographique, augmentation de la force de travail, changement climatique etc.) en passant par des états successifs, sans que sa durabilité ne soit affectée (Milleville et Serpentié, 1994). Une phase correspond en effet à une configuration technique donnée et est caractérisée par un état final que l'on qualifie de point de blocage. Cet état est un seuil à partir duquel l'évolution du système dans des conditions durables exige une nouvelle configuration technique. Dans le cas où ce changement technique ne se réalise pas, une crise affecte le système et met en péril sa durabilité : le système bascule alors dans une phase critique. En cas de changement technique ou institutionnel, le système passe à une autre phase d'évolution. Ce type de changement du système agricole peut être qualifié de bifurcation. La bifurcation est une notion issue de l'analyse systémique, décrivant une situation où, sous l'effet d'une légère perturbation extérieure ou d'une légère variation de la situation initiale ou encore d'un petit changement dans la valeur d'un paramètre, l'attracteur du système change de nature. Par extension on a tendance à utiliser le terme bifurcation quant un changement peu important dans la situation initiale ou dans l'environnement du système conduit à un changement qualitatif profond de sa dynamique (Cheylan et al., 1999).

Lorsqu'on s'intéresse par exemple à la dynamique du système de production agricole, une mesure du changement peut être la productivité agricole, déterminée par le facteur quantité de travail également déterminé par le facteur population. Au cours d'une phase du développement agricole, l'accroissement de la population induit une augmentation de la quantité du travail qui peut à son tour déclencher une augmentation progressive de la productivité. A partir d'un certain seuil, la croissance de la production ne pourrait plus résulter de la simple augmentation de la quantité de travail mais exigera un nouveau type de combinaison de facteurs de production (Milleville et Serpentié, 1994). L'accroissement de la population tant qu'elle ne s'accompagnera pas de changement technique significatif ne pourra qu'induire une saturation progressive de l'espace agricole, une pression grandissante sur le milieu, une amplification des mouvements migratoires et éventuellement déboucher sur une dégradation profonde des ressources productives. Par contre, le passage d'une agriculture manuelle à une culture attelée ou motorisée, la création d'un aménagement hydro-agricole, l'introduction d'une nouvelle culture dans l'assolement créeront des ruptures de ratio des surfaces cultivées par actif, dans la nature et les principes de fonctionnement des systèmes de culture, dans l'organisation de l'espace agricole et de l'exploitation

agricole. Les changements survenus dans le système agraire des plaines d'inondation du Logone dans la région de l'Extrême Nord du Cameroun montrent comment les travaux d'aménagement hydro-agricole ont contribué à une transformation importante du système agraire en modifiant complètement l'organisation de l'espace agraire et le système de production (IUCN, 1996 ; Mouafo et al., 2002).

2.3.2. Modèles théoriques explicatifs des changements agraires

La dynamique qui résulte des interactions entre les différentes composantes du système agraire (sociales et environnementales) est le plus souvent gouvernée par des processus faisant intervenir de multiples variables sociales et physiques, d'importantes rétroactions, d'effets interactifs et des réponses non linéaires (Homer-Dixon, 1999). Compte tenu de la complexité qui en découle, l'analyse de la dynamique des systèmes agraires peut être ouverte à plusieurs interprétations. Pour comprendre les multiples interactions entre systèmes sociaux et environnementaux, l'analyste doit le plus souvent tracer et mettre en exergue des chaînes de cause à effet très longues et enchevêtrées. Une représentation graphique peut être utilisée pour expliciter le fonctionnement des processus et décrire les trajectoires du système. La représentation sous forme de diagramme aide à identifier les interactions clés entre les processus qui opèrent simultanément, à spécifier les variables intervenant et interagissant, à identifier les liens de cause à effet entre les différents processus ou variables. Il est par exemple difficile de prétendre débattre de l'évolution des modes de mise en valeur agricole en Afrique sans faire explicitement référence aux thèses de Boserup et de Malthus qui relient les changements agraires à la pression démographique. Cette section fait un aperçu de ces théories qui sont utilisées dans cette thèse comme cadre conceptuel pour l'analyse et la modélisation des changements agraires.

Thèses de Boserup et Malthus

Les théories de Boserup et de Malthus sont le revers l'une de l'autre dans la mesure où la démographie passe du statut de variable à expliquer à celui de variable explicative. Elles pourraient donc se compléter pour interpréter certaines évolutions agraires. Dans la plupart des situations agraires, l'augmentation de la population amène la société à obtenir plus de ressources sur un même espace et peut conduire à une crise de subsistance (figure 2.5). La population rencontre dans cette phase d'adaptation difficile des périodes transitoires instables et des blocages. Deux voies possibles peuvent être mises à profit pour atteindre les objectifs de production : la mise en place d'un système de production extensif (extension des surfaces cultivées par exemple) ou le changement des méthodes de culture qui deviennent plus intensives et plus exigeantes en travail à l'unité de surface (Milleville et Serpantié, 1994.). Dans le premier cas, on assiste à une dégradation continue du milieu productif qui peut à son tour provoquer les famines et l'exode. Ce chemin correspond à la vision néo-Malthusienne, vision pessimiste, le plus souvent soutenue par les biologistes ou écologistes qui pensent que les ressources naturelles sont finies et déterminent des limites strictes de croissance démographique et de consommation régionale ou globale. Ils estiment que si ces limites sont dépassées, alors la pauvreté et le déclin social surviennent. Dans le second cas, par contre les crises de subsistance multiplient les tentatives innovatrices qui peuvent déboucher sur une intensification des systèmes de production. Ce chemin correspond à la thèse de Boserup qui est une vision optimiste, le plus souvent soutenue par les économistes qui pensent que très peu sinon presque aucune société ne présente des limites strictes de population ou de consommation. Boserup prenant en quelque sorte le contre pied de la théorie Malthusienne, estime que la croissance démographique constitue un moteur de l'intensification dans la mesure où elle pousse les sociétés agraires à accroître la production agricole

alimentaire pour répondre à l'augmentation de leurs besoins. La particularité ou l'élément spécial de la thèse de Boserup et des autres optimistes c'est que l'augmentation de la population peut constituer un facteur positif dans la mesure elle peut induire une réduction des coûts de transaction et stimuler ainsi l'innovation (Boserup, 1965). Le développement et une meilleure organisation des marchés peuvent par exemple fournir des motivations qui encouragent la conservation des ressources, le développement de nouvelles ressources rares et des innovations technologiques. Les facteurs physiques, technologiques, économiques et sociaux se combinent ainsi pour permettre une grande résilience, variabilité et adaptabilité des systèmes sociaux environnementaux. Les scénarios d'évolution des changements d'utilisation de l'espace formulés et explorés pour la zone d'étude reposent sur ces deux théories (chapitres 5 et 10).

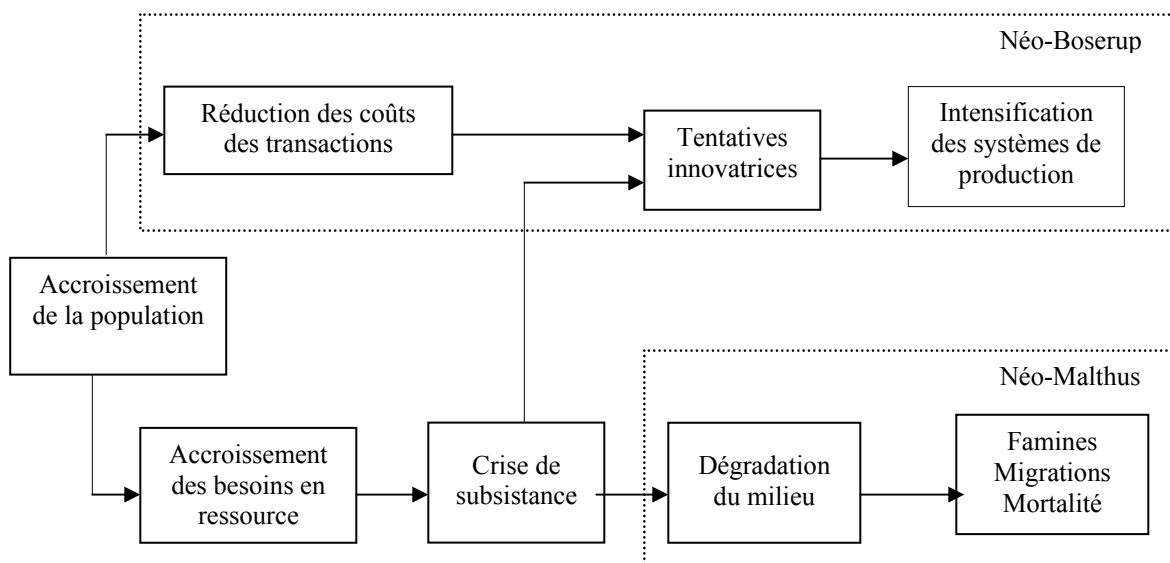


Figure 2.5 : Trajectoires des changements agraires selon les théories de Boserup et de Mathus

Modèle de synthèse des différentes théories sur les changements agraires

En plus des théories de Malthus et de Boserup on peut noter de nouveaux courants de pensée qui se superposent pour alimenter le très long débat sur l'évolution des systèmes agraires et sociaux qui dure depuis plus de deux siècles. La principale contribution de Homer-Dixon (1999) à ce long débat porte sur la manière dont la rareté environnementale peut perturber l'émergence de l'ingéniosité et l'adaptation au sein d'une société. Il reconnaît que la dégradation des ressources et les conflits sociaux qu'elle génère, même les plus violents ne sont pas toujours négatifs car comme le pensent les optimistes économistes, ils peuvent stimuler l'innovation technologique ou conduire à des changements utiles dans la distribution des terres, dans l'organisation institutionnelle et dans le processus de bonne gouvernance. Toutefois, il soutient que dans les pays en voie de développement, les efforts nécessaires à produire des changements constructifs sont submergés par un processus de dégradation environnemental rapide et complexe, réduisant ainsi les chances de produire des réformes. Dans ce cas, la dégradation environnementale conduit ces sociétés dans une spirale de violence, de disfonctionnement et de fragmentation sociale qui se renforce (figure 2.6). Les travaux de Mazzucato et Niemeijer (1996, 2000) montrent que les innovations ne portent pas seulement sur les pratiques d'utilisation de l'espace mais également sur les institutions. Tout comme les optimistes économistes, la vision distributionniste souligne en quoi les arrangements institutionnels et sociaux, mais

pas la disponibilité des ressources naturelles, sont des facteurs clé déterminant le développement des sociétés rurales. Ils se focalisent sur les inégalités dans la distribution des richesses et du pouvoir, soutenant ainsi que les facteurs sociaux et politiques sont des éléments essentiels de toute explication qui se veut complète de la relation qui existe entre la croissance démographique, la rareté des ressources et la prospérité sociale.

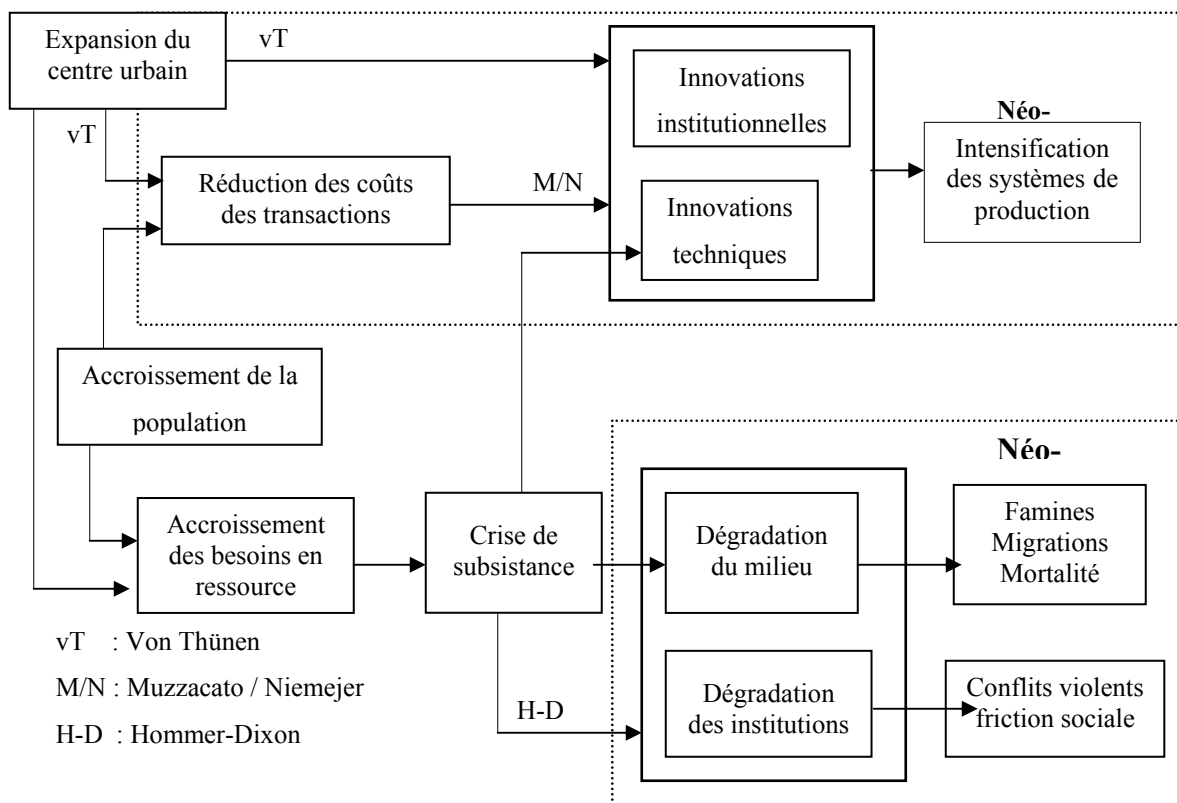


Figure 2.6 : Modèle de synthèse des différentes théories relatives aux dynamiques agraires.

La théorie de Von Thünen est un modèle qui est spécifiquement approprié pour analyser le rôle des centres urbains dans l'évolution du système agricole (Von Thünen 1826; Lambin, 1994 ; O'Kelly et Bryan, 1996). On considère une grande ville au centre d'une plaine qui n'est traversée par aucune rivière navigable et dont les sols d'un niveau de fertilité uniforme sont exploités pour la production agricole. L'importante étendue de la plaine autour de la ville coupe toute communication entre cet état et le monde extérieure (isolated state). Cette ville qui est unique dans cette plaine doit approvisionner la zone rurale en produits manufacturés et obtenir en retour toutes ses provisions des zones rurales environnantes. En supposant que la production se fait de façon absolument rationnelle, l'hypothèse qui soutient cette théorie de Von Thünen est que la distance au centre ville est un facteur qui va affecter le système de production des différentes localités. Ainsi, en s'éloignant de la ville, l'espace sera progressivement alloué aux produits dont le coût de transport est moins élevé en relation avec leur prix. Il est évident que la proche périphérie sera exploitée pour les produits difficiles à transporter (poids ou volume important) et dont le coût de transport est tellement élevé que les localités les plus éloignées ne seraient pas à mesure de les fournir. On verra ainsi, qu'autour de la ville, se dessinent des auréoles concentriques bien différenciées et caractérisées

chacune par ses propres productions de base et des formes de mise en valeur spécifiques (Figure 2.7, adaptée de Rhind et Hudson (1980)).

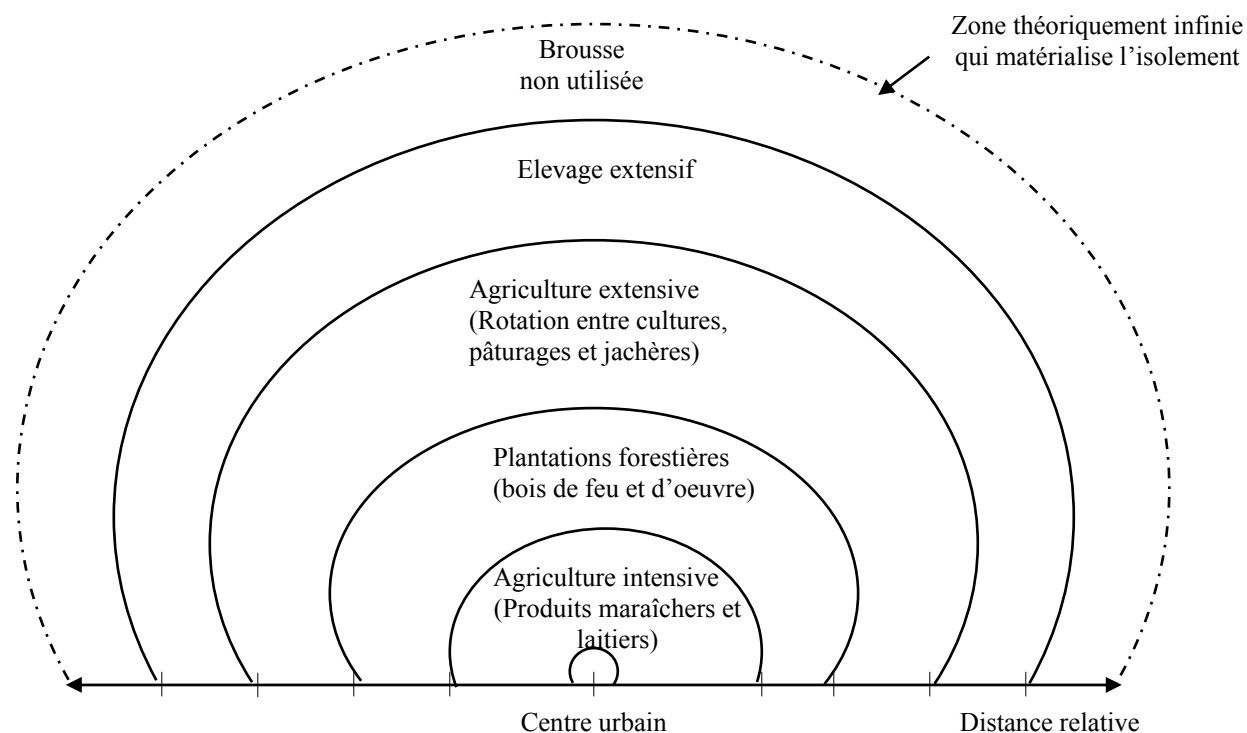


Figure 2.7 : Modèle d'organisation concentrique de l'utilisation de l'espace d'après Von Thünen

Lorsque le centre urbain s'étend et que les marchés se développent, chaque auréole va s'étendre vers la périphérie, résultant en un changement de l'utilisation de l'espace et des systèmes agricoles ou pastoraux à l'échelle régionale. Des zones vont basculer avec le temps d'une utilisation extensive à une utilisation plus intensive. De Groot (2000) a ainsi décrit un zonage de l'espace autour du centre urbain où on distingue principalement quatre zones : une zone naturelle, une zone d'extraction, une zone d'agriculture et d'élevage extensif et une zone d'agriculture et d'élevage intensif. Ces quatre zones définissant trois frontières mobiles : la frontière d'extraction, agricole et d'intensification. En s'appuyant sur l'analyse de l'évolution de la forêt de Sierra Madre aux Philippines, l'auteur soutient l'apparition d'une quatrième frontière consacrée à la protection de la nature dans les zones rurales. Le modèle de Von Thünen, a été exploité pour relier empiriquement la croissance urbaine à la déforestation périurbaine en utilisant les données de télédétection (Lambin, 1994). Toutefois, la déforestation périurbaine ne se diffuse pas toujours sous formes d'auréoles mais procède en fronts disjoints déterminés par le réseau routier ou les variations locales de certains facteurs physiques comme le relief, les types de sols ou les rivières. Ces observations ont donc donné lieu à de nouvelles versions qui incluent une plus grande diversité de systèmes d'utilisation de l'espace et mettent un accent sur les aspects dynamiques et leurs facteurs déterminants (routes, population, importance du marché etc.). Dans le cadre de cette thèse, la localisation du principal centre urbain de la zone d'étude et la croissance urbaine récente suggèrent l'hypothèse d'une organisation de l'utilisation l'espace et de dynamiques obéissant à ce modèle. Le choix approprié des sites d'études

(chapitre 4) et l'analyse quantitative des facteurs déterminants l'utilisation de l'espace effectué au chapitre 9 ont permis de tester cette hypothèse.

Pendant de nombreuses décennies, les scientifiques regardaient les systèmes environnementaux comme des systèmes relativement résilients et stables face aux interactions humaines. Mais pendant les deux à trois dernières décennies, les perceptions des scientifiques ont basculé et ils comprennent que les relations de cause à effet dans les systèmes environnementaux sont souvent mieux représentées par des fonctions mathématiques non linéaires. Ces systèmes peuvent pendant un long moment répondre très lentement et de façon incrémentale aux interventions humaines et changer subitement de caractère. En d'autres termes ces systèmes présentent des effets de seuil : on peut observer de façon continue une faible variation d'une propriété pendant un long moment sans impact notable sur le reste du système. Toutefois, le système peut atteindre un état où un petit changement de la même propriété fait basculer le système au-delà d'un seuil et précipite une transition rapide vers un nouvel état ou équilibre. La théorie des systèmes souligne l'influence des propriétés de seuils, d'interdépendance et d'interactivité sur la dynamique des systèmes environnementaux (Homer-Dixon, 1999). La modélisation par les systèmes multi-agents se trouve appropriée pour étudier ces propriétés du système agricole (Bakam, 2003 ; Parker et al., 2002 ; Bousquet et al., 1998).

2.4. Approches et démarches d'analyse des changements agraires

Les facteurs déterminants les changements agraires sont de nature et de source variées. On peut distinguer trois groupes de facteurs qui correspondent aux interactions entre le système agricole et son environnement. Les facteurs socio-économiques concernent par exemple le marché, la croissance démographique, la culture et les connaissances des systèmes et pratiques traditionnels, les facteurs biophysiques comprennent la variation des précipitations, la fertilité des sols, etc., et les facteurs liés à la gestion de l'espace se réfèrent notamment aux causes immédiates ou stratégies de gestion de l'espace comme la décision de développement de l'infrastructure routière (Verburg et al., 1999). En général, lorsqu'on modélise la dynamique de l'occupation du sol ou de l'utilisation de l'espace, on doit également prendre en compte les institutions ou la macro politique qui peuvent être représentés par les facteurs sociaux (Turner et al., 1995). Certains facteurs qualifiés d'endogènes sont des facteurs proches du paysan ou du système local d'utilisation de l'espace comme les prix, la densité de population, le savoir paysan ou la culture. D'autres facteurs qualifiés d'exogènes sont des facteurs extérieurs qui agissent sur de très grandes distances comme la croissance de la population ou le marché régional.

Comprendre comment ces facteurs se combinent pour conduire à des changements est une question centrale qui intéresse les décideurs et les acteurs impliqués dans la gestion de l'espace, mais reste un problème difficile à aborder dans les études sur les changements agraires. La plupart des approches et modèles qui ont été développés pour répondre à des questions spécifiques, ne sont pas appropriés lorsqu'on veut comprendre le comportement du système de façon plus complète. La nécessité d'une approche interdisciplinaire et intégrée pour résoudre ce problème est de plus en plus reconnue par la communauté scientifique qui travaille sur les changements environnementaux. Les sciences sociales, la géographie et l'informatique à travers les possibilités de développement de modèles dynamiques sont naturellement transversales à plusieurs disciplines et se présentent de ce fait comme des moyens

appropriés pour mettre en œuvre la démarche interdisciplinaire qui est requise dans ce type de situation. Dans cette dernière section, nous décrivons les principales caractéristiques de chacune des approches d'analyse des changements agraires en justifiant la démarche qui a été retenue dans le cadre de cette étude.

2.4.1. Approches sociologiques d'analyse des changements agraires

Les approches d'étude des changements agraires ont été regroupées dans Harriss (1982) en trois grandes catégories qui intègrent plus ou moins les principes de recherche disciplinaire dans les différents domaines des sciences environnementales (sociales, anthropologiques, économiques etc.) : les approches structurées/historiques, les approches systémiques et les approches basées sur les modèles orientés vers la prise de décision. Les approches structurées et historiques commencent par un examen du processus de production et sont concernées par les relations entre les hommes et l'environnement naturel, et par les relations des hommes dans le processus de production. Ces approches placent les concepts de propriété et de contrôle des ressources au centre des analyses et essaient de montrer que ceux-ci déterminent les systèmes d'utilisation de l'espace (Pellissier, 1995). Les approches systémiques incluent les études qui essaient d'utiliser rigoureusement la théorie générale des systèmes dans l'analyse du secteur agricole et les efforts de modéliser les sociétés rurales comme des éléments socio-économiques interdépendants. Les approches systémiques ont été suivies pour caractériser les systèmes agraires par des propriétés similaires à celles des écosystèmes naturels tel que leur productivité, stabilité et résilience (Conway, 1987). Dans cette catégorie d'approche, sont citées les études qui intègrent les facteurs environnementaux, technologiques et cherchent à expliquer leurs interrelations dans le système agricole. La thèse de Boserup (1965) et les études que celle-ci a inspirées sont des illustrations de ces approches. Les approches basées sur les modèles orientés vers la prise de décision concernent les études de l'économie paysanne qui s'intéressent à l'allocation des ressources dans les exploitations et aux réponses paysannes aux marchés et aux innovations. Ces études essaient de mettre en place des modèles dans lesquels les individus font des choix à propos de leurs valeurs et de leurs actions et changent ainsi leurs sociétés. Ce type d'études permet de bien expliquer l'échec ou le succès de l'individu dans le système, mais le système en soi est laissé en dehors de l'analyse.

2.4.2. Approches géographiques d'analyse des changements d'utilisation de l'espace

Nous distinguerons deux principales catégories d'approches correspondant à deux visions différentes et complémentaires de la géographie : celle regroupant les approches basées sur une vision classique de la géographie reposant sur les faits et celle composée des approches basées sur une vision néopositiviste reposant sur la construction des modèles (Bailly, 1996). Ces deux approches ont été combinées dans le cadre de cette thèse. Les résultats de la démarche géographique classique sont présentés aux chapitres 5, 7 et 8 qui fournissent des éléments pour la mise en œuvre des modèles dont les résultats sont présentés aux chapitres 9 et 10.

La vision néoclassique de la géographie privilégie la description des faits pour atteindre l'explication par une démarche inductive basée sur l'exploration. Cette démarche peut se résumer en trois étapes : l'observation analytique d'une aire donnée par collecte de données variées (milieu naturel et humain), le classement et cartographie des morphologies de répartition des observations et la détection des liaisons entre phénomènes en vue de l'explication des répartitions par recherche des causalités directes dans l'aire

délimitée (chapitres 5, 7 et 8). Les approches d'analyse des changements d'utilisation de l'espace qui abordent les questions « où et quoi », appartiennent à cette classe. Ces approches utilisent des observations directes provenant d'une grande variété de sources comme les satellites de télédétection, les statistiques nationales, les inventaires de l'occupation du sol et les mesures de terrain. Les observations fournissent des données sur la distribution spatiale des changements d'occupation et permettent de générer des informations complémentaires pour analyser : les relations spatiales entre les changements d'utilisation et d'occupation, la fragmentation de l'occupation du sol et du paysage, les tendances de diffusion spatiale des changements d'occupation et d'utilisation, d'autres dynamiques spatiales spécifiques. Ces approches permettent de mieux comprendre les dynamiques étudiées et sont parfois des préalables pour les approches reposant sur la modélisation.

La vision néopositiviste privilégie la théorie pour atteindre des règles générales d'explication par une démarche déductive qui insiste sur la rigueur scientifique et utilise l'observation pour tester la théorie. Contrairement à la démarche inductive des approches classiques, la démarche déductive ne part pas des faits observés dans le monde pour ensuite les mettre en relation et les comprendre. Elle élabore une construction théorique des processus qu'elle présume explicative du monde réel et elle la confronte ensuite avec la réalité étudiée afin d'en vérifier la validité. Quelques exemples qui illustrent cette démarche dans la littérature sont la théorie des lieux centraux du géographe allemand Christaller (1933) appliquée à l'organisation des réseaux urbains, la théorie de rente Von Thünen (1826) appliquée à l'utilisation de l'espace périurbain ou encore la théorie de Weber appliquée à la localisation industrielle. Ces démarches se résument dans les étapes suivantes : choix d'une problématique et des faits à étudier, formulation d'hypothèse de travail et élaboration d'une explication théorique des faits, confrontation des hypothèses et de la réalité observée, conclusion par rejet, non-rejet ou modification des hypothèses et de la théorie les soutenant. La démarche globale suivie dans cette thèse inclut des aspects de cette approche déductive. En effet, la modélisation est considérée comme un outil permettant d'anticiper les réponses aux différentes options de gestion; Elle fournit des moyens par lesquels notre compréhension actuelle des processus peut être testée. Les réponses de la modélisation à ce test peuvent mettre en exergue le manque de connaissance et fournir une logique pour établir la priorité entre les domaines de recherche spécifiques qui sont identifiés à l'issue du diagnostic (Toxopeus, 1996).

2.4.3. Approche interdisciplinaire pour l'analyse et la modélisation des dynamiques agraires

La démarche suivie dans cette thèse pour analyser les dynamiques agraires correspond à une approche interdisciplinaire qui combine les éléments des approches sociologique et géographique en s'appuyant sur les outils informatiques d'analyse spatiale et de modélisation dynamique. Les principales spécificités sont le rôle de l'espace, la prise en compte explicite de l'échelle et la manière dont les processus d'utilisation de l'espace s'expliquent. Nous avons montré à la section 2.2 de ce chapitre, le rôle de l'espace dans la définition et dans les approches d'analyse des systèmes agraires. L'importance de la question d'échelle a été également reconnue dans plusieurs recherches sur les systèmes agraires dans différentes disciplines (Fresco, 1995 et De koning, 1999). Ces travaux décrivent les différents niveaux hiérarchiques dans les systèmes d'utilisation de l'espace mais indiquent que l'intégration des variables biophysiques et socio-économiques aux échelles appropriées reste un défi majeur. Les approches d'analyses existantes diffèrent le plus souvent en fonction des objectifs, des échelles, des questions et des thèmes abordés. A chaque approche correspond des méthodes et outils adaptés pour leur mise en œuvre (Turner et al., 1995 ; Lambin

et al., 1999). Deux principaux types d'approches sont reconnus par la communauté scientifique internationale pour aborder les questions de changement d'utilisation de l'espace. Ces deux types d'approches se distinguent par la manière dont l'espace et l'échelle d'analyse sont pris en compte et correspondent à deux courants de pensée.

Le premier type d'approches correspond à celles qui considèrent que la compréhension des dynamiques nécessite d'abord une meilleure connaissance de l'utilisation de l'espace à l'échelle locale. L'élément central est l'acteur ou un agent qui effectue des actions spécifiques en fonction de ses propres calculs et de ses règles de décision qui déterminent les changements d'occupation du sol. Ces approches essaient d'abord de comprendre les décisions liées à l'utilisation de l'espace avant de chercher à les lier aux processus régionaux ou globaux (process to pattern). Les approches correspondant à ce courant de pensée mettent l'accent sur la compréhension des relations entre les acteurs et l'utilisation de l'espace à l'échelle locale. Dans ce premier cas, un nombre de sites de recherche en général de petite étendue (terroir ou village), est sélectionné pour analyser les facteurs déterminant les changements d'utilisation de l'espace à travers des enquêtes socio-économiques ou historiques et des analyses comparatives. Plusieurs travaux de recherche dans la zone d'étude ont abordé l'analyse des dynamiques agraires en s'orientant vers la première approche (Njomaha, 2004 ; Réounodji, 2003 et AnkoGuy-Mpoko, 2002). Ces approches fournissent la compréhension locale qui est déterminante pour la compréhension globale. L'inconvénient de telles études c'est le caractère narratif et le manque de généralité permettant de développer des modèles à un niveau hiérarchique supérieur.

Le deuxième courant de pensées correspond aux approches qui considèrent que l'analyse locale des systèmes de mise en valeur de l'espace ne peut prendre un sens que si elle est reliée à des dynamiques spatiales régionales. Ceux-ci pensent que les connaissances actuelles des dynamiques d'occupation du sol sont insuffisantes du fait que l'on ne dispose pas de mesures de son taux d'évolution, de son extension géographique et de la délimitation de ses structures spatiales. Les approches correspondant à ce courant de pensées sont centrées sur l'analyse des changements d'occupation du sol effectuée sur la base des observations directes et des modèles de diagnostic au niveau régional (Turner et al 1995). Dans ce cas l'occupation du sol est un indicateur important des changements d'utilisation de l'espace et donc des dynamiques agraires. Une attention est donc portée sur les questions relatives au taux de changement d'occupation du sol, à la localisation des changements actuels et futurs, ainsi que les facteurs environnementaux qui expliquent ces changements. Dans ce cas un site d'étude plus large est choisi afin d'analyser la structure et les changements d'occupation du sol en les reliant aux données sur facteurs biophysiques et socio-économiques dans la perspective de dériver et expliquer les processus en cours. Les études empiriques menées ailleurs (Trébuil, 1994 ; Mapedza, 2003) et dans la zone d'étude (Triboulet, 1995) ont montré qu'il y a une bonne corrélation entre les structures observées par télédétection et certaines caractéristiques importantes des systèmes agraires. La télédétection peut donc aider à mettre en exergue les modes d'organisation des territoires et les transformations des paysages. Les paysages agraires étant considérés comme une expression des pratiques sociales et le produit du milieu aménagé par l'homme (Bailly et Ferras, 1997). La priorité de ce type d'approche consiste d'abord à identifier des espaces et périodes de temps nécessaires aux observations qui pourront être reliées aux données d'enquêtes sur les facteurs socio-économiques ou institutionnels qui influencent les changements d'occupation du sol. Des études détaillées peuvent ensuite être menées sur des zones sélectionnées afin d'identifier les

trajectoires génériques et les processus de changement qu'on peut prudemment généraliser dans le cadre d'un modèle dynamique qui représente les relations de cause à effet. (From pattern to process). Les inconvénients de ce type d'approche portent sur : le caractère très fastidieux de l'analyse, du nombre assez important de détails et son faible pouvoir explicatif. De plus certains changements du système agricole sont visibles à travers les paysages alors que certains ne le sont pas, encore moins par télédétection.

La démarche suivie dans cette thèse a privilégié le deuxième type d'approche tout en explorant les possibilités d'intégration des données et informations issues de la première approche. De cette façon on arrive à relier les facteurs déterminants identifiés dans les études locales avec les changements d'occupation du sol identifiés au niveau régional. Réciproquement, les modèles élaborés au niveau régional établissent des bases de projection des changements en se référant aux changements des causes ou des facteurs déterminants. Ces modèles intègrent les variables et des règles d'évolution dérivées des études faites au niveau local afin de générer des résultats temporels et spatiaux explicites utilisables par des modèles globaux.

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit un modèle de représentation des systèmes d'utilisation de l'espace qui met en exergue les propriétés complexes qui caractérisent les systèmes environnementaux. Nous avons également fait une revue des théories qui ont été développées pour expliquer les dynamiques de ces systèmes. Chaque théorie fournit des explications complémentaires à celles fournies par d'autres pour la compréhension de la diversité des processus étudiés. Il apparaît également que les démarches traditionnelles d'analyse des systèmes d'utilisation de l'espace sont le plus souvent dominées par des traditions disciplinaires (sciences sociales, géographie, agronomie, foresterie, etc.). Ce qui conduit le plus souvent à des explications incomplètes des processus étudiés. L'approche la plus appropriée pour l'analyse des systèmes d'utilisation de l'espace devrait par conséquent être interdisciplinaire et prendre en compte les propriétés complexes qui caractérisent les systèmes environnementaux. La démarche suivie dans cette thèse pour le développement du Système d'Information sur l'Environnement SMALL Savannah est fondée à cet effet sur une approche intégrée qui s'articule autour des outils d'analyse spatiale, d'analyse systémique et de modélisation dynamique. Une telle démarche garantit la compréhension qui est nécessaire pour la conception et l'implémentation du SIE. Le chapitre suivant décrit l'ensemble des méthodes et outils qui ont été mis en œuvre dans le cadre de cette démarche.



Photo 3. Le déplacement d'un troupeau de bœufs en saison sèche, à la recherche de pâturages dans la zone de Mindif, région de l'Extrême Nord du Cameroun.

Chapitre 3. Outils pour l'analyse et la modélisation des changements d'utilisation de l'espace

Résumé

L'analyse et la modélisation intégrée des changements d'utilisation de l'espace nécessitent une gamme variée de techniques et d'outils logiciels. L'application de ces outils à des problèmes concrets dépend le plus souvent de plusieurs critères comme les objectifs visés par l'étude, la discipline scientifique ou l'échelle d'analyse. Par exemple, les changements d'utilisation de l'espace à l'échelle régionale sont étudiés le plus souvent en combinant les observations directes, la télédétection et les SIG pour mieux comprendre l'organisation des paysages et suivre leur évolution. Les outils de SIG et d'analyse spatiale sont utilisés pour représenter et expliquer les phénomènes géographiques par rapport à leur localisation. Les outils d'analyse statistique sont utiles pour expliquer et prédire les évolutions en s'appuyant sur les tendances actuelles et la comparaison des séries de données. L'analyse des facteurs qui déterminent les changements d'utilisation de l'espace est en général effectuée à l'échelle locale en utilisant des outils tels que la cartographie participative et les interviews afin d'identifier les motivations et les stratégies des acteurs impliqués dans les processus de changement. A différentes échelles, les modèles dynamiques peuvent être utilisés pour explorer les trajectoires des changements d'utilisation de l'espace et fournir ainsi des informations utiles à la prise de décision. Ce chapitre a pour objectif de présenter ces outils et décrire comment ils ont été combinés et utilisés pour mettre en œuvre SMALL Savannah, le SIE conçu pour l'analyse intégrée des changements d'utilisation de l'espace dans la région des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun.

Mots clés : Changement d'utilisation de l'espace, télédétection, morphologie mathématique, SIG, analyse statistique, modélisation dynamique.

Abstract

The integrated analysis and modelling of land use change requires the use of a wide range of techniques and software tools. The application of these tools often depends on many criteria like the objectives of the study, the scientific discipline or the scale of analysis. For example land use change at regional scale are often analysed by combining direct observations, remote sensing and GIS to better understand landscape organisation and monitor it evolution. GIS and spatial analysis tools are used to represent and explain geographic phenomena according to their location. Statistical tools are useful to explain and predict the evolution based on actual trend and comparison of data series. The analysis of land use change drivers is often undertook at local scale using tools like participatory mapping and interviews in order to identify the motivation and strategies of actors involved in the process of change. At different scales, dynamic simulation models can be used to explore land use change trajectories and provide key information for decision making. The objective of this chapter is to present these tools and describe how they were combined and used to implement Savannah, the EIS designed for the integrated analysis of land use change in the Far North region of Cameroon.

Key words: land use change, remote sensing, mathematical morphology, GIS, statistical analysis, dynamic modelling.

3.1. Introduction

Les systèmes d'utilisation de l'espace comme la plupart des systèmes environnementaux sont très complexes. Le développement d'un Système d'Information pour l'analyse des changements d'utilisation de l'espace nécessite donc une approche et des outils appropriés. Au chapitre 2, nous avons montré que la démarche suivie dans cette thèse pour analyser les dynamiques d'utilisation de l'espace comprend les quatre principales étapes suivantes : 1) identifier les structures d'occupation du sol, quantifier et localiser les changements qui surviennent au cours du temps ; 2) identifier les facteurs biophysiques et socio-économiques qui déterminent ces changements aux différentes échelles spatiales ; 3) quantifier les relations entre les structures d'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants ; 4) élaborer un modèle de simulation des changements et tester des scénarios d'évolution afin d'anticiper les réponses aux différentes options de gestion. La mise en œuvre de cette démarche exige l'utilisation et la combinaison d'outils appropriés à chaque étape. De nombreuses approches et outils d'analyse et de modélisation des changements d'utilisation de l'espace ont été développés. Leur application à des problèmes concrets dépend le plus souvent de plusieurs critères comme les objectifs visés par l'étude, la discipline scientifique, l'échelle d'analyse (Levin, 1992). En géographie et en écologie par exemple, les changements d'utilisation de l'espace à l'échelle régionale sont étudiés le plus souvent en combinant les observations directes, la télédétection, les SIG pour mieux comprendre l'organisation des paysages et suivre son évolution. Les outils de SIG et d'analyse spatiale sont utilisés pour représenter et expliquer les phénomènes géographiques par rapport à leur localisation. Les outils d'analyse statistique sont utiles pour prédire les évolutions en s'appuyant sur les tendances et la comparaison des séries de données. Dans le domaine des sciences sociales par contre, l'analyse des facteurs qui déterminent les changements d'utilisation de l'espace est en général effectuée à l'échelle locale en utilisant des outils tels que la cartographie participative et les interviews afin d'identifier les motivations et les stratégies des acteurs impliqués dans le processus de changement. A différentes échelles, les modèles de simulation peuvent être utilisés pour explorer les scénarios d'évolution future et fournir ainsi des informations utiles à la prise de décision. Ce chapitre a pour objectif de présenter ces outils et décrire comment ils ont été utilisés et combinés pour mettre en œuvre SMALL Savannah, le SIE conçu pour l'analyse intégrée des changements d'utilisation de l'espace dans la région des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. La section 2 décrit comment les outils de la télédétection et de traitement d'image sont utilisés pour identifier les structures d'occupation du sol et les changements dans le contexte des zones de savane. La méthode d'analyse d'image proposée combine itérativement traitement numérique, cartographie participative et photo-interprétation pour extraire des structures d'occupation du sol pertinentes. La section 3 met en exergue la contribution des outils de SIG d'analyse spatiale à la mise en œuvre du SIE. La section 4 présente le modèle statistique et la méthode, utilisés pour explorer les facteurs déterminants et quantifier les relations avec les structures et les changements d'utilisation de l'espace. La section 5 fait un aperçu des modèles de simulation des dynamiques d'utilisation de l'espace existant et justifie le choix de la plate-forme de modélisation retenue pour construire le modèle développé dans cette thèse.

3.2. Outils de télédétection et de traitement d'images

Le point de départ de la démarche suivie pour analyser les dynamiques d'utilisation de l'espace est la cartographie de l'occupation du sol. Dans cette section, nous présentons une méthode qui s'appuie sur les

outils de la télédétection et des SIG pour identifier et extraire les structures d'occupation du sol et les changements dans le contexte des zones de savane d'Afrique centrale (Fotsing et al., 2006). En effet, la télédétection est en évolution constante grâce au développement de nouveaux capteurs et méthodes de traitement numérique des images en réponse aux divers besoins de gestion de l'environnement tels que l'observation, l'inventaire des ressources naturelles, la modélisation des dynamiques et la prévision. Malgré les importants développements de la télédétection, on s'interroge toujours sur l'intégration effective de cette technique à des programmes opérationnels destinés à la gestion des problèmes environnementaux et de développement (Regis et al., 1999). L'une des raisons de cette situation est liée à la difficulté de généraliser les méthodes de traitement testées au laboratoire ou dans un contexte donné. En effet, de nombreuses méthodes ont été développées pour extraire des informations spécifiques sur des territoires bien connus (Bonn et Rochon, 1996). Dans les zones de savanes, les paysages sont très hétérogènes et les dynamiques d'utilisation de l'espace sont loin d'être connues dans l'espace et le temps, l'application exclusive d'une méthode de traitement automatique n'est pas toujours praticable. De plus, les données spatiales détaillées comme les photographies aériennes ou les images satellites nécessaires à cette connaissance sont peu abondantes, souvent anciennes et de qualité approximative (Poncet, 1986). Dans ce contexte, il est important de mettre en œuvre des procédures de traitement et d'analyse d'image appropriées pour arriver à extraire des informations utiles à la compréhension des processus et à la prise de décision. La méthode développée dans cette étude combine itérativement traitement numérique d'image, vérité de terrain, cartographie participative et photo-interprétation. Les traitements numériques appliqués aux images pour extraire les structures d'occupation du sol sont décrits et quelques résultats et éléments de validation de la méthode sont discutés.

3.2.1. Principe de la méthode d'analyse d'images

La procédure d'analyse d'image utilisée pour dériver les structures d'occupation du sol à partir des images satellite comprend les quatre principales étapes suivantes telles que le montre la figure 3.1 : les traitements préliminaires, l'extraction de l'information, la généralisation cartographique, la validation et la correction des classes d'occupation du sol. Chacune de ces étapes nécessite la combinaison de plusieurs traitements d'image de base parmi lesquels on peut citer : l'analyse spectrale, les indices de végétation, les classifications multispectrales, la morphologie mathématique et la photo-interprétation.

On distingue principalement deux types d'approche d'analyse numérique des images spatiales : l'analyse ponctuelle et l'analyse spatiale. L'analyse ponctuelle ou radiométrique est basée sur les lois de comportement spectral des objets et permet d'identifier les objets de façon assez précise. Toutefois, le principal inconvénient c'est qu'il est difficile de généraliser les modèles de comportement spectral testés dans un contexte donné à d'autres situations. En particulier pour les zones de savanes d'Afrique où les paysages sont très hétérogènes, l'analyse spatiale est une approche complémentaire à l'analyse radiométrique. Elle est basée sur la caractérisation des objets par leur position géographique et par des connaissances sur leurs positions relatives dans l'espace (Pumain et Saint-Julien, 1997). Cette approche d'analyse dite géographique est fondée sur l'hypothèse selon laquelle les unités cartographiques définies ne sont pas réparties de façon aléatoire dans l'espace mais présentent une certaine logique dans la distribution spatiale qu'il faut rechercher. Les objets sont reconnus à partir d'études sur le terrain et en relation avec des informations déjà acquises (cartes existantes, photo aériennes, etc.). Une technique complémentaire est la cartographie participative au cours de laquelle les cartes et les images satellites en composition colorée

sont utilisées comme support de base des discussions sur les changements environnementaux, l'appropriation des terres ou tout autre processus qui gouverne les changements d'occupation du sol. L'approche participative a été également choisie comme un moyen d'explorer les perceptions des populations locales sur les changements d'occupation du sol à travers les informations issues des discussions en groupe (Bocco and Toledo, 1997). Lors des interviews semi-structurés, nous avons utilisé une série de questions ouvertes concernant les changements d'occupation du sol et l'utilisation des ressources naturelles pour guider la discussion. Lors de la description des zones utilisées pour une activité donnée, les populations peuvent identifier et tracer les limites des zones utilisées. Ces informations spatiales sont numérisées, importées et superposées avec les images géoréférencées sous le SIG, ce qui facilite la phase de photo-interprétation.

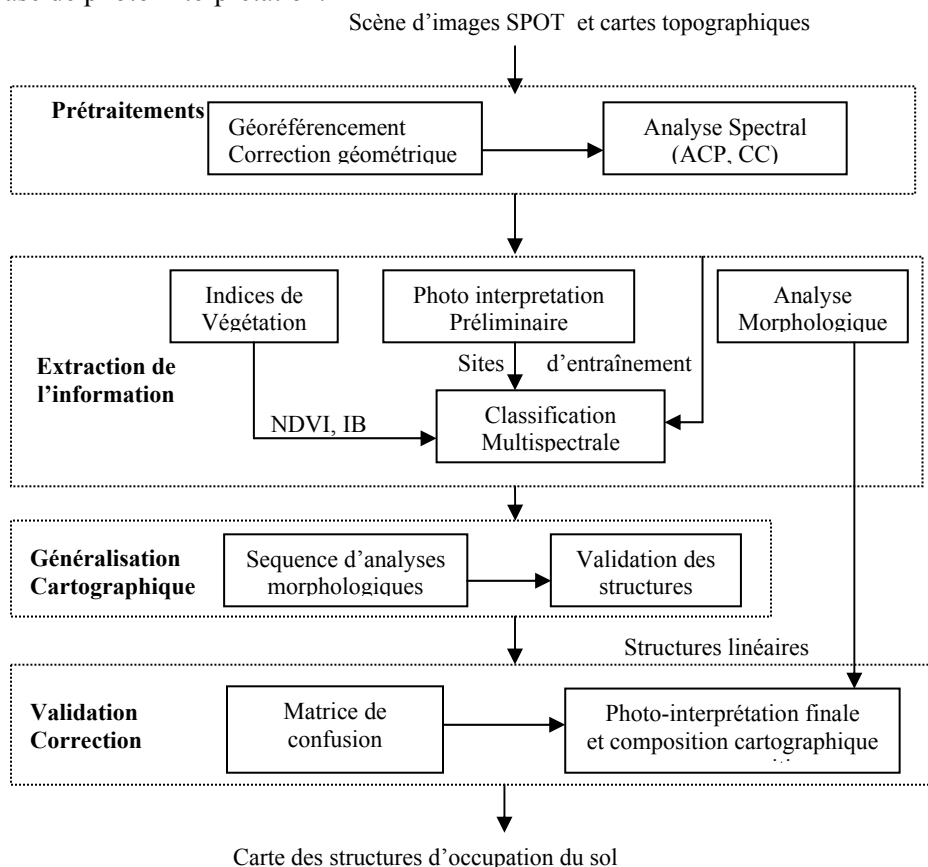


Figure 3.1 : Procédure de traitement et d'analyse des images

3.2.2. Traitements préliminaires

Les traitements préliminaires comprennent la sélection et le géoréférencement des images, et les analyses spectrales préliminaires tels que les compositions colorées et les analyses en composantes principales.

a) Sélection des images et géoréférencement

Le choix des images utilisées pour cette étude a été guidé par le besoin d'une analyse de l'extension récente de la culture du sorgho de contre saison et ses conséquences sur les autres formes d'utilisation de

l'espace, notamment les défrichements de la savane boisée et la dégradation des pâturages. En se référant au calendrier agricole de la région, les images acquises entre le 15 janvier et le 15 février sont apparues les plus appropriées pour atteindre cet objectif car cette période correspond aux dates de croissance maximale et de récolte du sorgho de contre saison. Les données de base acquises comprennent un ensemble de trois scènes d'images satellites (1 scène SPOT de janvier 1987 et 2 scènes SPOT de février 1999), une base de données de points GPS contenant les vérités de terrain et une carte du zonage agroécologique. Les deux scènes d'images SPOT récentes ayant les mêmes paramètres d'acquisition (SPOT XI 4 bandes, 28/02/1999, niveau de traitement 2A) ont été assemblées en une image pour couvrir la zone d'étude. La scène d'image d'archive (SPOT XS 3 bandes, 15/01/1987) a été corrigé géométriquement pour être facilement superposée et comparée à l'image de 1999. Les images étant de niveau de traitement 1B et 2A, les corrections atmosphériques ainsi que les corrections géométriques permettant de compenser les distorsions internes de l'image dues aux conditions de prise de vue sont déjà effectuées (variation d'altitude, effet panoramique, courbure de la terre et rotation de la terre pendant la prise de vue, etc.). Les deux scènes ont été ensuite géoreférencées dans un système de projection défini pour la zone d'étude et dont les caractéristiques sont les suivantes : UTM, Ellipsoïde Clarke 1880, zone 33 hémisphère nord, datum Andinda. Les points de contrôle utilisés ont été collectés avec un récepteur GPS sur des sites identifiables facilement sur le terrain et sur les images disponibles (pont, radier, carrefour, etc.).

b) Analyses spectrales préliminaires

Les compositions colorées de type standard obtenues à partir des canaux XS permettent de localiser certaines entités du paysage qui peuvent déjà être sélectionnés comme zone d'entraînement pour la classification multispectrale. Toutefois, plusieurs autres informations restent cachées. L'analyse en composantes principales (ACP), encore appelée transformée de Hotelling est l'une des nombreuses techniques utilisées pour améliorer la qualité des images en vue de leur interprétation. Etant donnée la difficulté de visualiser simultanément plus de trois bandes spectrales d'une image, on cherche à se ramener à trois composantes sans perdre beaucoup d'information. C'est une transformation orthogonale qui suit la même équation que celle de Fourier (Bonn et Rochon, 1996; Girard and Girard, 1999).

3.2.3. Extraction de l'information sur l'occupation du sol

Ce paragraphe décrit les traitements de base qui ont été combinés et implémentés pour extraire les structures et les thèmes de l'occupation du sol à partir des images satellites.

a) Indices de végétation

Un indice de végétation est une combinaison linéaire des canaux qui est utilisée principalement pour estimer la densité du couvert végétal, différencier les grandes unités naturelles ou culturelles et entreprendre dans certains cas la prévision des récoltes. Les courbes de réflectance d'un végétal vert et d'un sol nu montrent que les plus grandes différences de réflectance entre deux bandes s'observent dans les longueurs d'onde correspondant au rouge et à l'infrarouge. De plus Baret et Guyot (1991) ont montré que ces canaux contiennent 90% de l'information sur le couvert végétal. Ces résultats expliquent le choix de ces canaux pour la formulation de nombreux indices de végétation. Plus de quarante indices de végétation ont été développés dans divers domaines par les chercheurs en télédétection pour différents besoins (Bannari et al., 1998; Bariou et al., 1985; Baret et Guyot, 1991). Ces indices peuvent être regroupés en fonction de plusieurs critères parmi lesquels : l'utilisation qui en est faite, le nombre de

bandes combinées et les opérations de bases appliquées aux canaux. Pour cette étude, l'indice de végétation normalisé et l'indice de brillance généralisé sont les deux indices qui ont été calculés et exploités pour extraire spécifiquement les informations sur le couvert végétal.

L'indice de végétation normalisé (NDVI, Normalised Difference Vegetation Index), qui est l'un des indices les plus utilisés, fournit des bons résultats pour la détection des végétations chlorophylliennes. Il est défini par : $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$. L'indice de brillance généralisé permet de mieux distinguer les sols nus. En présence de recouvrement de végétaux verts inférieur à 25%, cet indice fournit une meilleure corrélation que l'indice de végétation car la réponse spectrale fournie par les données des satellites dans cette région dépend essentiellement du sol (Belghith, 1990 ; Bonn et Rochon, 1996). Il est

défini par : $IB = \sqrt{(IR)^2 + (R)^2}$

b) Classifications multispectrales

La classification ou la segmentation d'une image consiste à la diviser en zones ayant une occupation identique comme la forêt, les habitations ou les cultures. Il existe plusieurs algorithmes de classification et chacune a ses avantages et ses inconvénients. Plusieurs classifications ont été effectuées en utilisant les méthodes de classification supervisée ou non supervisée appliquées aux canaux de base (XS), aux composantes principales (ACP) et aux indices de végétation (NDVI et IB). L'algorithme de classification par les nuées dynamiques utilisée pour l'exemple présenté dans cette section est une méthode non supervisée qui a été appliquée avec succès dans plusieurs domaines tels que la reconnaissance des formes et la neurologie pour dissocier des objets en se basant sur un ensemble de paramètres caractéristiques (Diday, 1978 ; Diday, 1971). Les images obtenues par classification multispectrale présentent le plus souvent une très forte hétérogénéité locale des structures qui ne facilite pas l'interprétation visuelle ou l'intégration avec d'autres données sous un SIG. Pour résoudre ce problème, une méthode de généralisation cartographique basée sur une combinaison convenable des opérateurs de morphologie mathématique est présentée dans la section suivante (Simonneaux, 1995).

c) Analyses morphologiques

Les opérations de morphologie mathématique sont un ensemble d'opérations de traitement d'images basées sur les formes et qui permettent de filtrer des images binaires ou en teintes de gris (Schowengerdt, 1983 ; Coster et Chermant, 1985 ; Serra, 1988). Le principe repose sur la théorie des ensembles et consiste à comparer les structures d'une image avec un objet de référence qu'on appelle élément structurant. Les opérateurs de base de la morphologie mathématique sont l'érosion et la dilatation. Ils permettent de définir des opérateurs plus complexes tel que l'ouverture, la fermeture, la reconstruction géodésique et les Chapeaux Haut de forme (Debaine et al., 1988 ; Legeley et Mering, 1997). Dans ce travail, ces opérations ont été utilisées respectivement pour délimiter des formes d'occupation du sol, extraire des structures linéaires sur des images spatiales et mettre en œuvre une procédure de généralisation automatique d'images classées.

La reconstruction géodésique est une opération qui vise à éliminer les petites composantes connexes sans modifier la taille ou la forme des objets. L'image originale I est appelée masque et on utilise en général comme marqueur, une érosion de taille n donné. Le marqueur est successivement dilaté et on effectue l'intersection avec le masque. L'opération s'arrête lorsque deux intersections sont égales (figure 3.2). On obtient ainsi une image R où toutes les petites zones ont été éliminées. La figure 3.3 illustre les résultats de

chaque étape de cet algorithme. On remarque sur la figure 3.3d que seuls les pixels connexes à un point de l'intersection du marqueur et de l'image initiale sont reconstruits.

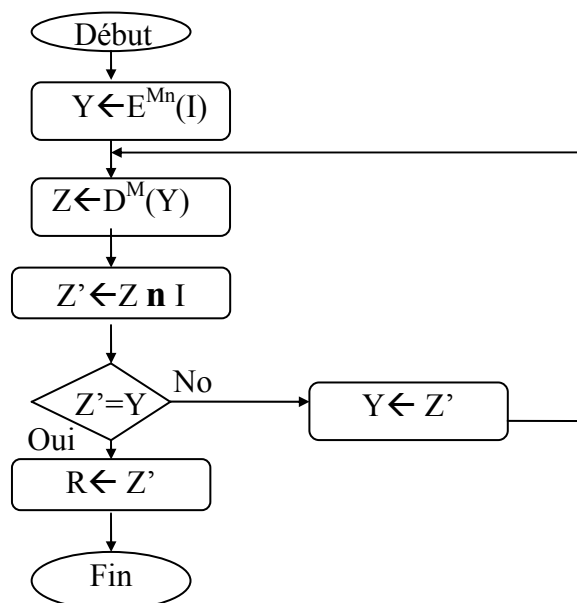


Figure 3.2 : Algorithme de la reconstruction géodésique

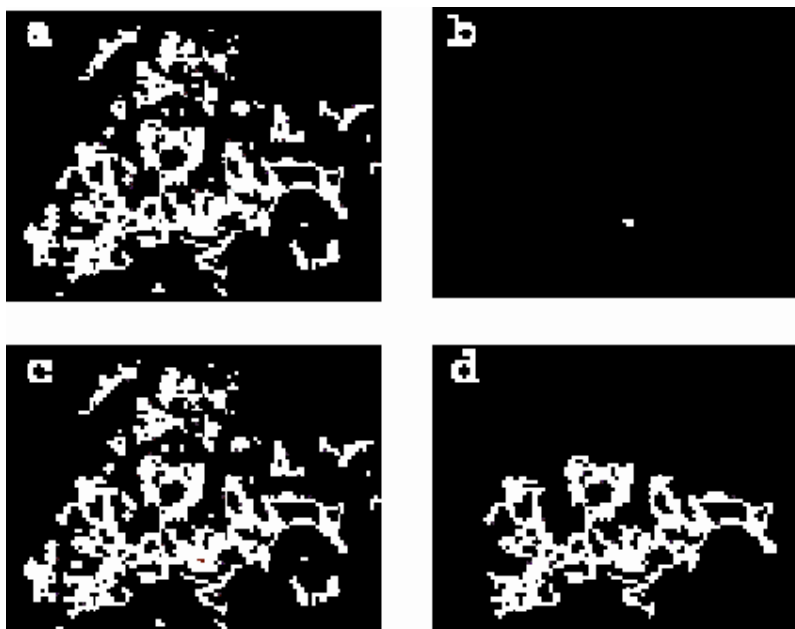


Figure 3.3 : Reconstruction géodésique (d) d'une image binaire (a) Utilisant une érosion de taille 2 comme marqueur (b), masque + marqueur (c).

La reconstruction géodésique est exploitée pour « boucher » de façon efficace les petits trous qui apparaissent dans une zone homogène (figure 3.4). Il suffit d'inverser l'image, d'appliquer une reconstruction géodésique et d'inverser à nouveau l'image. Lorsque l'image est inversée (figure 3.4b), les

petits trous sont considérés comme du « bruit ». En appliquant une reconstruction géodésique, on élimine ce bruit (figure 3.4c). On inverse ensuite l'image résultante pour obtenir une image où les trous sont « bouchés » (figure 3.4d).

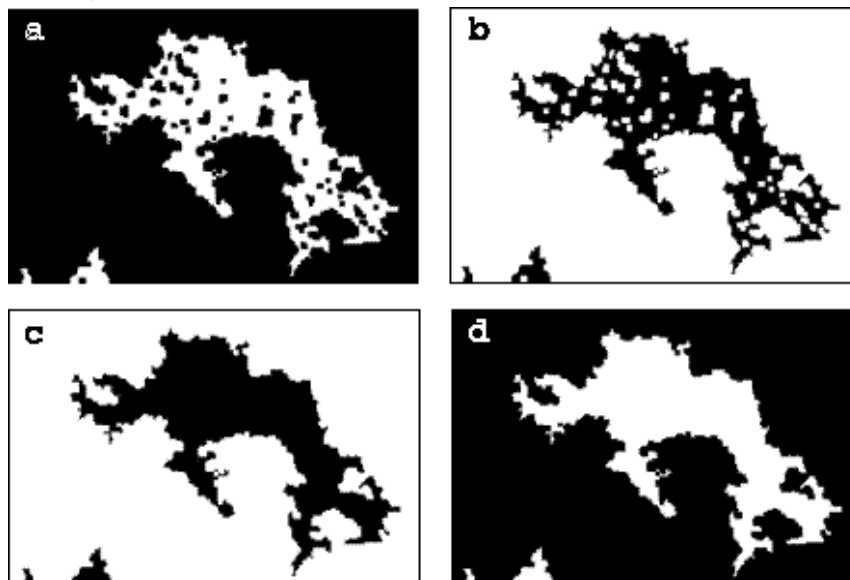


Figure 3.4 : Le « bouchage » des trous sur une image (a) par inversion, reconstruction de l'image inversée (c) et une nouvelle inversion (d).

Les Chapeaux Haut de forme blanc et noir sont des filtres dits morphologiques et sont adaptés pour l'extraction d'objets linéaires fins (sombres ou clairs), d'une épaisseur donnée. Ils ont été exploités par Legeley et al. (1997) pour extraire les failles à partir d'images SPOT panchromatiques. Pour extraire le réseau hydrographique, un chapeau haut de forme blanc de taille 1 avec un élément structurant 5 x 5 (figure 3.5a) est calculé sur la composante 1 de l'ACP et on obtient une image en teintes de gris où le réseau hydrographique est représenté par les plus hautes valeurs de gris. Sur le Chapeau Haut de Forme blanc, nous effectuons deux seuillages avec un choix convenable d'un seuil bas (SB = 10) et d'un seuil haut (SH = 40). On effectue ensuite une reconstruction géodésique du seuil bas en utilisant le seuil haut comme marqueur. Les deux principales rivières de l'image ressortent clairement comme le montre la figure 3.5d malgré quelques bruits qui persistent. On procède ensuite au nettoyage en effectuant un étiquetage automatique des entités connexes (en 8 connexité puis en 4 connexité) suivie d'une extraction des composantes correspondant au réseau.

3.2.4. Procédure de généralisation cartographique

La généralisation cartographique a été mise en œuvre pour produire des unités cartographiques plus homogènes à partir des cartes issues des classifications automatiques soit en éliminant les taches couvrant des petites surface ou en remplissant les trous dans une composante connexe. La procédure comprend quatre étapes principales : extraction et codage de chaque classe, traitement séparé de chaque classe, fusion des classes traitées et généralisation ultime de la carte obtenue.

Une fonction de transfert d'histogramme b_i est appliquée à l'image classifiée et permet de coder chaque classe d'occupation du sol cli en puissance de deux (2^{i-1}). Pour une image de k classes, la fonction b_i est définie par :

$$b_1(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = 0 \\ 0 & \text{si } x \in [1, k-1] \end{cases} \quad b_i(x) = \begin{cases} 2^{i-1} & \text{si } x = i-1 \\ 0 & \text{si } x \in [0, i-2] \cup [i, k-1] \end{cases} \quad b_k(x) = \begin{cases} 2^{k-1} & \text{si } x = k-1 \\ 0 & \text{si } x \in [0, k-2] \end{cases}$$

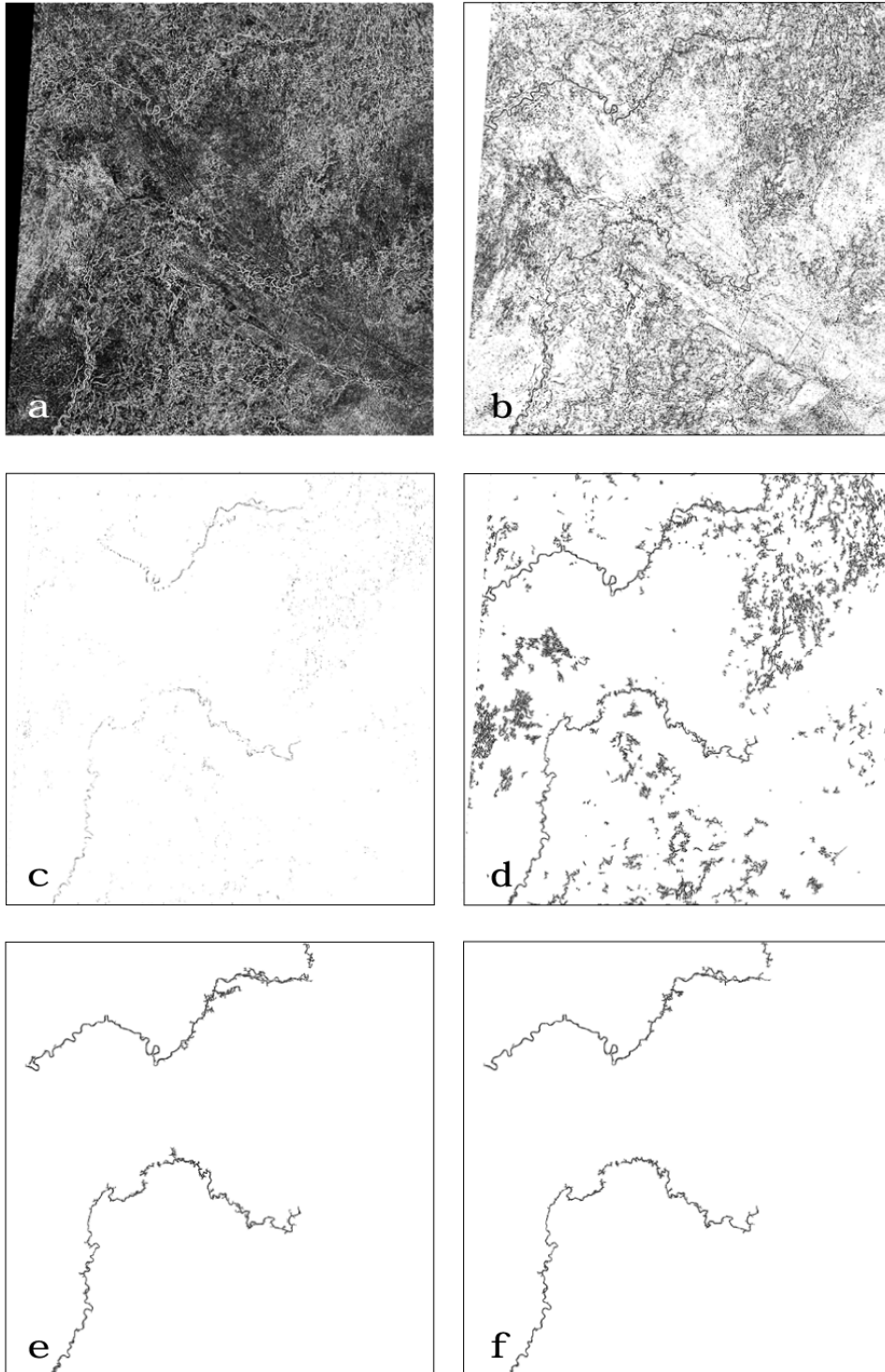


Figure 3.5 : Extraction du réseau hydrographique (f) à partir du Chapeau Haut de forme morphologique blanc WTH (a), par reconstruction géodésique (d) du seuil bas, SB = 10 (b) avec le seuil haut, SH = 40 (c) utilisé comme marqueur. Etiquetage en 8 connexité (e), puis 4 connexité et nettoyage (f).

Le traitement d'une classe consiste à éliminer les entités connexes de petite taille qui sont considérées comme du bruit en appliquant une séquence d'opérateurs de Morphologie Mathématique. Par exemple, une reconstruction géodésique est utilisée pour nettoyer les éléments des petites surfaces et remplir les trous des composantes connexes (figure 3.6b). Puisque des trous persistent, une fermeture peut être utilisée pour joindre les éléments voisins, mais ce traitement induit de larges imperfections (figure 3.6c). On utilise une technique de bouchage de trous qui consiste à inverser l'image, appliquer une reconstruction géodésique et inverser à nouveau le résultat. Pour une image donnée, la même suite de traitement est appliquée à chaque classe en utilisant les mêmes paramètres (nombre d'érosion ou de fermeture et taille de l'élément structurant) de manière à conserver l'importance relative de chaque classe. Le choix de ces paramètres dépend de l'échelle de généralisation qui est la taille approximative des plus grandes entités à éliminer. En théorie, la fusion des classes traitées produit une carte ayant un nombre de classes compris entre k et 2^k-1 . Ce nombre dans la pratique dépend du niveau d'homogénéité de l'image classée et de la qualité du traitement des classes. L'apparition des nouvelles classes correspond à des zones n'appartenant à aucune classe soit à zones appartenant à plusieurs classes après la fusion. La généralisation ultime permet d'affecter chacune des unités de ces nouvelles classes à une des classes initiales. Cette opération consiste en une combinaison de traitement automatique et une interprétation visuelle avec la classification initiale comme référence.

3.2.5. Résultats et Validation

Pour chacune des deux images (1987 et 1999), huit principales classes d'occupation du sol ont été identifiées : habitation, maraîchers/vergers, cultures pluviales, sols nus, sorgho de contre saison, feu, savane boisées, montagnes. Le croisement des deux cartes sous le SIG fournit des informations sur les grandes évolutions et conversions de l'occupation du sol. L'analyse à plusieurs niveaux permet d'avoir des connaissances plus pertinentes sur la diversité des situations et de mieux comprendre les stratégies des acteurs face aux différentes mutations. Une analyse plus détaillée et substantielle de ces résultats est donnée au Chapitre 8.

Validation des thèmes d'occupation du sol

La validation de la qualité sémantique des unités d'occupation du sol est effectuée sur la carte la plus récente. La source de référence utilisée est un ensemble de données relevées au GPS sur des sites où la nature de l'occupation du sol est identifiée et caractérisée sur un rayon de 100 m autour du point. Un effectif de 525 points a été utilisé et la répartition entre les classes d'occupation du sol dépend de l'importance des superficies et des difficultés de détection de chaque classe. Une jointure spatiale a été effectuée entre la carte des points GPS et la carte d'occupation du sol de 1999 pour produire une matrice de confusion. La précision globale mesurée par le coefficient Kappa est de 0.733. Les erreurs (excédent ou déficit) de chaque classe donne des indications détaillées sur les limites de réalisation ou d'utilisation de la carte obtenue (Girard et Girard, 1999). Ces informations sur les erreurs de réalisation ont été localisées et des corrections ont été effectuées afin d'améliorer la précision des cartes obtenues.

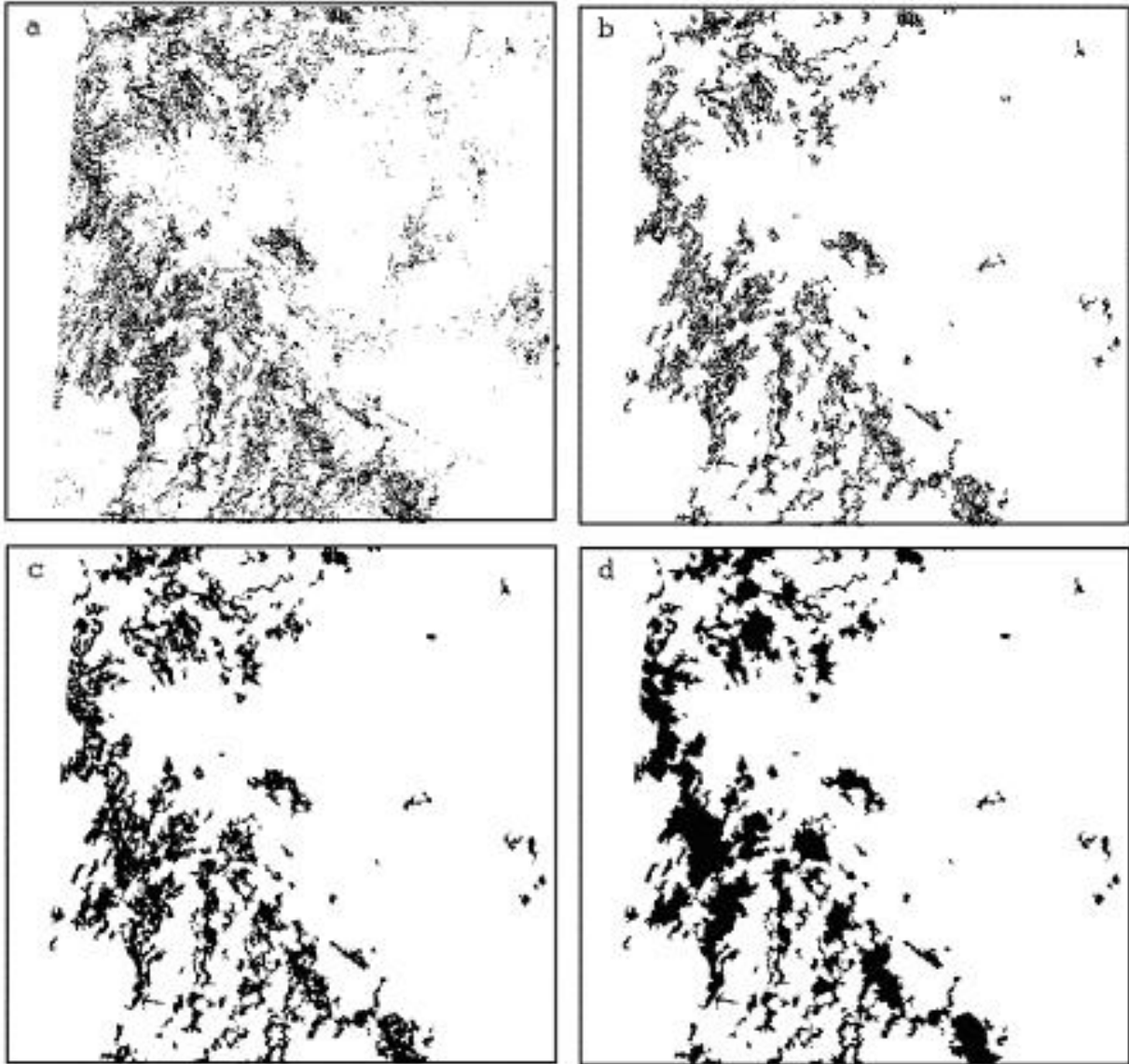


Figure 3.6 : Exemple de traitement d'une classe. a - classe extraite ; b - reconstruction géodésique avec érosion de taille 2 et un élément structurant 3x3 ; c - fermeture de taille 1 avec élément structurant 5x5 ; d - bouchage des trous.

Validation de la procédure de généralisation cartographique

Une première méthode simple de validation de la procédure de généralisation cartographique consiste à calculer les histogrammes de l'image classifiée et de l'image issue de la généralisation et comparer les proportions de chaque type d'occupation du sol. On constate une quasi-conservation de l'importance de chaque type d'occupation du sol après la généralisation. Toutefois, ce résultat ne donne aucune indication sur les changements de la structure de l'occupation du sol au cours de la procédure de généralisation. La différence entre les structures de la carte brute obtenue par classification multispectrale et la carte généralisée peut être appréciée visuellement (figure 3.7).

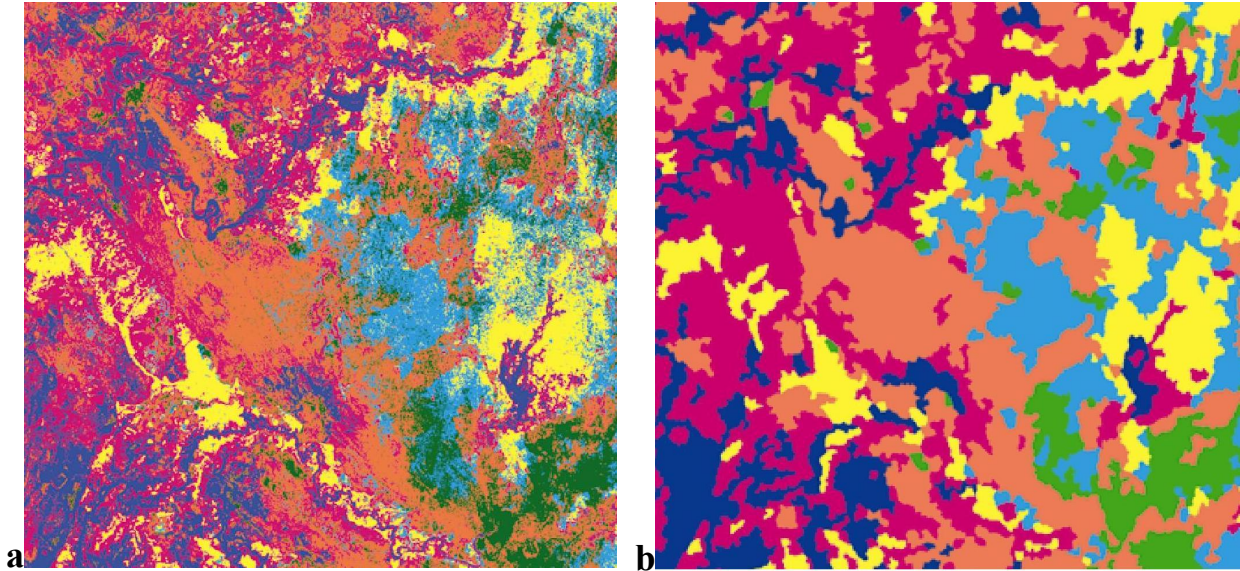


Figure 3.7. Illustration du résultat de la procédure de généralisation cartographique. a. Image classifiée à partir de IB et NDVI. b. Image issue de la généralisation cartographique

La comparaison visuelle donne une idée mais reste une méthode subjective. L’algorithme multi-résolution proposé par Costanza (1989) a été utilisé pour calculer des coefficients de similarité entre les structures d’occupation des deux cartes. Cet algorithme est également utilisé au chapitre 9 pour effectuer un test qui permet de déterminer une plage de résolution appropriée pour représenter l’ensemble des données. Il est ensuite utilisé au chapitre 10 pour évaluer les performances du modèle d’allocation des changements d’utilisation de l’espace en comparant la carte produite par le modèle avec une carte de référence (réalité ou résultat d’un autre modèle). Le principe de l’algorithme de Costanza (1989) repose sur l’idée selon laquelle la mesure à une seule résolution est insuffisante pour décrire et comparer des structures complexes. Ainsi, la comparaison est effectuée en mesurant la similarité des structures sur plusieurs fenêtres de taille variable. Pour une fenêtre de taille w centrée sur une cellule, le coefficient d’ajustement ou qualité de la correspondance entre les deux scènes comparées est défini par la formule suivante:

$$F_w = \frac{\sum_{s=1}^{tw} \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^p |a_{1i} - a_{2i}|}{2w^2} \right]^s}{t_w}, \text{ où } a_{ki} \text{ est le nombre de cellules de type } i \text{ dans la scène } k \text{ pour la fenêtre de}$$

calcul, p est le nombre de type différents et t_w est le nombre total de fenêtre de la scène pour une taille w donnée. Le coefficient d’ajustement global entre les deux scènes noté F_t est une moyenne pondérée des coefficients d’ajustement pour différentes tailles de fenêtre où un poids plus important est accordé aux fenêtres de petite taille sans toutefois ignorer les fenêtres plus grandes. F_t est calculé en utilisant la formule suivante :

$$F_t = \frac{\sum_{w=1}^n F_w e^{-k(w-1)}}{\sum_{w=1}^n e^{-k(w-1)}} , \text{ où } k \text{ est une constante indiquant le poids donné aux fenêtres de faible taille par}$$

opposition aux fenêtres de grande taille.

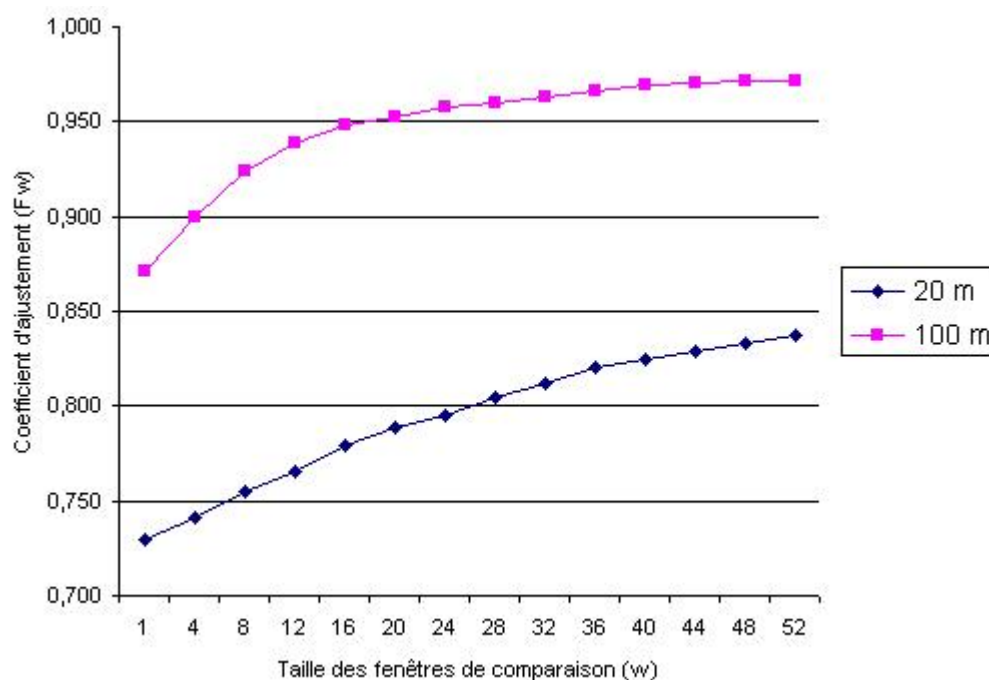


Figure 3.8 : Validation de la procédure de généralisation par comparaison des structures de la classification brute et de la classification généralisée.

Les deux cartes comparées ayant une résolution de 20 m, les résultats montrent que le coefficient de similarité n'est pas assez élevé (0,76) et la courbe des coefficients est sensiblement une droite indiquant des différences perceptibles entre les structures des deux images. Ceci s'explique par le fait que les unités de faibles tailles ont été éliminées au cours de la généralisation cartographique modifiant ainsi les microstructures de l'image. Toutefois, en ramenant les deux cartes à 100 m de résolution, on obtient un coefficient de similarité global assez élevé 0.92 et la courbe des coefficients de similarité pour les fenêtres successives de comparaison a une forme qui traduit une meilleure correspondance des structures entre les deux scènes (figure 3.8). Ce résultat amène à conclure qu'il serait donc plus pertinent d'utiliser la carte obtenue à une résolution supérieure à 100 m. Cette résolution correspond d'ailleurs à la taille de l'unité d'observation des vérités de terrain utilisées pour l'analyse d'image et renseigne sur le niveau de précision des résultats cartographiques.

La validation de la qualité sémantique des unités d'occupation du sol effectuée dans ce cas n'est pas uniquement un moyen d'évaluation de la méthode, mais une étape de la méthode dans la mesure où elle permet d'affiner la photo-interprétation et fournit à l'utilisateur des informations sur les limites de réalisation et d'utilisation de la carte. Les résultats montrent que cette approche combinant traitement

numérique d'image, cartographie participative et photo-interprétation est un moyen réaliste pour dériver les structures d'occupation du sol pertinentes et réunir les connaissances sur les facteurs déterminants ces structures et leurs changements. La cartographie participative assistée avec les images satellites révèle de nombreux détails concernant le repérage des changements dans l'espace et le temps ainsi que sur les causes possibles. Dans le contexte spécifique des zones des savanes d'Afrique, cette approche représente donc une perspective intéressante dans le développement des techniques d'interview pour l'exploration des changements d'occupation du sol et d'utilisation de l'espace.

3.3. Outils de SIG et d'analyse spatiale

Le terme SIG se définit de différentes manières. La première perception du terme qui est la plus courante considère le SIG comme un outil logiciel permettant l'acquisition, le stockage, l'analyse et l'affichage des données qui ont une référence spatiale (Laurini et Thompson, 1996). Une seconde perception du terme SIG le considère comme un modèle, c'est-à-dire une représentation simplifiée du monde réel. Le troisième point de vue qui est étymologiquement le plus correct considère le SIG comme une entité organisée qui comprend un ensemble de données, de ressources humaines, matérielles et logicielles permettant de gérer les données à référence spatiale (Gayte et al, 1997). Dans ce chapitre c'est la première conception qui est considérée. Toutefois nous pourrions faire référence à la deuxième pour indiquer le modèle de données spatial de l'application développée. Dans cette thèse nous utilisons le terme SIE pour faire référence à la troisième perception. Les données à gérer dans un SIE sont presque toujours localisées et il serait impensable de concevoir un SIE sans accorder une place importante aux SIG. C'est ce qui justifie la confusion qui est le plus souvent faite entre SIG et SIE. Compte tenu de notre démarche d'analyse des dynamiques d'utilisation de l'espace qui prend explicitement en compte les références spatiales des processus étudiés, les SIG jouent un rôle important dans les différentes étapes de l'analyse et de la mise en œuvre des applications. Il assure deux principales fonctions à savoir l'acquisition et la gestion des données géographiques, l'analyse spatiale et la présentation des informations géographiques. La figure 3.9 montre comment chacune de ces fonctions contribue à la mise en œuvre de chacun des principaux modules du SIE SMALL Savannah notamment le diagnostic et la caractérisation, l'identification des facteurs déterminants et la simulation des dynamiques spatiales de l'utilisation de l'espace.

3.3.1. Acquisition et gestion des données géographiques

Le SIG permet d'abord d'importer et de géoréférencer les données issues de la télédétection (images satellites et relevées GPS) et les cartes existantes. Les traitements dépendent du format de la source de données. Les données au format vecteur sont directement intégrées dans la base de données géographique avec d'autres sources de données. Les données au format raster sont digitalisées et les données attributaires y sont associées. Les fonctions de superposition des couches d'information du SIG sont utilisées pour faciliter le diagnostic et la caractérisation du système d'utilisation de l'espace en combinant les données et connaissances issues de sources diverses : revue de la littérature, statistiques agricoles, recensement (population, cheptel), analyse d'images satellites ou de cartes existantes (Bocco et Toledo, 1997).

3.3.2. Analyse spatiale et présentation des résultats de simulation

Les opérations d'analyse spatiale du SIG sont utilisées sous deux formes : la première consiste à combiner les données spatiales multi-dates et multi-thèmes afin de détecter les changements et formuler des hypothèses sur les facteurs potentiellement déterminants ; la deuxième consiste à construire des variables spatiales qui traduisent l'inscription spatiale des phénomènes étudiés comme par exemple la pression humaine sur l'espace et l'influence de l'accessibilité ou de l'aptitude des sols sur les changements d'utilisation de l'espace. Les fonctions de présentation graphique des SIG sont utilisées pour visualiser les résultats de la simulation qui peuvent être superposés avec d'autres couches d'information pour faciliter la localisation et l'interprétation des dynamiques d'utilisation de l'espace.

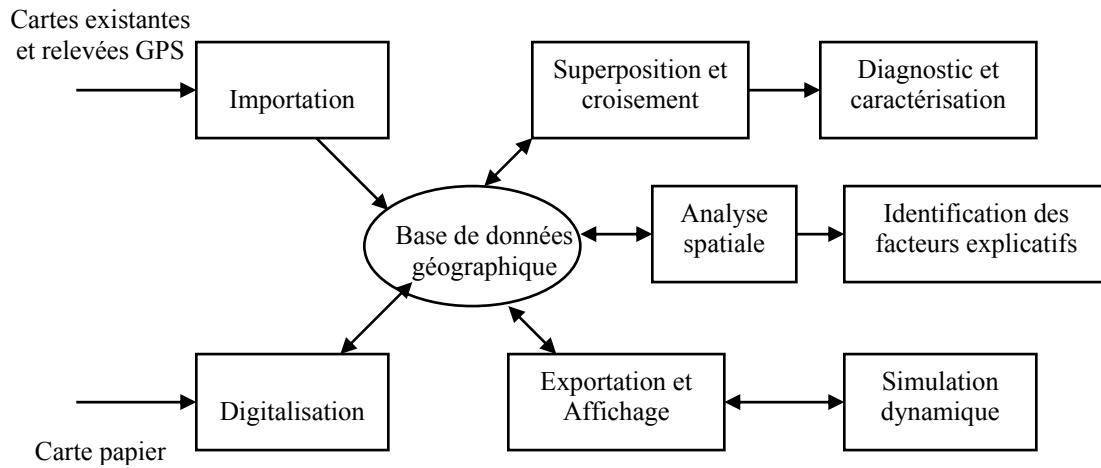


Figure 3.9 : Rôle des outils de SIG dans l'analyse intégrée des dynamiques d'utilisation de l'espace.

3.4. Outils et modèles d'analyse statistique

3.4.1. Modèle d'analyse statistique

L'analyse quantitative de la relation entre l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants est effectuée afin d'identifier les facteurs qui se combinent pour influencer significativement la distribution spatiale de chaque utilisation et mesurer l'importance de chaque facteur dans cette interaction. Le modèle de régression logistique est adapté pour ce type de problème où la variable dépendante est de type binaire (Agresti and Finlay, 1997). En effet la carte de chaque utilisation de l'espace LU est de type binaire c'est-à-dire $LU(x, y) = 0$ pour l'absence ou $LU=1$ pour la présence de cette utilisation à la position i de coordonné (x, y) . Pour une seule variable indépendante X représentant un facteur déterminant potentiel, le modèle de régression simple est défini par :

$$P_i(LU = 1) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 X)}}, \text{ qui peut encore s'écrire } P_i(LU = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X)}}$$

où P_i est la probabilité de l'évènement « LU=1 dans la portion i de l'espace ». Plus généralement et de façon analogue, pour plusieurs variables dépendantes X_1, X_2, \dots, X_p , représentant les facteurs déterminants potentiels, le modèle de régression multiple est défini par :

$$P_i(LU = 1) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad , \text{ où } z \text{ est la combinaison linéaire } Z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p$$

Des deux équations précédentes on déduit que :
$$\text{Log}\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p$$

La relation entre les variables indépendantes et cette probabilité est non linéaire et la probabilité estimée est toujours entre 0 et 1. La valeur Z peut être interprétée comme une mesure de la préférence à affecter l'utilisation LU à la portion i de l'espace. De cette façon on arrive à calculer pour toutes les portions de l'espace, la probabilité d'affectation de chaque utilisation de l'espace qui pourrait être utilisée pour définir les préférences en cas de compétition entre plusieurs utilisations de l'espace. Les régressions multiples de type logistique sont ainsi utilisées pour construire des modèles de prédiction de la distribution spatiale des différentes utilisations de l'espace sous l'influence des différents facteurs déterminants.

3.4.2 Procédure d'exploration des facteurs et de construction des modèles de prédiction

La construction des modèles de type empirique est difficile à cause du nombre important de facteurs qui interagissent pour influencer la structure et la dynamique de l'utilisation de l'espace. De plus, ces facteurs peuvent changer de nature ou d'importance au cours du temps. Une des difficultés qui se posent est de sélectionner les variables les plus pertinentes à inclure dans le modèle. La procédure d'exploration et d'identification des facteurs déterminants proposée ici est principalement de type inductive. Toutefois, elle intègre les aspects de raisonnement déductif. Elle commence par des observations de la réalité et cherche des explications à partir de l'analyse des liens ou des régularités dans les données. A l'opposé, le raisonnement déductif part d'une connaissance théorique des processus, formule des hypothèses qui sont testées dans le monde réel pour fournir des explications aux phénomènes (Overmars et al., 2006). L'idée principale de la méthode est de tirer profit à la fois profit des connaissances sur les processus et des possibilités offertes par les données spatiales explicites disponibles. Lorsqu'on ne dispose d'aucune théorie ni connaissance sur un processus, on explore les données à la recherche des corrélations et structure explicatives. Lorsqu'on a une connaissance même approximative ou théorique des facteurs pertinents pour une explication, celle-ci sert à formuler des hypothèses qui sont testées avec l'exploration des données disponibles. On arrive ainsi à construire des modèles de prédictions robustes c'est à dire qui sont assez représentatifs des processus en cours et à venir.

On peut distinguer plusieurs situations qui justifient l'intérêt de l'approche d'exploration des facteurs utilisée. Le pire cas est celui où un processus est observé, une bonne connaissance sur celui-ci est disponible mais, les moyens d'acquérir les données spatiales explicites pour le mettre en évidence font défaut. Dans certains cas, on dispose des données spatiales explicites, mais l'analyse des données ne permet pas de mettre en évidence le processus pourtant observé du fait que les données ne sont pas collectées à l'échelle appropriée. Inversement, dans une autre situation, la relation peut être trouvée entre les données mais ne présente pas d'intérêt soit par manque de connaissances sur le processus, soit parce

qu'on ne s'y intéresse pas. Ce dernier cas est caractéristique des approches réductionnistes et disciplinaires où on s'intéresse à étudier l'influence de facteurs prédéfinis. Une autre situation, intermédiaire, est celle où l'on n'a pas de certitude sur la pertinence du processus et l'on ne dispose pas de données explicatives sur la relation observée.

Les étapes suivies pour la construction des modèles de prédiction de chaque utilisation de l'espace sont illustrées à la figure 3.10. Le diagnostic et la caractérisation du système d'utilisation de l'espace de la zone d'étude permettent de formuler les hypothèses sur les processus et la manière dont ils opèrent dans l'espace. Ces informations sont utilisées pour calculer des variables représentatives des phénomènes étudiés en utilisant les données spatiales disponibles. La première étape de l'algorithme consiste à construire des régressions simples entre l'utilisation de l'espace et toutes les variables. Pour limiter les effets de multi-colinéarité, certaines variables sont exclues du modèle lorsqu'elles sont à priori redondantes avec d'autres variables. La deuxième étape consiste à sélectionner les variables qui contribuent plus significativement à l'explication de la structure et les changements d'utilisation de l'espace. Les informations utilisées sont les paramètres statistiques des régressions simples et les connaissances disponibles sur les processus modélisés. Les trois paramètres statistiques sur lesquels s'appuie la sélection sont : le sens de la corrélation déterminé par le signe du coefficient β_i , la signification statistique de la corrélation et le pouvoir explicatif de la variable représenté par la valeur ROC ou Relative Operating Characteristics (Pearce et Ferrier, 2000; Pontius et Schneider, 2001).

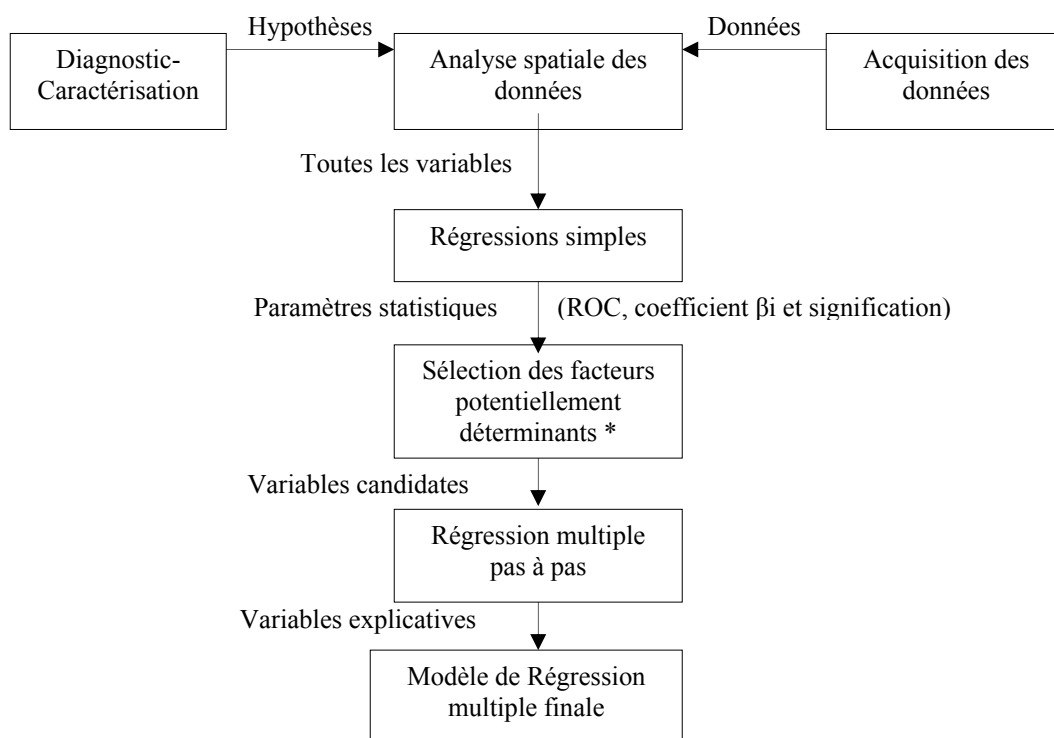


Figure 3.10 : Algorithme de construction des modèles de prédiction de chaque utilisation de l'espace

Pour toutes les régressions simples, la variable est rejetée si le sens de la corrélation est contraire aux connaissances qu'on dispose sur le processus. Le niveau de signification statistique de la corrélation est une évaluation de la contribution de la variable indépendante à l'explication de la variable dépendante.

Dans un test statistique, c'est en général à l'utilisateur de déterminer la valeur qui convient à sa situation. Une valeur inférieure à 0,05 est le plus souvent considérée comme significative, soit un coefficient de confiance de 95%. Dans cette application la plupart des variables retenues sont significatives avec un niveau inférieur à 0.01. Toutefois, quelques variables ont été incluses dans les modèles avec un niveau compris entre 0.01 et 0.9. La valeur ROC est une mesure de la qualité de la régression logistique tout comme le coefficient de détermination R^2 de la régression linéaire. La valeur de la variable dépendante peut être prédite à « présente » ou « absente » si la probabilité prédite est supérieure ou inférieure à une probabilité seuil dont le choix dépend des besoins de précision du modèle. Les cellules peuvent être réparties en fonction de la conformité entre la réalité et le modèle comme le montre le tableau de la figure 3.11. La sensibilité définie par $\frac{A}{A+C}$ est la fraction de cellules de valeur « présente » qui ont été prédites à « présente ». La spécificité définie par $\frac{D}{B+D}$ représente la fraction de cellule de valeur « absente » qui ont été prédites à « absente ». La valeur ROC représente la superficie de la courbe décrite par les valeurs de la sensibilité et de la spécificité pour un ensemble de probabilité seuil. Un exemple de courbe ROC d'un modèle de prédiction est donné à la figure 3.11. Un modèle aléatoire donne une valeur de 0.5 alors qu'une correspondance parfaite donne une valeur ROC de 1.

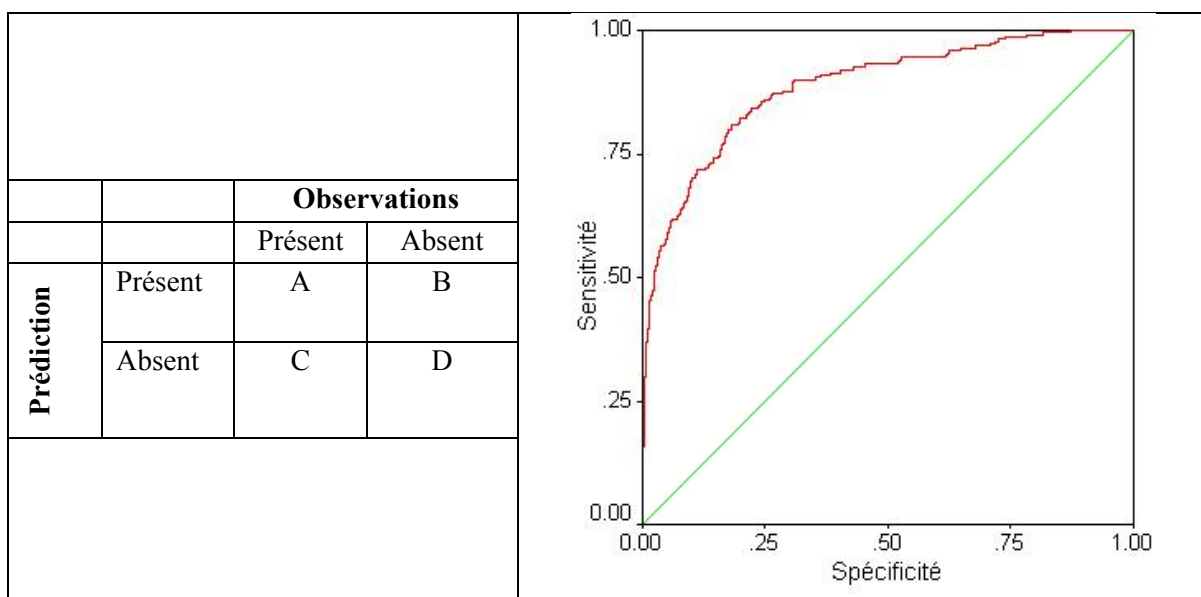


Figure 3.11 : Exemple de courbe ROC du modèle de prédiction de l'utilisation de l'espace « Habitation ». ROC = 0, 887 représente la valeur de la surface en dessous de la courbe.

Deux valeurs seuils ROCs1 et ROCs2 telles que $ROCs1 < ROCs2$ sont fixées comme performances minimales exigées respectivement pour les variables candidates ou déterminantes par hypothèse et les variables non-candidates ou non déterminantes par hypothèse. Ces valeurs seuils peuvent varier d'une utilisation de l'espace à une autre en fonction des précisions de prédictions attendues. Une variable déterminante par hypothèse est sélectionnée lorsque son pouvoir explicatif est supérieur à ROCs1. Une variable non déterminante par hypothèse est sélectionnée si le pouvoir explicatif est supérieur à ROCs2 et si elle traduit un processus hypothétique même si l'on ne dispose pas assez d'information sur ce dernier.

La troisième étape consiste à effectuer une régression pas à pas avec l'ensemble des variables sélectionnées. Cette étape permet également de trancher sur certains cas de multi-colinéarité non résolus à l'étape 1 en éliminant du modèle final certaines variables. La dernière étape consiste à calculer le modèle de régression multiple finale qui permet ensuite de calculer la probabilité pour qu'une cellule soit affectée à une utilisation de l'espace. Les performances de ces modèles sont également évaluées en utilisant la méthode ROC (Pearse, et Ferrier, 2000; Pontius et Schneider, 2001). Un bon modèle de prédiction doit être sûr et avoir une bonne capacité de discrimination. La sûreté est considérée dans le sens où chaque prédiction est une estimation précise de la probabilité de rencontrer une utilisation sur une cellule donnée. La capacité de discrimination est différente et nécessite une approche de mesure différente. Dans ce dernier cas, le modèle doit être capable de distinguer correctement les sites occupés de ceux non occupés par une utilisation, indépendamment de la sûreté des prédictions. (Pearce et Ferrier, 2000). Les résultats de cette procédure d'exploration des facteurs déterminants sont présentés au chapitre 9 pour un ensemble de données sur une petite région du Nord Cameroun. Les modèles obtenus sont ensuite utilisés au chapitre 10 pour prédire la distribution de l'utilisation de l'espace. La comparaison de l'évaluation des performances de prédiction de plusieurs modèles indique que le modèle le plus pertinent n'est pas nécessairement celui correspondant aux hypothèses, ni celui correspondant aux meilleures corrélations fournies par les données mais un compromis, tendant à refléter la réalité des processus qui opèrent dans le système d'utilisation de l'espace.

3.5. Outils et modèles de simulation

3.5.1. Typologie des modèles de changement d'utilisation de l'espace

Les modèles de changement d'utilisation de l'espace en particulier sont conçus principalement pour répondre à quatre types de questions fondamentales : pourquoi, quand et où les processus opèrent-ils, quels sont les effets et les conséquences de ces processus dans l'espace et dans le temps ? Une très large gamme de modèles appliqués à l'utilisation de l'espace a été développée pour répondre à ces questions et des revues assez complètes ont été réalisées par Baker (1989) et Lambin (1994). Des revues plus récentes sur les modèles d'utilisation de l'espace ont été effectuées par Briassoulis (2000), Irwin et Geoghegan (2001), Sanders (2001), Lambin et al. (2003) et Parker et al. (2003). Dans cette étude, nous nous intéressons aux modèles de simulation qui sont développés pour prédire les changements des structures d'utilisation de l'espace. La classification de ces modèles peut s'appuyer sur plusieurs critères : le type de questions auxquelles ils permettent de répondre ou les domaines d'applications privilégiés, les possibilités techniques et la base théorique ou la manière dont les processus sont appréhendés. On peut distinguer trois principales classes de modèles qui dépendent principalement de la manière dont les processus sont appréhendés : les modèles empiriques, les modèles mécanistes et les modèles de type système (figure 3.12).

Les approches de modélisation spatiale de types empiriques basées sur les transitions de probabilité, sont nées de la combinaison de la télédétection, des SIG et des modèles mathématiques multi-variés ou multi-temporels. La construction de ces modèles qui sont en général de type spatial et statistique s'appuie sur une hypothèse de stationnarité du processus : on suppose que les relations observées entre les variables restent valables au cours de la période de simulation. Les techniques statistiques sont utilisées à cet effet

afin de sélectionner les facteurs déterminants les plus importants et de quantifier leurs relations avec l'utilisation de l'espace. L'implémentation dans les modèles de simulation se fait par une translation directe de l'analyse empirique en probabilité de transition (Bell et Hinojosa, 1977 ; Veldkamp et Fresco, 1996).

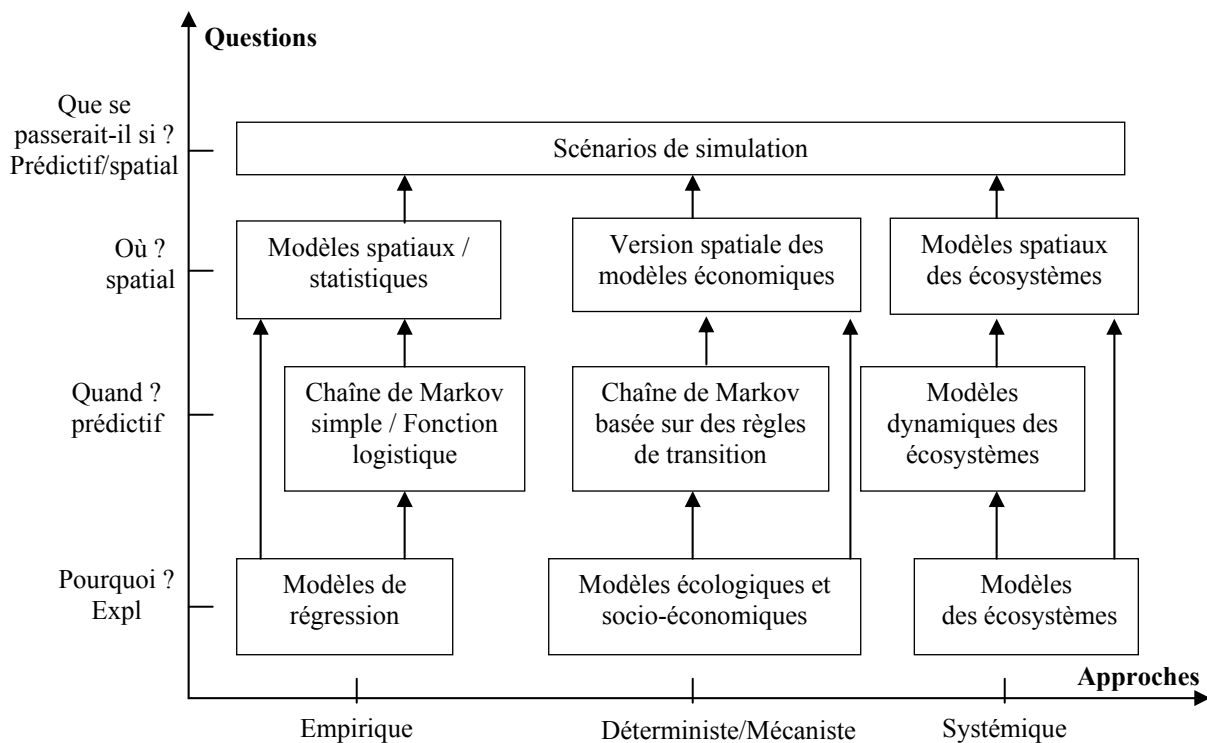


Figure 3.12 : Typologie des modèles de simulation des dynamiques d'utilisation de l'espace.

Les modèles mécanistes qui sont le plus souvent de type déterministe permettent de représenter les interactions entre les types d'utilisation de l'espace et les rétroactions dans le système. Ceci suppose une connaissance des processus qui gouvernent le fonctionnement du système. Les processus individuels sont modélisés en utilisant des lois ou règles décrites par des équations simples. Les modèles d'optimisation de type équation différentielle ou de type programmation linéaire (Njiti et Sharpe, 1994 ; Roetter et al., 2005) appartiennent à cette classe. Dans ces modèles mathématiques, la relation entre l'utilisation de l'espace et ses facteurs déterminants est supposée connue. Les modèles de type système décrivent plusieurs processus complexes en interaction en insistant sur les relations, les interactions entre tous les composants. Ils permettent ainsi de mieux simuler les interactions entre les systèmes sociaux et environnementaux. Les modèles de type multi-agents permettent de représenter explicitement les interactions entre agents et fournissent ainsi un cadre qui permet de prendre en compte les dynamiques de systèmes et les logiques individuelles ou collectives de prise de décision (Bousquet et al., 1998 ; Parker et al., 2003). Les modèles basés sur les automates cellulaires permettent d'implémenter les interactions entre unités spatiales en prenant en compte les relations de voisinages entre elles. Ces types de modèles sont appropriés pour la simulation des systèmes complexes mais, leur mise en œuvre nécessite également une bonne connaissance des interactions élémentaires.

Chacune des classes de modèles présente ses avantages et ses inconvénients. Même au sein de chaque classe, les modèles sont différents en fonction des objectifs, des disciplines ou des échelles d'analyse, mais chaque modèle a une contribution significative pour représenter les processus et prédire leur évolution. Toutefois, l'utilisation exclusive de plusieurs de ces modèles ne permet pas toujours de comprendre le comportement du système de façon assez complète à cause des contraintes liées à l'approche, à l'échelle ou à une discipline. C'est ce constat qui a stimulé très récemment un besoin de développement de modèles intégrés au sein de la communauté scientifique intéressé par la modélisation des changements d'utilisation de l'espace (Lambin, 1994 ; Riebsame et al., 1994 ; Lambin et al., 2003).

3.5.2. Démarche et choix du type de modèle de simulation de changement d'utilisation de l'espace

La démarche suivie dans le cadre de cette thèse avait pour objectif de développer un modèle intégré qui tire profit des articulations ou combinaisons possibles entre les différentes classes de modèles existants. Le plus souvent, les comparaisons faites aux sujets des modèles ne portent ni sur la même région, ni sur les mêmes processus, ni dans les mêmes conditions (Pontius et al, 2007). Théoriquement, il aurait été intéressant de réaliser un modèle de chacune des trois classes sur la même zone d'étude et de comparer les résultats pour dégager les contributions respectives de chaque type de modèle avant d'étudier les possibilités d'intégration. Ce travail est difficile à cause des contraintes de temps et surtout du fait de l'indisponibilité des données et des connaissances assez limitées qu'on dispose sur le fonctionnement interactif et dynamique entre les systèmes socio environnementaux dans la zone d'étude. Une deuxième possibilité serait de concevoir directement un modèle intégrant les aspects complémentaires des différents types de modèle. Cette approche semble plus logique mais très difficile à mettre à œuvre aussi bien sur le plan théorique que pratique. La troisième possibilité qui a été suivie qui semble plus réaliste était de partir d'un modèle et de le faire évoluer en intégrant les aspects des deux autres types de modèle. Les travaux antérieurs ont montré que lorsqu'un système devient très complexe pour être décrit analytiquement, une solution empirique doit nécessairement être recherchée (Easterling, 2000), les modèles hypothétiques de type déterministe étant limités compte tenu du fait qu'on a une compréhension incomplète du système (Kok, 2001). Le point fort des approches de modélisation spatiale de type empirique réside dans la distribution spatiale des éléments du paysage et des changements de sa structure dans la mesure où il permet de projeter et afficher dans un format cartographique la structure du paysage futur qui résulterait de la continuation des pratiques actuelles de gestion de l'espace. Les approches de type empirique constituent donc un bon point de départ de notre démarche d'analyse du système agraire qui vise à identifier les problèmes, décrire le système et concevoir les trajectoires d'évolution (chapitre 1).

Les modèles de type transition de probabilité ont été étudiés et se trouvent appropriés pour l'étude de la transformation des paysages ainsi que l'analyse des processus de diffusion spatiale. Les chaînes de Markov appartiennent à ces approches stochastiques permettant de décrire des processus qui se déplacent dans une séquence à travers un ensemble d'états. Le modèle des chaînes de Markov est défini par une fonction qui lie l'utilisation de l'espace à chaque instant avec l'utilisation la plus récente et les probabilités de transition d'un état à un autre au cours d'un intervalle de temps (Bell et Hinojosa, 1977). La principale difficulté de la mise en œuvre de ce modèle réside dans la définition de la fonction de transition. Les probabilités de transition peuvent être estimées statistiquement à partir d'un échantillon de transitions survenues au cours d'un intervalle de temps donné. Ceci nécessite d'importantes quantités de données qui ne sont pas toujours

disponibles dans le contexte de la zone d'étude. En l'absence de données détaillées sur les transitions, les probabilités de transition peuvent être définies en formulant des règles de comportement des éléments du paysage (Lambin, 1994). Un autre moyen consiste à les relier à un ensemble de variables exogènes et dans ce cas, les probabilités de transition sont définies par les modèles de régression. CLUE (Conversion of Land Use and its Effects) est un exemple de cadre de modélisation dynamique basée sur cette approche empirique qui a été conçu pour explorer les effets des facteurs déterminant l'utilisation de l'espace et de simuler les changements en réponse à la croissance démographique. Le modèle dynamique prend en compte le système d'interaction complexe entre l'utilisation passé et présente de l'espace, les conditions socio-économiques et les contraintes biophysiques pour allouer les changements (Verburg et al., 1999).

3.5.3. La plateforme de modélisation CLUE

Structure de la plate-forme et modèle d'allocation des changements

La plateforme de modélisation CLUE (Conversion of Land use and its Effects) a été développée pour simuler les changements d'utilisation de l'espace en s'appuyant sur une analyse des relations quantitatives entre l'utilisation de l'espace et ses facteurs déterminants, combinée avec une procédure de modélisation dynamique qui permet de simuler la compétition entre plusieurs formes d'utilisation de l'espace. Depuis sa première version (Veldkamp et Fresco, 1996), le cadre de modélisation CLUE a connu plusieurs développements ultérieurs mais le principe fondamental reste le même et repose sur les étapes suivantes: 1) la collecte et le traitement préalable de grand ensemble de données ; 2) l'analyse statistique des facteurs déterminants l'utilisation de l'espace à différents niveaux ; 3) la modélisation dynamique et spatiale explicite des changements l'utilisation de l'espace et 4) la possibilité d'exécution de scénarios d'évolution future.

Les données sur l'utilisation de l'espace sont enregistrées avec une résolution choisie par le modélisateur en fonction des objectifs, de l'étude, de la nature du processus étudiée et de la précision recherchée. Les cellules ne sont pas nécessairement homogènes et contiennent un pourcentage de chaque type d'utilisation de l'espace. Une analyse quantitative de la relation entre la distribution spatiale actuelle et les facteurs potentiels permet de dériver des équations de régressions multiples qui sont utilisés pour le calcul de l'utilisation de l'espace à une date t donnée (De Koning et al., 1998). En comparant l'utilisation actuelle à celle calculée par régression, on identifie facilement les zones dont le pourcentage de l'utilisation de l'espace a une tendance à la hausse (inférieure à celle calculée par régression) ou à la baisse (supérieure à celle calculée par régression). On peut produire une carte montrant les zones où une augmentation ou une diminution de l'utilisation de l'espace peut être escomptée.

Le modèle dynamique d'allocation des changements est composée de deux principaux modules : un module de calcul de la demande et un module d'allocation spatiale des changements. Le modèle repose sur une hypothèse Boserupienne qui suppose que la production agricole se développe en réponse à la demande alimentaire. Ainsi, le module de calcul de la demande évalue à l'échelle nationale, les changements de la demande totale en produit sur la base de la taille de la population et de la productivité des terres. Cette évaluation s'appuie sur des méthodes d'extrapolation simples ou sur des modèles économiques plus ou moins complexes qui considèrent les mutations en cours les plus importantes et les scénarios formulés (De Koning et al., 1999a; Veldkamp et Fresco, 1997). La procédure d'allocation spatiale des changements

d'utilisation de l'espace tient compte des facteurs biophysiques et socio-économiques déterminants (fertilité des sols, structure et importance de la population, relief, etc.) à différentes échelles (De Koning et al., 1999b, Verburg et al., 1999). La tendance générale des changements est d'abord calculée à grande échelle afin de capturer l'influence des facteurs qui agissent sur une très grande distance. En cas d'augmentation de la demande pour une utilisation considérée, on sélectionne toutes les cellules dont l'utilisation considérée a une tendance à augmenter. La différence est calculée pour toutes les cellules sélectionnées et une fraction de cette différence est additionnée à l'utilisation actuelle. Cette fraction est ajustée itérativement de telle manière que l'utilisation agrégée de toutes les cellules soit égale à la demande pour ce type d'utilisation à l'échelle nationale. Cette première allocation permet d'identifier les zones avec un changement relatif plus ou moins grand en comparant les changements absolus des cellules individuelles avec la moyenne des changements pour toutes les cellules. Une deuxième allocation est ensuite effectuée à fine échelle sur la base des résultats de l'allocation à grande échelle en prenant en compte les contraintes locales et la compétition entre les types d'utilisation de l'espace. A fine échelle, on sélectionne également les cellules dont le l'utilisation a tendance à augmenter et on calcule la différence. A cette échelle, la fraction d'utilisation allouée dépend du changement relatif calculé à grande échelle (Verburg et al., 1999). Les scénarios effectués fournissent des résultats différents suivant que l'allocation est faite uniquement à grande échelle, uniquement à fine échelle ou par une allocation par l'approche multi-échelle.

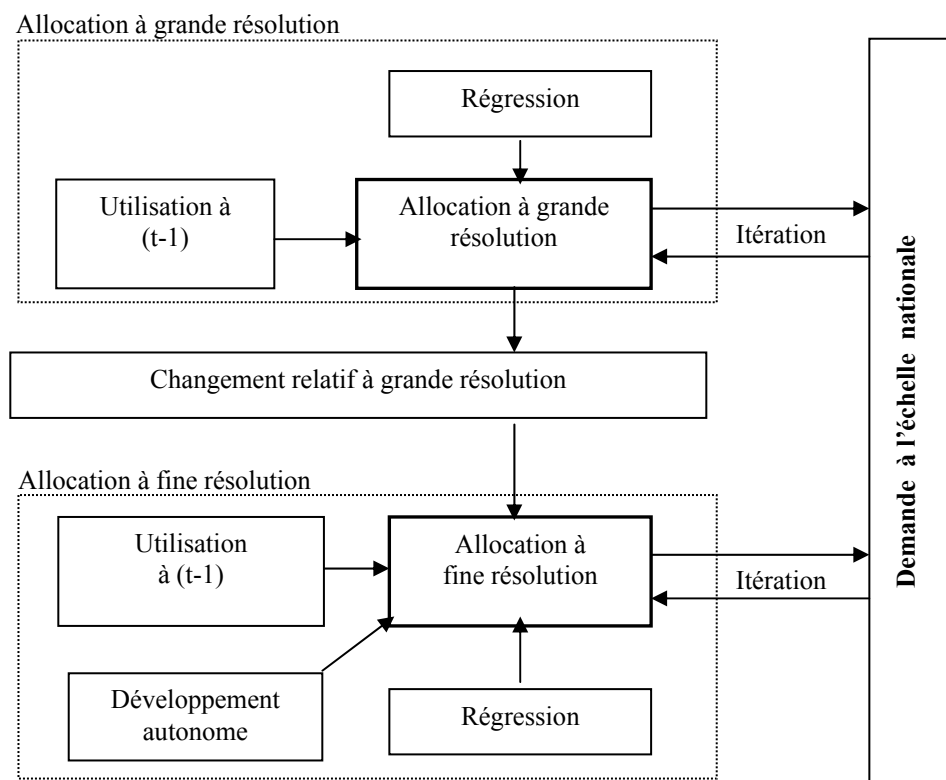


Figure 3.13 : Procédure d'allocation des changements dans la plateforme de modélisation CLUE (extraite et adaptée de Verburg et al., 1999).

Une limite majeure de la procédure d'allocation qui est proposée vient du fait que les changements ne sont effectués que pour les cellules dont la tendance du couvert est du même sens que celui de la demande au niveau national. Afin de prendre en compte les effets ascendants les développements autonomes sont mis

en oeuvre pour prendre en compte les changements exclusivement basés sur les conditions locales (Verburg et al., 1999 ; De Koning et al., 1999a). Ainsi les cellules qui n'ont pas été sélectionnées pour les changements dans la procédure précédente subissent un changement proportionnel à la différence spécifique entre le couvert actuel et celui calculé par régression. Dans cette situation, la fraction est déterminée par l'utilisateur du modèle et devra en général être plus petit comparé au changement dans la direction de la demande. Les résultats des scénarios montrent que l'implémentation des développements autonomes produit une plus grande dynamique du système. Enfin, la compétition entre les différents types d'utilisation (total des utilisations >100%) nécessite une modification de l'allocation des changements. La modification des changements des différents types d'utilisation est fonction de la force de compétition qui dépend de la différence entre l'utilisation actuelle et celui calculé par régression et du changement dans la demande.

Application de CLUE aux petites régions : CLUE-S

La première version de la plate-forme CLUE a été principalement appliquée à de très vastes régions à l'échelle nationale et continentale où les données sont le plus souvent issues de recensement et disponibles à très petite échelle, induisant une représentation à faible résolution spatiale ou la taille du grain est grande. Les exemples d'application ont été développées pour le Costa Rica, l'Equateur et la Chine (De Koning et al., 1998 ; De Koning et al., 1999 ; Verburg, 2000 ; Kok et Winograd, 2001). Une représentation pertinente de l'utilisation de l'espace dans ces cas est donnée par la proportion de chaque type d'utilisation dans une cellule. Lorsqu'on s'intéresse à l'utilisation de l'espace à l'échelle d'une petite région, cette forme de représentation n'est très adaptée dans la mesure où on ne dispose que des données à grande échelle où l'information disponible sur une unité (polygone ou cellule) représente l'utilisation de l'espace dominante. C'est le cas lorsqu'on utilise des cartes existantes ou les cartes produites par analyse d'image de télédétection à haute résolution. En plus du problème de représentation des données, les applications régionales présentent des spécificités qui ne sont pas prises en compte dans cette première version de la plateforme. Les développements récents de la plateforme ont par exemple porté sur l'application du modèle aux espaces de taille relativement petite en utilisant des données à très haute résolution. La version CLUE-S (CLUE for Small regions), a été développée pour des petites régions et intègre les spécificités et propriétés des systèmes d'utilisation de l'espace à cette échelle (Verburg et al., 2002).

La procédure d'allocation du modèle traduit ces demandes en changement dans l'espace en s'appuyant sur les probabilités de chaque cellule à être affectée aux différentes utilisations. En s'appuyant sur les résultats de régression, une carte de probabilité peut être calculée pour chaque type d'utilisation de l'espace. Une nouvelle carte de probabilité est calculée chaque année avec les valeurs mises à jour des facteurs déterminants qui changent dans le temps tel que la distribution de la population ou l'accessibilité. La probabilité P_i ($\sum_j P_{ij} = 1$) pour que la cellule i de la carte d'utilisation de l'espace LU soit affectée à l'utilisation j est déterminée par le modèle de régression logistique défini à la section précédente. L'allocation des changements est faite suivant une procédure itérative qui utilise les données suivantes : la carte actuelle de l'utilisation de l'espace, les cartes de probabilités et la demande de chaque utilisation de l'espace (figure 3.14). L'utilisateur de la plateforme peut spécifier des règles de décision pour indiquer des restrictions de changement ou une politique de gestion de l'espace donnée. Ce sont des règles qui déterminent les conditions sous lesquelles une utilisation de l'espace peut changer à chaque pas de temps.

L'implémentation de certaines règles dans le système consiste à affecter une résistance au changement à certaine utilisation de l'espace de façon à générer la stabilité dans la structure du système. Une élasticité relative ($ELAS_u$) comprise entre 0 et 1 est définie pour l'utilisation de l'espace considérée sur la base des connaissances du système agraire ou lors de la calibration du modèle. Trois possibilités sont envisageables : $ELAS_u = 1$ lorsque les transitions sont difficiles ou impossibles après la première conversion, $ELAS_u = 0$ lorsqu'il n'existe aucune restriction au changement et $0 < ELAS_u < 1$ pour le cas des utilisations de l'espace opérant entre les deux extrêmes. Plus l'élasticité sera grande, et plus il sera difficile à convertir cette utilisation. L'algorithme d'allocation à chaque pas de temps se résume dans les étapes suivantes :

1. Sélection des cellules candidates au changement,
2. Pour chaque cellule i , la probabilité totale est calculée suivant la formule $TPROP_{i,u} = P_{i,u} + ELAS_u + ITER_u$ où $ITER_u$ est une variable d'itération propre à l'utilisation de l'espace u et $ELAS_u$ son élasticité.
3. Une allocation préliminaire est faite avec une valeur égale de la variable $ITER_u$ pour toutes les utilisations de l'espace. Chaque cellule est allouée à l'utilisation de l'espace qui a la plus grande probabilité totale. Cette opération produit un changement d'utilisation pour un nombre de cellules.
4. La surface totale allouée à chaque utilisation est comparée à la demande. Pour les utilisations où la surface allouée est plus petite que la demande, la variable d'itération est incrémentée et dans le cas contraire, la variable d'itération est décrétementée.
5. Les étapes de 2 à 4 sont exécutées jusqu'à ce que les allocations soient égales aux demandes. La carte d'utilisation de l'espace de l'année en cours est sauvegardée et l'algorithme continue au pas de temps suivant.

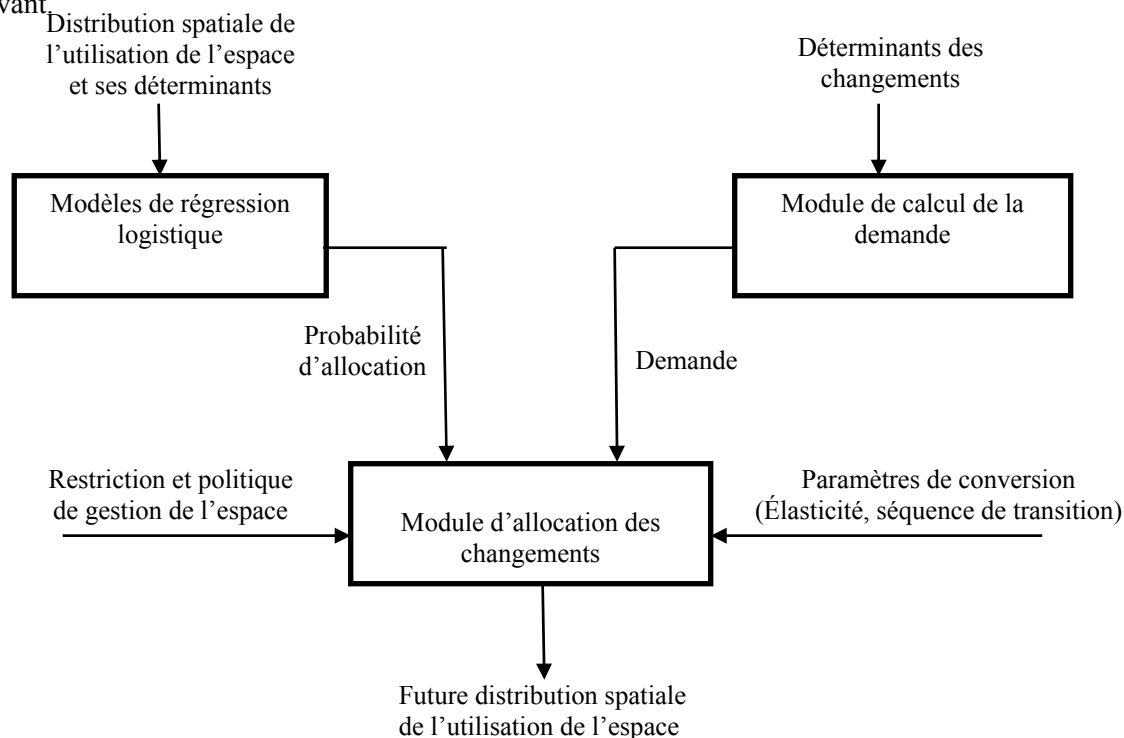


Figure 3.14: Echange d'information avec et entre les modules de la plateforme CLUE-S.

En assurant un lien continu entre la demande régionale et les potentialités locales pour chaque type d'utilisation de l'espace, cette procédure d'allocation prend ainsi en compte l'interaction entre différentes échelles qui est requise dans les modèles de changement d'utilisation de l'espace. Une autre façon de prendre en compte la propriété multi-échelle des systèmes d'utilisation de l'espace consiste à inclure dans les modèles de régression, des variables représentant des facteurs déterminants qui opèrent sur de grandes distances comme l'accessibilité au centre urbain ou la distance à la route. Une première version du modèle développé pour la petite région autour de Maroua dans l'Extrême Nord du Cameroun est présentée au chapitre 10.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les méthodes et outils logiciels qui sont utilisés pour la mise en oeuvre du SIE SMALL Savannah. Une première remarque qui se dégage de cette présentation est le fait que chaque outil apporte une contribution spécifique aux objectifs et à la finalité globale du SIE. Il s'agit notamment d'observer l'environnement, gérer l'information environnementale, analyser et prévoir les phénomènes en vue de supporter le processus de prise de décision pour une gestion rationnelle de l'environnement. Les outils de traitement d'images et de la télédétection (Cartographie, GPS, etc.) contribuent à l'observation et au suivi de l'environnement. Les SIG et outils d'analyse spatiale contribuent à la gestion de l'information environnementale et à l'analyse des phénomènes environnementaux dans un contexte spatial. Les outils d'analyse statistique contribuent à explorer les grandes bases de données et aident à expliquer ou prévoir les phénomènes environnementaux. Les modules de simulation aident à mieux comprendre le fonctionnement des systèmes environnementaux et explorer les scénarios d'évolution, fournissant ainsi un support d'aide à la décision. Une deuxième remarque qui se dégage de cette présentation et qui caractérise les SIE concerne la grande diversité de ces outils. Une raison majeure qui explique cette diversité est l'hétérogénéité des données manipulées par les SIE qui exige de recourir à des techniques de stockage, des méthodes de traitement et d'analyse qui ne sont pas toujours toutes disponibles dans un seul logiciel. De plus, plusieurs tâches du SIE ne sont pas informatisables contrairement aux SI classiques. Les outils développés restent des outils d'analyse isolés où très peu d'accent est mis sur les interfaces Homme-Machine. Les chercheurs et experts dans le domaine de l'environnement ont donc hérité d'une longue tradition d'utilisation d'outils spécifiques pour des traitements donnés. Le cloisonnement du traitement de l'information environnementale a contribué à la génération d'un nombre croissant d'applications logicielles qui sont très faiblement intégrées. Ceci ne permet pas toujours une gestion cohérente et la restitution de l'information environnementale aux utilisateurs. Les méthodes de développement des SIE devraient prendre en compte cette spécificité en proposant des techniques pour faciliter l'intégration des applications.

Partie 2

Analyse préalable et conception du Système d'Information sur l'Environnement SMALL Savannah

Chapitre 4. Un dispositif multi-échelle d'analyse des dynamiques agraires en zone des savanes

Chapitre 5. Analyse préalable de la structure et des dynamiques du système agricole de la région des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun

Chapitre 6. Architecture du Système d'Information sur l'Environnement SMALL Savannah



Photo 4. Un point de vente du bois de feu sur la route Maroua-Waza, région de l'Extrême Nord du Cameroun.

Chapitre 4. Un dispositif multi-échelle pour l'analyse des dynamiques agraires en zone des savanes

Résumé

Les questions d'échelle sont très importantes et se posent dans presque toutes les applications environnementales. Lorsqu'on étudie les dynamiques agraires, une préoccupation importante est de savoir les échelles auxquelles opèrent les processus ainsi que les échelles d'observation appropriées. Les études agronomiques et socio-économiques à l'échelle de l'exploitation agricole ont un avantage certain pour la compréhension de la dynamique des systèmes agraires. C'est l'échelle qui semble la plus appropriée pour identifier les éléments structurants du système agraire et analyser leur logique d'organisation et leur mode de gestion. Toutefois, les études à l'échelle du terroir montrent déjà les limites de ces approches locales qui présentent pour la plupart un caractère sectoriel et disciplinaire. De plus en plus, les expériences révèlent que ce n'est qu'à l'échelle de la petite région et plus encore à l'échelle régionale, que certains processus clés et des contrastes plus marqués se manifestent dans les systèmes de mise en valeur des espaces et leur niveau de productivité. En effet, il n'existe pas une échelle a priori mais des plages d'échelles pertinentes pour analyser les dynamiques agraires. Le développement d'approches multi-échelles est de plus en plus déterminant dans les études sur les écosystèmes. Ce chapitre décrit le dispositif régional et multi-échelle sur lequel repose SMALL Savannah, le SIE conçu pour analyser les changements d'utilisation de l'espace en zone des savanes. La hiérarchie spatiale du dispositif est présentée et les questions relatives aux méthodes de changement ou d'articulation d'échelle sont ensuite abordées.

Mots clés : zonage agroécologique, dynamique des systèmes agraires, hiérarchie spatiale, hiérarchie de processus, changement d'échelle

Abstract

Scale issues are very important and can be found in almost all environmental applications. When studying land use system dynamics, one important question is to identify scales at which processes are operating and also the appropriate observation scales. Agronomic and socio-economic studies undertaken at farm level have several advantages for the understanding of agrarian systems dynamic. This small-scale approach appears to be the most appropriate for identifying key features and components of the agrarian system, and for understanding their rules of organisation and management. Most of these farm-level studies present a great technical and disciplinary tendency. As a result, analysis at the village level already presents some limits to such small-scale approaches. Further, an increasing number of studies have revealed that several key processes and the diversity in land use systems and their productivity are likely to appear only at a regional level. In fact, there is not one scale but a range of appropriate scales to analyse land use system dynamics. The development of multi-scale approaches is thus becoming increasingly important for the study of natural ecosystems. This chapter presents the regional and multi-scale framework of SMALL Savannah, an EIS design for the analysis of land use changes in savannah areas. The spatial hierarchy of this framework is presented and issues related to crossed-scale analysis and scale transfer methods are discussed.

Keywords: agro-ecological zoning, dynamic of agrarian systems, spatial hierarchy, process hierarchy, cross-scale.

4.1. Introduction

Les concepts d'échelle ont été introduits et clarifiés au chapitre 2. Ils sont rappelés ici pour justifier le choix du dispositif qui a guidé le développement du SIE SMALL Savannah. En effet, l'échelle est une caractéristique spatiale des entités et des phénomènes observés qui, se réfère soit à leur dimension réelle, soit au rapport entre leur dimension réelle et leur dimension de représentation. Cette notion recouvre les notions d'étendue et de résolution. La notion de niveau qui fait référence en réalité à une caractéristique d'un système organisé est souvent également assimilée à une échelle. La notion d'hierarchie se réfère aux interactions ou relations de causalité entre processus qui opèrent à différents niveaux d'un système organisé. Ces concepts d'échelle et de niveau sont liés et influencent presque tous les phénomènes géographiques. Ainsi, la nature des phénomènes observés ou les résultats de certaines analyses peuvent changer considérablement s'ils sont représentés à des échelles différentes. Dans le même ordre d'idées, des travaux ont démontré que dans plusieurs domaines, en particulier en écologie, chaque processus qui opère dans le paysage survient dans une plage d'échelles caractéristiques (Quattrochi et Goodchild, 1997). L'échelle d'observation de ces processus doit être choisie en conséquence. A petite échelle, le niveau d'agrégation assez élevé peut occulter la variabilité des situations locales et produire des résultats insignifiants qui n'aident ni à comprendre le mécanisme observé, ni à prédire les tendances d'évolution du phénomène étudié (Lambin, 1994). En effet, le choix de l'échelle d'analyse influence le type d'explication donné aux processus et même la validité des observations. A titre d'exemple, la figure 4.1 montre l'évolution du revenu des populations dans un village. On constate que le revenu moyen augmente dans le temps. Avec les mêmes données au niveau des ménages, on constate que les riches deviennent de plus en plus riches alors que les pauvres deviennent de plus en plus pauvres. Les données sur le revenu moyen au niveau du village ne permettent pas donc de mettre en exergue ce phénomène de différenciation sociale qui existe dans ce village.

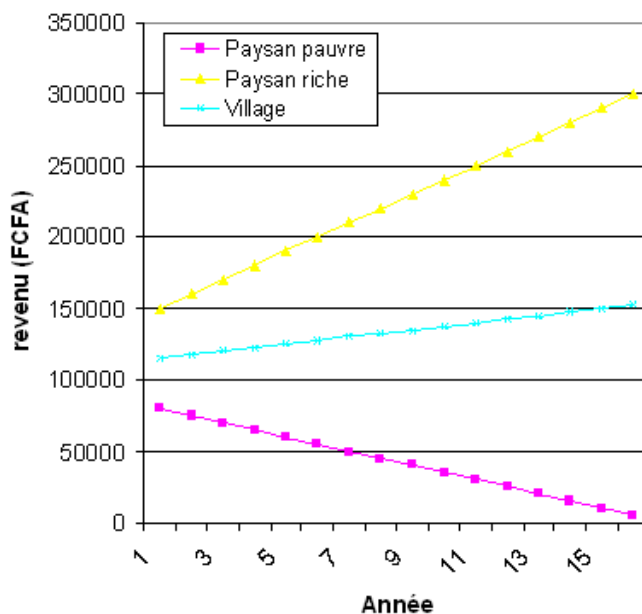


Figure 4.1 : Illustration de l'influence de l'échelle d'analyse sur l'explication d'un phénomène : cas de l'évolution du revenu des ménages dans un village.

Le concept d'échelle est très important et les questions relatives se posent dans presque toutes les applications environnementales. Un nombre important de publications a été dédié sur ce concept d'échelle (Gibson et al., 2000; Peterson, 2000; O'Neill, et al, 1986) mais, il est très rarement pris en compte explicitement pour analyser ou modéliser des problèmes concrets. En effet, la prise en compte de l'échelle est un problème complexe et l'approche la plus courante pour aborder la question d'échelle est de type inductif, c'est-à-dire basée sur une accumulation de données et d'expériences. Parmi les questions importantes que soulève le concept d'échelle auxquelles les recherches en géographie cherchent à répondre, on peut citer entre autre, les questions sur le choix des échelles d'observation et d'analyse appropriées, sur la capacité à changer d'échelle, sur la prise en compte de l'échelle dans les modèles de processus et les questions relatives à la mesure de l'impact des changements d'échelle (Meentemeyer, 1989). Une question de recherche importante dont la réponse reste assez ambiguë est celle de savoir quelle est l'échelle appropriée pour aborder l'analyse des dynamiques agraires. Les études locales à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation agricole ont un avantage certain en ce qui concerne la compréhension de la dynamique locale des systèmes agricoles ou pastoraux. C'est l'échelle la plus appropriée pour identifier les éléments structurants du système agricole, comprendre leur logique d'organisation et de gestion, évaluer les dysfonctionnements et préciser les critères d'optimisation. Toutefois, les approches d'analyse à l'échelle locale montrent également des limites du fait qu'elles relèvent pour la plupart des domaines techniques et présentent un caractère sectoriel. Ces approches locales seraient d'un moindre intérêt soit parce que les processus étudiés, opèrent sur des étendues plus vastes, soit parce qu'il n'existe pas de possibilité de généralisation des résultats à des échelles plus larges. A titre d'exemple, l'échelle du terroir ne semble pas être appropriée pour analyser les circuits de transhumance du bétail dans les zones rurales. De plus en plus, les expériences révèlent que ce n'est qu'à l'échelle de la petite région et mieux encore à l'échelle régionale, que certains processus clés et certains contrastes plus marqués se manifestent dans les systèmes de mise en valeur des espaces et leurs niveaux de productivité (Milleville et Serpantié, 1994).

En conclusion, il n'existe pas une échelle mais des plages d'échelles pertinentes pour l'analyse des dynamiques agraires. De plus, le choix de l'échelle de représentation de l'information est souvent hors du contrôle du scientifique, celle-ci est déterminée pendant les activités de collecte de données, souvent conçues pour des objectifs totalement différents ou très globaux. On est le plus souvent amené à changer de niveau d'analyse ou d'échelle de représentation de l'information pour des raisons assez diverses. L'identification des niveaux d'observation et d'analyse appropriés aux processus étudiés et le développement d'approches multi-échelles sont de plus en plus déterminants dans les études sur les écosystèmes naturels. Ce chapitre décrit le dispositif multi-échelle sur lequel repose l'analyse et la conception de SMALL Savannah, un SIE conçu pour caractériser les changements d'utilisation de l'espace en zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun et explorer les trajectoires d'évolution dans un avenir proche (Fotsing et al., 2003). Il montre également comment les problématiques d'échelle ont été prises en compte dans la mise en œuvre du système d'information développé. La section 2 justifie le besoin d'une approche multi-échelle pour la conception et la mise en œuvre de SMALL Savannah. La section 3 explique les principales motivations du changement d'échelle et les méthodes qui sont utilisées. La section 4 décrit les principaux niveaux d'analyse retenus, les échelles spatiales, les problématiques correspondantes et les données collectées pour la mise en œuvre de SMALL Savannah.

4.2. Besoins d'une approche multi-échelle pour SMALL Savannah

L'application dénommée SMALL Savannah, est un Système d'Information sur l'Environnement qui fournit des informations et connaissances sur la structure et la dynamique des systèmes agraires et aide à explorer les scénarios d'évolution des changements. Ce SIE est conçu pour être utilisé dans le cadre d'un observatoire des dynamiques agraires et du développement rural en zone des savanes d'Afrique centrale. Les principaux utilisateurs sont les scientifiques et les acteurs impliqués dans la planification et la gestion de l'espace. Toutefois, une utilisation peut être envisagée à l'échelle locale avec les acteurs pour susciter les discussions et préparer la concertation ou la négociation dans le cadre de démarches participatives d'aménagement et de gestion de l'espace. La démarche adoptée pour la conception de SMALL Savannah s'appuie sur le dispositif de recherche mis en place au niveau régional par le PRASAC (Pôle de Recherche Régional Appliquée au Développement des Savanes d'Afrique centrale), en vue d'étudier les grandes problématiques agricoles et pastorales en zone des savanes d'Afrique centrale. En effet, les concertations du comité scientifique, affinées par les comités recherche-développement ont permis de structurer les grandes problématiques de recherche en 6 principales composantes : Observatoire du développement, Gestion des terroirs et des espaces, Conseil de gestion aux exploitations, Système de culture et d'élevage, Transformation des produits agricoles, et Productivité et compétitivité de la filière coton. Ces composantes correspondent à 4 niveaux d'organisation de l'espace comme l'illustre la figure 4.2 : l'unité de transformation ou parcelle, l'exploitation agricole ou le ménage, le terroir et la région.

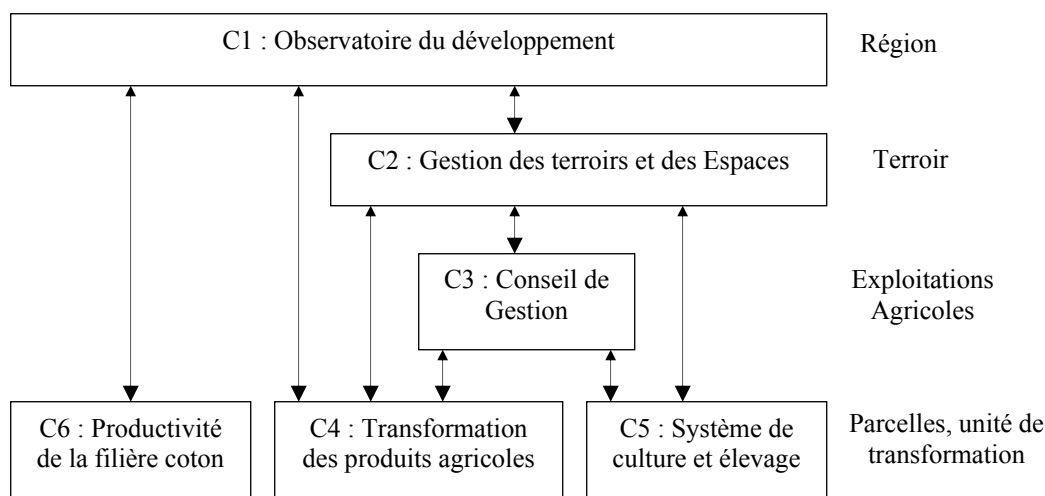


Figure 4.2 : Structure hiérarchique des composantes de recherche et des échelles d'analyse

Au cours de la mise en œuvre du projet, on a observé que le niveau d'analyse des processus est le plus souvent déterminé par la discipline ou la tradition du chercheur : les études techniques ont tendance à se confiner au niveau parcelle et terroir alors que les études socio-économiques s'effectuent au niveau régional. Les chercheurs en sciences sociales par exemple ont une longue tradition d'approche des micro-niveaux alors que les écologistes ou géographes ont une tradition de recherche au niveau « système », local ou régional (Veldkamp et al., 2001). Ces choix d'échelle d'analyse a priori peuvent être justifiés par le fait que, pour un processus donné à étudier, on peut identifier une échelle (étendue ou résolution) ou un niveau pertinent auquel il opère ou peut être observé.

Dans un système organisé, les sous-systèmes de niveau supérieur seront le plus souvent caractérisés par des processus qui opèrent sur une plus grande étendue en comparaison avec les sous-systèmes de niveau inférieur (Allen et Starr, 1982; O'Neill et al., 1986). Toutefois, il n'est pas toujours possible de représenter spatialement certains niveaux d'un sous-système de façon pertinente. De plus, on rencontre plusieurs exemples de processus qui opèrent sous forme d'une chaîne d'interaction (causalité) entre différents niveaux. A titre d'exemple, si on s'intéresse par exemple à l'influence de la politique cotonnière sur les changements d'utilisation de l'espace, on peut mettre en exergue la chaîne d'interaction suivante :

- Le prix du coton est déterminé par le marché mondial. Ce phénomène opère au niveau mondial mais sa représentation spatiale ne serait pas pertinente à ce niveau.
- Toutefois, la société camerounaise de coton (SODECOTON) définit un régime de prix pour les paysans de la région du Nord Cameroun. La SODECOTON est une grande entité mais correspond à un niveau d'acteur individuel. Le régime est identique pour tous les paysans et sa représentation spatiale ne fournirait aucune connaissance supplémentaire.
- A un niveau plus bas, les paysans décident du choix des spéculations à produire l'année suivante (coton, culture pluviale ou sorgho de contre saison) en fonction du régime des prix défini par la SODECOTON. On a évidemment un nombre important de producteurs de coton mais ce phénomène également s'opère au niveau individuel. Le changement de spéculation par le paysan s'opère au niveau de son exploitation. A ce niveau, la représentation spatiale du changement est très pertinente au niveau du terroir ou de la région car les effets de la décision du paysan sont visibles dans l'espace.
- La SODECOTON pourrait modifier le régime des prix en fonction des changements d'utilisation de l'espace observés à l'échelle de la région.

De façon plus générale, un autre exemple qui illustre l'intérêt d'une approche multi-échelle concerne la distribution des types d'utilisation de l'espace qui est directement influencée par les ménages qui font des choix en fonction des conditions naturelles des terres (Hoshino, 2000). Le comportement de ces ménages est influencé par des facteurs tels que les organisations locales, les coopératives agricoles, le marché local etc. Les ménages et ces institutions locales sont influencés par la politique nationale et les diverses règles liées à la gestion et l'utilisation de l'espace. Le système des facteurs qui déterminent la distribution de l'utilisation de l'espace dans une région donnée forme donc une structure hiérarchique qui devrait être explicitement prise en compte lorsqu'on souhaite avoir une compréhension plus complète de la structure et des processus qui opèrent. Dans le cadre du projet PRASAC, nous avons mené une opération de recherche sur le peuplement de l'espace et ses conséquences, s'insérant dans la composante «Gestion des terroirs et des espaces ». Il était question d'analyser la diversité des situations, les dynamiques agraires qui sont en cours et les stratégies des acteurs face aux mutations. Tout comme dans les deux exemples précédents, les processus étudiés notamment les dynamiques du peuplement, d'occupation du sol, les dynamiques foncières et les conséquences sur les stratégies des acteurs sont perçus comme des thématiques transversales aux différents niveaux et ne peuvent être étudiées uniquement au niveau du terroir villageois. La figure 4.2 illustre les interactions (causalité) entre les différents niveaux d'organisation caractérisant les processus étudiés. Ces interactions traduisent par la même occasion les articulations et échanges d'information qui étaient nécessaires entre ces différentes composantes de recherche.

4.3. Méthode d'identification et de changement d'échelle

4.3.1. Démarche d'identification de l'échelle d'analyse

L'identification ou le changement d'échelle dépend en général des processus étudiés, de la nature des données disponibles et surtout du motif de changement d'échelle. La problématique étudiée permet d'abord d'identifier et d'analyser les processus en jeux. La description complète d'un processus donné par son modèle de fonctionnement, est suffisante pour identifier les niveaux ou échelles pertinentes. Cette description permet également de déduire l'échelle de représentation des données nécessaires à son observation et son analyse (Schéma de la base de données). Une première motivation du changement d'échelle est le fait que le choix de l'échelle de représentation des données est souvent hors du contrôle du scientifique. Il est déterminé pendant des activités de collecte qui ont parfois été conçues pour des objectifs totalement différents ou très globaux (figure 4.3). On est donc amené à changer d'échelle de représentation pour la faire correspondre avec celle à laquelle le processus opère. L'indisponibilité de données, d'outils ou de méthodes d'analyse adaptés à la complexité des processus aux échelles où ils opèrent est également une motivation du changement d'échelle.

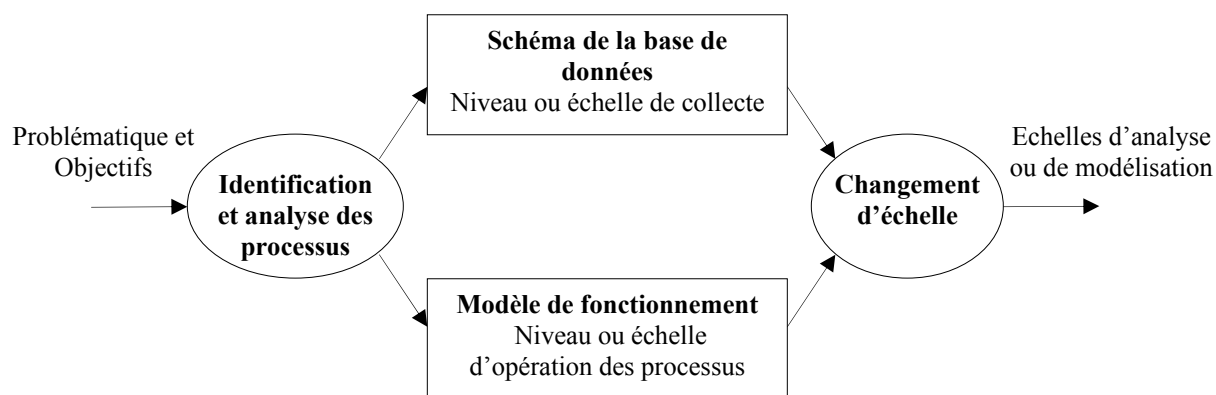


Figure 4.3: Procédure d'identification des niveaux ou échelles d'analyse des processus

On peut être amené à changer de niveau d'analyse ou d'échelle de représentation de l'information pour d'autres raisons assez diverses. On souhaite par exemple savoir si un processus observé à l'échelle du territoire villageois se traduit sur des espaces plus vastes. Il s'agit de déterminer si le processus étudié est essentiellement local ou s'il est d'une ampleur régionale. On peut également dans ce cas être intéressé à rechercher les causes d'un processus local à une échelle régionale. Réciproquement, on peut chercher des informations explicatives sur un processus global à l'échelle locale (Gibson et al, 2000 ; Hoshino, 2000). Le processus observé à l'échelle globale peut se traduire différemment à l'échelle locale. Certains facteurs déterminant la structure de l'utilisation de l'espace à l'échelle régionale n'apparaissent pas à l'échelle locale et réciproquement. Certains processus qui opèrent à une certaine distance du territoire villageois y influence la dynamique d'utilisation de l'espace. Le besoin de connaître la distance pertinente à prendre en compte dans l'analyse et la simulation (étendue et résolution) amène à changer d'échelle de représentation des données.

4.3.2. Méthodes de changement ou d'articulation d'échelles

Les besoins d'observation et d'analyse multi-échelle cités ci-dessus font de plus en plus appel à l'exploitation de méthodes et des outils spécifiques. Dans le cadre du développement du SIE SMALL Savannah, les méthodes de changement et d'articulation d'échelles suivantes ont été mise en œuvre : l'utilisation des outils de SIG, les approches de zonage et la généralisation, l'analyse spatiale ou statistique et la modélisation.

Changement d'échelle de représentation des données sous SIG

Presque tous les travaux traitant du sujet de changement d'échelle s'accordent sur les sollicitations multiples et l'intérêt de la télédétection et des SIG (Franklin et Woodcock, 1997). Les SIG donnent la possibilité de représentation multi-échelle, celle de mettre en place des bases de données contenant les versions numériques du contenu de plusieurs cartes à différentes échelles (chapitre 6). Les techniques statistiques et de traitement de données prenant en compte explicitement la notion d'échelle, sont disponibles sous forme de fonctions implémentées sous le SIG (Quattrochi et al. 1997). Le processus de généralisation cartographique ou des données spatiales dans un SIG est la transformation d'un ensemble de données déterminé par un schéma de données et une certaine résolution, en un nouvel ensemble de données correspondant à un nouveau couple (schéma de données et résolution). Baeijs et al., 1996 ont proposé une approche et un modèle de généralisation semi-automatique utilisant les systèmes multi-agents. Le problème de changement d'échelle de représentation des données posé dans cette thèse concerne principalement les données spatiales représentées sous forme raster. Certaines données de type vecteur sont converties en raster afin d'être analysées quantitativement. Les échelles de représentation initiales sont diverses et ne sont pas nécessairement les plus appropriées pour analyser les processus étudiés. L'importance et les structures des différentes formes d'utilisation de l'espace à l'échelle de la région vont par exemple changer avec le changement de l'échelle de représentation de la carte d'utilisation de l'espace (chapitre 9).

Approches de type zonage et généralisation ou spécialisation des phénomènes observés

A petite échelle (écorégion ou région), lorsqu'on souhaite analyser les dynamiques agraires régionales, la diversité des situations régionales ou locales constitue une contrainte spécifique. Le zonage consiste à procéder à un découpage géographique du paysage agricole en zones minimisant la variabilité interne des paramètres qui déterminent une action. Les méthodes de zonage se présentent alors comme des outils appropriés pour mieux appréhender cette diversité en identifiant des zones homogènes en fonction des problématiques. Ces zones définissent un autre niveau d'analyse moins complexe (plus petite étendue et homogénéité relative supérieure). L'analyse peut donc être effectuée à cette nouvelle échelle de façon exhaustive ou sélective en fonction des possibilités. Les observations peuvent ensuite être plus ou moins précisément restituées à petite échelle par comparaison ou par juxtaposition (chapitre 8). Lorsqu'on passe par exemple de la zone agroécologique au terroir, une question méthodologique que soulève le choix des terroirs de référence concerne leur représentativité. En d'autres termes, peut-on à partir des éléments de caractérisation et de compréhension des processus observés à cette échelle (terroirs) tirer des conclusions sur les espaces plus vastes dont ils sont sensés être représentatifs (généralisation) ? La réponse à cette question dépend du critère de choix des espaces représentatifs. En effet, le zonage ayant permis de définir

des unités homogènes du point de vue d'un ensemble de critères, un espace ne pourra être jugé représentatif d'une unité que sur la base de cet ensemble de critères ou de critères fortement corrélés statistiquement. On pourrait par exemple chercher à savoir si les logiques de construction et d'évolution des terroirs sont identiques. Comment des espaces différents ont-ils pu évoluer suivant les mêmes logiques ? De telles questions suggèrent d'envisager une modélisation de ces territoires dans la perspective d'appréhender les dynamiques agraires à une échelle plus petite comme la zone de référence (Loireau, 1998). Ce besoin de généralisation nécessite de toute évidence un effort de discrimination plus fine des espaces étudiés, de différenciation de leurs dynamiques agraires et territoriales. Afin de comprendre plus finement le fonctionnement des systèmes agraires, on sera amené à analyser au niveau des territoires spécifiques les causes, les facteurs déterminants et les conséquences des processus (chapitre 7).

Le changement d'échelle dans les modèles de projection ou de simulation

Les changements d'occupation du sol ou d'utilisation de l'espace sont le résultat de processus qui opèrent sur une large plage d'échelle spatiale et temporelle. Certains auteurs (Hall, 1994) ont même montré que la combinaison de facteurs déterminant n'était pas la même à grande échelle et à petite échelle. Le cadre de modélisation CLUE proposé par Veldkamp et al. (1996) permet de prendre en compte cette propriété et l'organisation hiérarchique des systèmes d'utilisation de l'espace pour simuler les changements d'utilisation de l'espace dans un futur proche. Comme nous l'avons montré au chapitre 3, le modèle d'allocation des changements distingue d'abord deux niveaux d'analyse : le niveau national où s'effectue la demande pour les différentes utilisations de l'espace et le niveau local où s'effectue l'allocation explicite de l'espace à une utilisation spécifique. Au niveau local (grille artificielle), la procédure d'allocation distingue une grande résolution d'allocation où se calculent les tendances générales de changement et pour identifier l'influence des facteurs qui interagissent sur de longues distances - et une résolution fine d'allocation à laquelle se calculent les proportions d'utilisation de l'espace en prenant en compte les contraintes locales (Verburg et al., 1999).

4.4. Hiérarchie des échelles d'observation et d'analyse

La prise en compte de plusieurs niveaux d'une échelle permet de fournir aux acteurs et décideurs des informations et connaissances correspondant à la diversité des perceptions du système d'utilisation de l'espace. Une approche multi-échelle présente l'avantage de fournir aussi bien les grandes tendances régionales que les spécificités locales (Imbernon, 1998). Les besoins identifiés à la section 4.2 ont mis en exergue trois principaux niveaux sur lesquels repose l'architecture du système SMALL Savannah : le terroir, la région autour de Maroua et la région de l'Extrême Nord du Cameroun. Le système utilise également les informations du niveau ménage ou exploitation agricole. Lors de l'analyse des dynamiques agraires, des niveaux d'analyse intermédiaires ont été identifiées en fonction des processus étudiés et de la nature des données disponibles. Il s'agit de la zone de référence, territoire villageois, zone agroécologique. Les niveaux d'observation et d'analyse sont retenus en fonction des problématiques et des données disponibles. Chaque niveau d'analyse apporte une vision différente de l'espace agraire et des processus, des questions et données spécifiques, des outils et des approches d'analyse appropriés. Lorsqu'on s'intéresse à l'étude d'un processus donné, il est donc nécessaire de pouvoir identifier les échelles appropriées et mettre en œuvre des procédures de changement ou de transfert d'échelle.

La figure 4.4 illustre l'ensemble des niveaux d'analyse qui sont pris en compte dans le cadre de cette étude. Ces niveaux définissent trois principales échelles à savoir le local, le supra-local et le régional. On peut également distinguer deux systèmes hiérarchiques d'organisation de l'espace. Le premier correspond à l'organisation politique et administrative du territoire (branche gauche). Les différents niveaux correspondent dans ce cas aux niveaux du découpage administratif. Les interactions entre ces niveaux sont définies à travers les compétences accordées à chaque niveau et les mécanismes de prise de décision en ce qui concerne l'utilisation et la gestion de l'espace et des ressources naturelles.

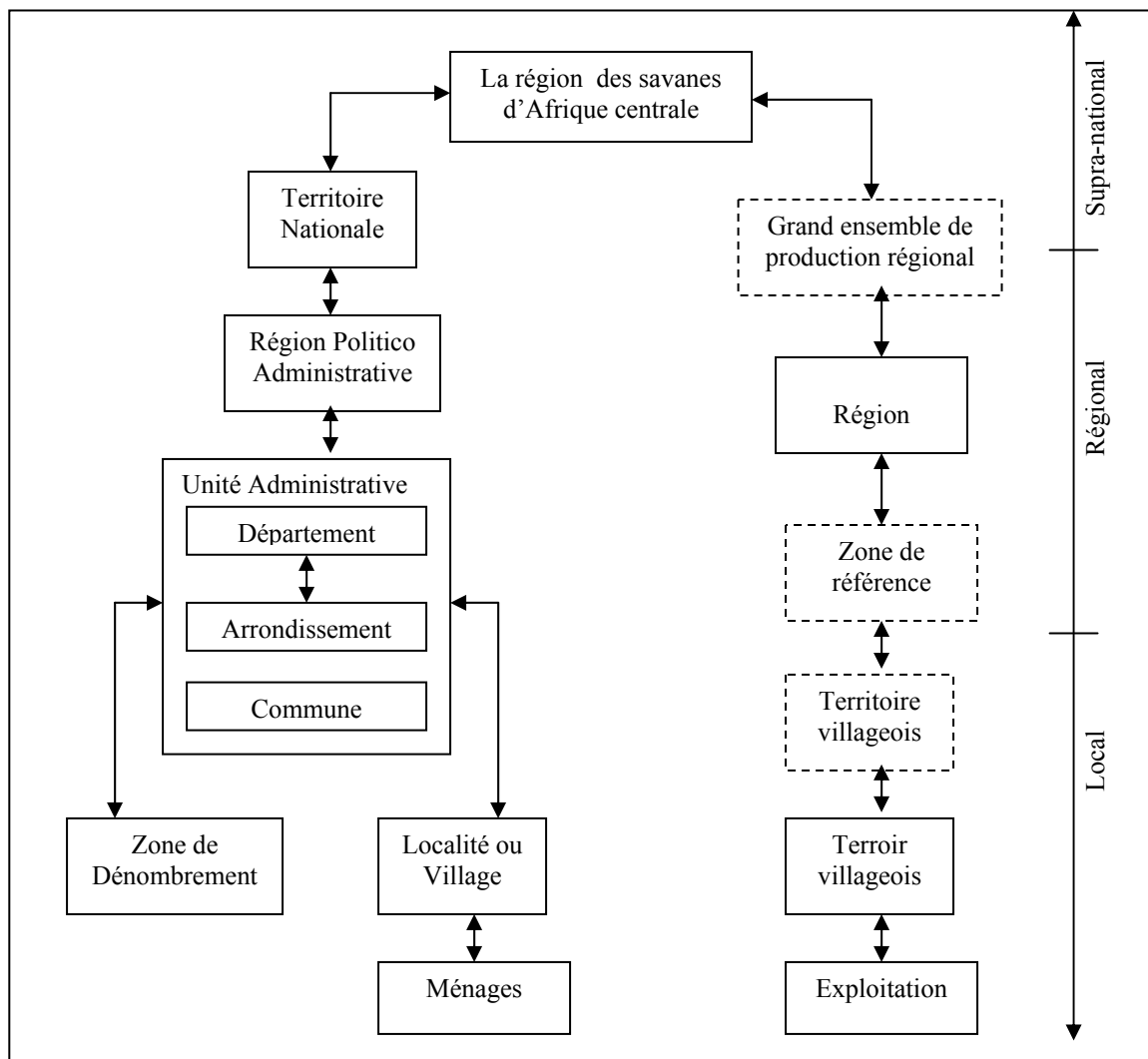


Figure 4.4 : Hiérarchie des niveaux d'organisation de l'espace de la région des savanes d'Afrique centrale. Les cases en pointillé représentent les niveaux d'analyse intermédiaires identifiés.

Le deuxième système hiérarchique correspond à la structure du paysage, de l'utilisation de l'espace et son appropriation par les communautés. Dans ce cas, les principaux niveaux correspondent aux niveaux d'organisation de l'espace agroécologique et du territoire communément admis en géographie et en agronomie : exploitation, terroir, petite région et région. Les trois principales plages d'échelle qui caractérisent les niveaux d'organisation identifiés sont : le local, le régional et le supra-national. Les

paragraphe suivants, présentent pour chaque échelle, les caractéristiques des niveaux d'analyse identifiés, les processus étudiés, les données collectées et les traitements appropriés.

Le concept de territoire villageois est une extension du concept de terroir. Les zones agroécologiques ne sont pas des niveaux mais tout simplement des espaces uniformes d'un point de vue.

4.4.1. L'échelle supra-nationale

L'échelle supra-nationale comprend le niveau national, les grands ensembles de production régionaux et la zone écologique des savanes d'Afrique centrale qui couvre environ 700 000 km² au sein des trois pays concernés par l'aire du PRASAC. La base de données associée au niveau de l'éco-région comporte des données générales sur le milieu physique et humain (Jamin et Gautier, 2003). Le niveau national est bien adapté à la prise en compte des processus de planification et de développement régional. C'est à cette échelle que sont formulées les politiques, lois et règles administratives liées à la gestion de l'espace et des ressources naturelles. La base de données géographique associée à ce niveau inclut les données de statistiques agricoles, de recensement de la population, les données sur les différents facteurs du milieu physique (sol, hydrographie, pluviométrie, relief) et sur l'infrastructure routière.

Les pays de savanes d'Afrique centrale sont confrontés au défi commun de l'Afrique tropicale, l'explosion démographique qui rend les changements inéluctables : développement d'une agriculture périurbaine, création de marchés potentiels pour les produits agricoles, et besoins de systèmes de production plus intensifs ou accédant à de meilleures plus-values. La révolution urbaine est une expression de cette mutation sociale. Le doublement de la population en une génération soulève l'épineux problème de disponibilité et de gestion durable des ressources naturelles (Pourtier, 2003). Dans les zones à forte densité de population, les paysans ne disposent plus, à système de mise en valeur constant, de réserve de terre. Ce qui limite les possibilités de défrichements et la pratique de la jachère avec certains corollaires tels que la baisse de la fertilité des sols et les flux migratoires. Dans ce contexte, la question concernant la capacité de ces milieux à supporter les nouveaux besoins d'une population croissante prend de l'importance. La tendance à l'échelle régionale et les modes d'utilisation de l'espace montrent qu'on passe progressivement et inéluctablement d'un espace ouvert à un espace limité. Pieri (1989) traduit bien cette conception de la trajectoire des formes d'utilisation de l'espace en affirmant que « tous les terroirs, quel que soit leur degré de peuplement initial enregistrent une montée de la pression démographique et une reproduction homothétique des systèmes de production qui les amènent tôt ou tard à une saturation de l'espace ». Dans les zones encore très peu peuplées, les réserves en terre sont considérables mais ne sont pas toujours accessibles du fait des conflits liés à leur exploitation par plusieurs communautés d'utilisateurs dont les pratiques et les intérêts peuvent être divergents. Les populations sédentaires doivent s'adapter avec l'arrivée des populations migrantes alors que les éleveurs doivent s'adapter à l'extension des surfaces cultivées qui sont des corollaires de l'accroissement de la population rurale. L'un des multiples enjeux de développement des savanes d'Afrique centrale dans ce contexte est l'appui à la planification et à la gestion des espaces et des ressources naturelles aux échelles appropriées (région, zone de référence ou territoire villageois) en s'appuyant sur les connaissances acquises par la recherche ou par des cellules de suivi-évaluation des projets de développement (Bisson et Dugué, 1999). Cette orientation est d'autant plus pertinente lorsqu'on sait que les services en charge de cette planification dans ces régions, ne disposent pas

des informations nécessaires comme des cartes d'occupation du sol actualisées ou les statistiques agricoles et les recensements fiables de la population ou du bétail.

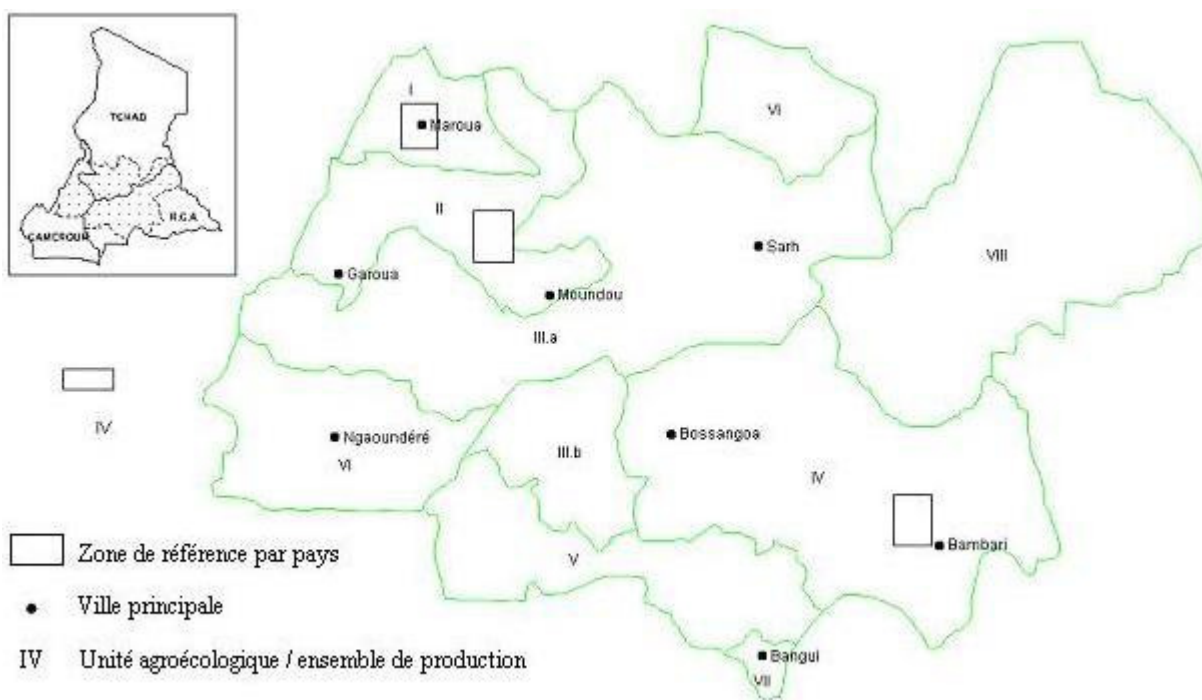
Un zonage agroécologique au niveau des savanes d'Afrique centrale a permis d'identifier les grands ensembles de production et de dégager des zones à problématiques homogènes afin d'y adapter les opérations de recherche (Beclier, 1997). Ce zonage a été réalisé sur la base des facteurs discriminants suivants : la dynamique de la population, la place de la culture du coton dans le système de production, l'importance des activités agricoles et pastorales. Chacun de ces critères a été spatialisé et la couche de carte obtenue a subi une première agrégation en un nombre de classes qui facilite l'analyse spatiale (3 à 4). Les paramètres représentés par les différents plans d'information sont : la densité de population, le pourcentage des surfaces cultivées en coton, le pourcentage des terres cultivées par unité administrative, la densité du cheptel bovin. Un découpage manuel a été effectué sur la base de la superposition des différentes couches de données et des connaissances de la zone d'étude. Il en ressort un zonage de l'espace des savanes d'Afrique centrale en 8 grands ensembles de production qui correspondent à des problématiques différentes du développement agricole et pastoral.

Au niveau de chaque pays, des travaux visant à une meilleure compréhension des problèmes de gestion de l'espace et des ressources naturelles ont ainsi été initiés pour trois zones représentatives de l'aire PRASAC (voir carte de la figure 4.5). La zone 3, caractérisée par des densités de faible à moyenne (entre 5 et 25 hab./km²), est une zone traditionnellement cotonnière avec les cultures vivrières associées à un élevage dense. Réounoudji (2003), s'est intéressé dans cette zone du sud ouest du Tchad aux dynamiques d'occupation de l'espace et à la gestion locale des ressources naturelles. La zone 4, est caractérisée par une densité de population assez faible (entre 1 et 15 hab./km²), en zone cotonnière et vivrière, les activités extra-agricoles comme la chasse, la pêche et la cueillette s'accompagnent d'une importante disponibilité en terre et donc d'une stratégie de production extensive. En République Centrafricaine, Ankogui-Mpoko (2002) s'est intéressé dans cette zone aux conflits entre agriculteurs liés à la gestion de l'espace et des ressources naturelles. La zone 1, caractérisée par des fortes densités de population (entre 50 et 80 hab./km²), est une zone marginale pour la culture cotonnière présentant par contre une importante production vivrière et une forte intégration de l'agriculture et de l'élevage qui est utilisé comme source d'investissement. Il ressort dans cette zone étudiée de façon spécifique dans ce travail, une problématique liée au rendement des productions, à la saturation des terres, à la dégradation des sols. Il faut cependant souligner qu'à la différence des zones cotonnières où de vastes espaces sont exploités de façon extensive pour dégager des revenus monétaires, cette zone assure la survie d'une population bien plus dense. Dans le cadre de ce travail, il s'agit dans cette zone d'analyser la dynamique des systèmes agraires au cours des deux dernières décennies et d'explicitier les facteurs déterminants les changements d'utilisation de l'espace.

4.4.2. L'échelle régionale

La géographie contemporaine considère une région comme une entité spatiale de taille moyenne située entre localité et territoire national. La région est donc un niveau d'organisation de l'espace national correspondant à l'échelle supra-local (Levy et Lussault., 2003). La région est plus précisément considérée comme un espace repéré, support d'interactions de nature physiques, culturelles ou économiques, et donc supposé présenter une certaine homogénéité dont on connaît très rarement les limites, la taille ou les

contours exacts. La délimitation d'une région comme le Nord du Cameroun ou la zone des savanes d'Afrique centrale va donc dépendre des critères d'homogénéisation considérés (naturelle, physique, urbaine, polarisée). On parlera de région naturelle pour signifier l'unicité du paysage ou de l'architecture physique d'un espace (climat, relief, bassin hydrographie). D'autres acceptations du terme région qui sont des cas particuliers de la région support d'interaction existent : la région polarisée, la région politico-administrative. La région polarisée se définit par rapport aux relations fonctionnelles entre un lieu donné et les autres lieux qui la composent. L'exemple le plus classique est celui de la région qui repose sur une armature hiérarchique de villes allant de la métropole aux petites villes qui débouchent sur le périurbain et sur le monde rural. La région politico-administrative représente une échelle à laquelle s'exerce le pouvoir administratif ou politique. C'est cette vision de la région qui reste la plus rigide en ce qui concerne la délimitation et se rapproche de la notion de territoire.



I. Forte densité humaine, coton marginal, production vivrière importante associée à l'élevage	V. Très faible densité humaine, zone non cotonnière à tendance vivrière
II. Densité humaine moyenne, zone cotonnière et forte production vivrière associée à l'élevage	VI. Faible densité humaine, zone non cotonnière, élevage extensif dominant
IIIa. Densité humaine moyenne, zone cotonnière, production vivrière associée à l'élevage	VII. Moyenne à forte densité humaine, zone péri-urbaine à tendance vivrière, maraîchage
IIIb. Faible à moyenne densité humaine, zone cotonnière, vivriers associés à un élevage dense	VIII. Très faible densité humaine, forte présence d'aires protégées, lieu de transhumance
IV. Faible densité humaine, zone cotonnière et de vivriers associés à un élevage	

Figure 4.5 : Zonage de la diversité agroécologique des savanes d'Afrique centrale.

L'échelle régionale recouvre différents niveaux d'analyse ou d'observation (petite région ou zone de référence, zones agroécologiques et unités administratives) qui se justifient par le fait que certaines

questions concernant la gestion des ressources naturelles, l'utilisation de l'espace et la gestion des systèmes d'approvisionnement doivent être abordés à des niveaux plus élevés que le terroir villageois (la petite région ou la grappe de village). La grappe de village en particulier est considérée comme un ensemble de terroirs villageois ayant des intérêts en commun et exploitant des espaces communs ou en forte interaction (Bisson et Dugué, 1999). Par exemple, des phénomènes naturels (érosion hydrique, feux de brousse) ou les pratiques des éleveurs (transhumance) ne tiennent pas en compte les limites strictes du terroir et doivent être étudiées en relation avec les territoires voisins et donc sur des espaces plus vastes et plus représentatifs des processus étudiés (bassin versant, bassin d'approvisionnement, petite région ou zone de référence). Les zones de références couvrent au moins la superficie d'une image SPOT ou d'une image Landsat. Au chapitre 5, une analyse systémique a été menée pour caractériser le système de mise en valeur de l'espace, identifier les changements survenus au cours des dernières décennies afin d'explorer les facteurs potentiels déterminants à l'échelle de la région des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. La spécification des problématiques des dynamiques agraires a conduit à identifier les processus et les phénomènes clés et pouvant faire l'objet d'une analyse détaillée. Il s'agit des dynamiques du peuplement humain, les dynamiques d'occupation du sol, les dynamiques foncières notamment les processus d'appropriation et de saturation de l'espace, les conflits entre agriculteurs et éleveurs, les stratégies des acteurs ruraux et les relations ville-campagne. Chacun de ces processus opère prioritairement à des niveaux d'échelle spécifiques.

Niveau d'analyse	Terroir	Zone référence	Région
Processus			
Dynamique du peuplement	+	++	+++
Dynamiques d'occupation du sol	+	+++	++
Dynamiques foncières	+++	++	+
Conflits agriculteurs-éleveurs	+	+++	++
Stratégies des acteurs	++	+++	+
Relations ville-campagne	+	++	+++

Tableau 4.1 : Processus et niveaux d'analyse géographique. Le nombre de signes + traduit l'importance du processus au niveau considéré.

Le tableau 4.1 donne une synthèse des relations entre les processus et les niveaux d'analyse considérés dans cette étude. En réalité, la plupart des processus étudiés opèrent sur presque toute la plage d'échelle allant du terroir à la région, toutefois il est possible pour chaque processus d'identifier un niveau privilégié. Deux raisons principales ont motivé le besoin de passer à des échelles d'analyse plus fines (zones agroécologiques et zone de référence) : le besoin d'appréhender la diversité des situations locales et la contrainte posée par l'indisponibilité de données détaillées sur l'ensemble de la région. L'étude des processus devrait donc se faire aux échelles où ceux-ci opèrent prioritairement. Ceci ne peut se faire qu'en exploitant des données spatiales couvrant des étendues et des résolutions spatiales appropriées. De nombreuses données spatiales dans le contexte spécifique des savanes d'Afrique centrale ne sont pas disponibles aux échelles ou avec la précision souhaitée. Les méthodes de changement d'échelle de représentation des données jouent un rôle déterminant dans ce type de situations. Le tableau 4.2 donne une synthèse des données disponibles à chaque niveau en précisant les méthodes d'acquisition.

Niveau d'analyse	Terroir	Zone référence	Région	Méthode d'acquisition
Données spatiales				
Carte d'utilisation actuelle de l'espace	+		+	Cartographie au GPS et photo-interprétation
Cartes d'occupation du sol multi-dates		+		Traitement d'image et photo-interprétation
Cartes topographiques		+		Numérisation et intégration SIG
Statistiques démographiques			+	Structuration et requête SGBD
Statistiques agricoles et pastorales			+	Structuration et requête SGBD
Carte des sols, du relief, et d'accessibilité		+	+	Numérisation, Importation et traitement sous SIG

Tableau 4.2 : Niveaux d'analyse géographique, données spatiales et méthode d'acquisition. Le signe + indique le niveau où les données spatiales sont disponibles. (SIG = Système d'Information Géographique ; GPS = Global Positioning System et SGBD = Système de Gestion de Base de Données).

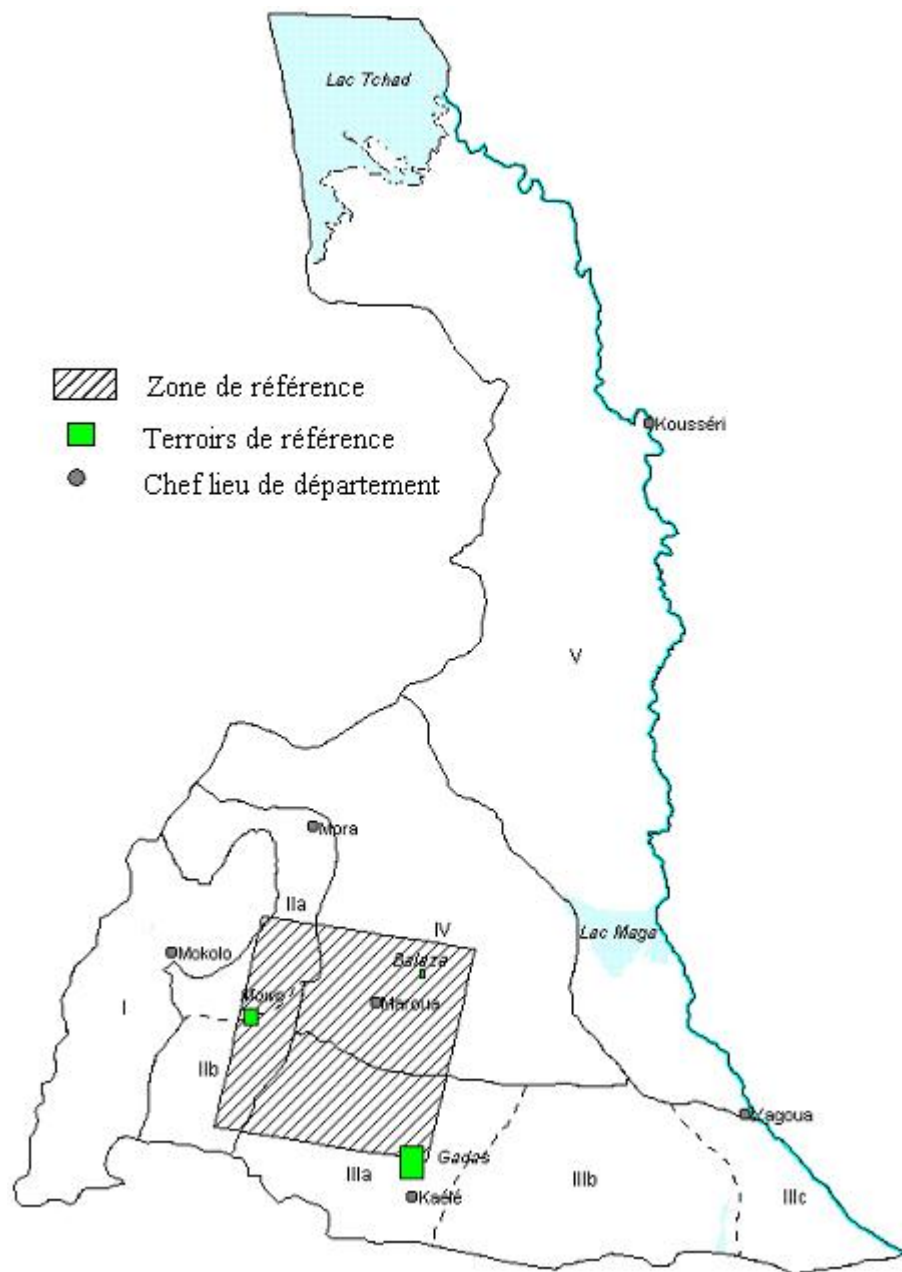
La zone de référence choisie est une région représentative de la diversité agro écologique et principaux processus ou problématiques liés à l'utilisation de l'espace des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. C'est une zone centrée autour de la ville de Maroua qui s'affirme dans cette région comme un centre de polarisation de l'espace et assure un rôle moteur dans le développement de la plupart des filières régionales (bovine, bois énergie, maraîchage, fruits ou céréales). D'une superficie de 3600 km², cette zone s'étend sur un rayon d'environ 40 km au sud et 20 km au Nord de la ville de Maroua. Elle est traversée dans sa partie centrale par la route nationale bitumée qui relie le Cameroun au Tchad en reliant les villes de Garoua, Maroua et Kousséri. Sur le plan administratif elle se trouve à cheval entre les départements du Diamaré, du Mayo Kani et du Mayo Tsanaga. Dans cette zone, le système de culture comprend le coton, les cultures pluviales et la culture du sorgho de contre saison (Muskuwaari) qui s'y est fortement étendue. La pression foncière est assez forte et on observe une importante compétition entre activités agricoles et activités d'élevage. Les applications du SIE SMALL Savannah présentées aux chapitres 8, 9 et 10 portent sur cette zone.

Il existe deux contributions principales au zonage de la grande région du Nord Cameroun. Kamuanga (1997) a réalisé un zonage de la province de l'Extrême Nord devant servir de cadre de référence à une meilleure définition des thèmes de recherche en milieu paysan. Ce zonage prend en compte les contraintes locales et les besoins des producteurs. Les critères principaux retenus (système de culture, type de sol, degré d'implantation de la traction bovine) lui ont permis de découper la province en 8 situations agricoles. Dugué et al. (1994) ont proposé le zonage agro-écologique de la zone cotonnière du Nord Cameroun qui est utilisé dans cette thèse. Ce zonage prend en compte la diversité des situations agricoles et pastorales du Nord Cameroun en intégrant les critères suivants : la densité de population, la disponibilité en terres cultivables (saturation foncière), la place de l'élevage à l'échelle de l'unité de production et des petites régions, la nature des systèmes de culture (culture dominante, niveau d'intensification et possibilités de diversification), l'environnement socio-économique (accès au marché, enclavement, organisation sociale). La zone de référence recouvre assez bien les trois principales unités agroécologiques identifiées (figure

4.6). La zone de la plaine du Diamaré et de Mora a un paysage composé de plaines dont les sols sont vertiques et sablo-argileux. La pluviométrie entre 600 et 700 est limitante pour toutes les cultures. La densité de population est moyenne et parfois très élevée pour ces ressources, entre 30 et 180 hab./km². La zone est saturée foncièrement et la disponibilité en terres à défricher est faible. Le système de culture est à base de céréales d'arachide et de coton, avec un développement local d'oignon (Mora, Maroua). L'élevage est très présent, avec une densité de bétail estimée à 30 UBT/km² et un important cheptel de petits ruminants du fait de la présence de populations musulmanes. Les éleveurs dans la plaine du Diamaré sont essentiellement des Foulbés dont 80% pratiquent la transhumance en période de culture pluviale, en raison de l'exiguïté des parcours. La mise en marché des produits est facilitée par la présence d'un réseau de voies de communication assez dense. Aux chapitres 7 et 8, l'analyse des dynamiques d'utilisation de l'espace s'appuie sur ce zonage de l'espace.

Critères	Zones	Piémonts des Monts Mandara	Plaine de Kaélé et de Kalfou	Plaine du Diamaré et de Mora
Densité de population		50-180 hab./km ²	30-180 hab./km ²	30-180 hab./km ²
Disponibilité en terre		moyennement à fortement saturée, du sud vers le nord	Grande à saturée	Saturée foncière, faible disponibilité en terre à défricher.
Type de Sol		Planosols argileux et lithosols	Vertisols, ferrugineux, dunaire et sablo-argileux	Vertisols, ferrugineux, dunaire et sablo-argileux
Pluviométrie (mm/an)		Non limitante (1000),	Limitante (700-800)	Limitante (600-700)
Système d'élevage		Sédentaire limité au nord, 24 UBT/km ²	Semi-sédentaire, transhumant intégré, 14 UBT/km ²	Semi-sédentaire, transhumant, 30 UBT/km ²
Système de culture		Sorgho, arachide, coton et muskuwaari	Sorgho, coton, niébé, Muskuwaari	Sorgho, coton, arachide Muskuwaari
Accès au marché		Facile	Facile mais faible	Facile

Tableau 4.3 : Caractéristiques des zones agroécologiques de la région d'étude.



I. Zone des Monts Mandara, hors de la zone cotonnière	IIIb. Forte saturation foncière, intégration agriculture élevage
II. Zone des piémonts	IIIc. Zone à vocation agricole et piscicole, élevage limité
IIa. Forte saturation foncière, élevage sédentaire limité	IV. Plaine du Diamaré et de Mora : Saturation foncière moyenne à forte, zone d'élevage traditionnel
IIb. Saturation foncière moyenne et présence d'élevage bovin	V. Plaine d'inondation du Logone, hors de la zone cotonnière
III. Pénéplaine de Kaélé et du bec de canard	
IIIa. Faible saturation foncière, élevage semi-sédentaire	

Figure 4.6 : Zonage des situations agroécologiques de la zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun.

4.5.3. L'échelle locale

L'échelle locale fait référence aux niveaux d'analyse les plus fins. En fonction des thématiques et des processus étudiés, ils peuvent correspondre au territoire villageois, au terroir villageois ou à l'exploitation agricole.

Le niveau du terroir villageois, pris au sens géographique du terme, correspond à l'espace exploité par une communauté rurale en vue d'obtenir des produits agricoles, d'élevage et de cueillette (Bisson et Dugué, 1999). Il correspond à un niveau d'organisation de la communauté dans l'espace. Ainsi, dans le cas des communautés sédentaires elle correspondra le plus souvent à une petite étendue qui inclut le finage et toutes les terres appartenant au village ou placées sous l'autorité de son chef. Le terroir est considéré comme le niveau le plus fin lorsqu'on s'intéresse aux dynamiques de gestion et d'utilisation de l'espace. Dans le cas des communautés d'éleveurs nomades, elle correspondra à tous les espaces parcourus et exploités pour l'alimentation du bétail. Elle peut dans certains cas correspondre à de très vastes étendues ou à un « archipel ». Le territoire est une entité géographique, un espace d'appartenance, reconnu, délimité, investi, finalisé et institutionnalisé qui joue le rôle de support d'une identité. Raffestin (1982) a bien illustré la différence entre ce concept et celui d'espace en affirmant que : l'espace est un enjeu du pouvoir, tandis que le territoire est un produit du pouvoir. Selon Brunet (1990), le territoire est une œuvre humaine, un espace approprié. La notion d'appropriation se réfère à une appartenance et un usage (habiter, travailler ou se récréer). Le territoire national par exemple en tant qu'espace institutionnalisé sera cet espace qui est placé sous le contrôle de l'état. Dans le cas d'une institution de gestion de l'eau, le territoire sera l'ensemble des eaux, digues, ou zones inondées qui sont assignées à sa gestion. Dans le cas d'une communauté rurale, le territoire villageois sera également l'ensemble des terres et d'autres ressources naturelles qui appartiennent ou qui sont sous le contrôle de la dite communauté. Le niveau du territoire villageois est défini par les terres et les ressources exploitées par la communauté et inclut les zones interstitielles entre terroirs villageois, zones potentielles de croissance au sein desquelles la compétition pour l'exploitation des ressources naturelles et les dynamiques d'utilisation de l'espace sont importantes. Aux niveaux du terroir ou du territoire villageois, la cartographie au GPS est privilégiée pour la production des cartes d'utilisation de l'espace. Une base de données s'appuyant sur le recensement des exploitations agricoles du terroir permet de mieux caractériser les types d'exploitations et les systèmes d'utilisation de l'espace à l'échelle du terroir (Havard et Abakar, 2002).

Le choix des terroirs villageois de référence s'est effectué en collaboration avec les structures et projets de développement ou de vulgarisation intervenant dans la zone (SODECOTON, DPGT, PNVRA). Un terroir villageois a été choisi dans chaque zone pour réaliser un diagnostic global et mener des études détaillées (Havard et Abakar, 2002). La figure 4.6 donne une localisation de ces terroirs dans la zone de référence. Le terroir de Balaza est un village situé en pleine zone de peuplement Fulbé dans la zone de la plaine du Diamaré. Il est localisé à 25 km à l'est de la ville de Maroua. C'est un petit village qui compte un peu plus de 200 habitants pour un territoire qui couvre une superficie d'environ 1 km². Le terroir de Mowo est un village situé en zone de peuplement Mofou dans la zone de piémont. Il est localisé à 35 km à l'ouest de la ville de Maroua, le long de la route bitumée reliant Maroua à Mokolo. La population est estimée à environ 1 400 habitants et le territoire du village couvre une superficie d'environ 9 km². Le Terroir de Gadas est un

village de la zone de pédiplaine de kaélé et dominé par les populations de l'ethnie Moudang. Il est situé à 55 km au sud de la ville de Maroua, en retrait de la route Maroua-Mindif-Kaélé. Sa population est estimée à un peu plus de 1 600 habitants qui exploitent un territoire d'environ 20 km² incluant de vastes espaces utilisés pour la culture du sorgho de contre saison et d'importantes zones de brousses. Le choix de ces terroirs suppose qu'ils sont représentatifs de chacune des zones agroécologiques du point de vue des problématiques retenues pour chaque zone. Le problème de représentativité que peut poser le choix des terroirs de référence suggère une analyse à des niveaux intermédiaires entre le terroir et la zone agroécologique comme la grappe de village ou la petite région autour du terroir de référence. La combinaison de ces différents niveaux d'analyse permettrait d'aborder des questions spécifiques et détaillées sur les dynamiques d'utilisation de l'espace, tout en fournissant les informations représentatives des situations agroécologiques identifiées à l'échelle de la région.

4.5. Conclusion

L'échelle est une caractéristique importante des systèmes environnementaux et une attention particulière devrait y être accordée lors des phases d'analyse et de conception des SIE. Dans ce chapitre, les concepts d'échelle introduits au chapitre 2 sont appliqués à l'analyse des dynamiques agraires en zone des savanes d'Afrique centrale. En particulier, l'observatoire régional du développement du PRASAC porte sur des problématiques dont la compréhension nécessite des analyses d'un même processus à différents niveaux d'organisation : parcelle, exploitation agricole, territoire villageois, et région. Cette application met en évidence l'intérêt de prendre en compte explicitement les différentes échelles auxquelles opèrent les processus de changement d'utilisation de l'espace. Les différents niveaux identifiés correspondent très bien aux échelles d'analyse et de gestion que les chercheurs et les gestionnaires de l'espace utilisent traditionnellement. Toutefois le choix des échelles d'observation est le plus souvent déterminé par différentes contraintes comme la discipline ou les outils d'observation. Dans ce cas, les interactions entre échelles ne sont pas prises en compte et ceci peut conduire à une explication incomplète des processus. Le Système d'Information à développer dans le cadre de cet observatoire doit fournir des méthodes et procédures pour prendre en compte la multiplicité des échelles et les interactions pertinentes pour la compréhension des processus. Dans ce chapitre nous avons décrit le dispositif multi-échelle sur lequel repose l'analyse et la conception du SIE SMALL Savannah. L'échelle de représentation des données est une information (méta-donnée) qui est explicitement spécifiée dans le schéma de la base de données (chapitre 6). Dans les chapitres 5, 7 et 8, l'analyse des changements d'occupation du sol et des logiques de mise en valeur l'espace est effectuée en articulant les observations aux niveaux région, zone agroécologique et territoire villageois. Aux chapitres 9 et 10, le changement d'échelle est pris compte dans la structure des modèles de prédiction et d'allocation des changements.



Photo 5. Une famille dans le village de Gadas, qui vient chez le chef du village remettre la dîme.

Chapitre 5. Analyse préalable de la structure et des dynamiques du système agraire

Résumé

Le système agraire des zones de savane de l'Extrême Nord du Cameroun présente une diversité de situations et de nombreuses interactions dont dépend sa dynamique. On a observé au cours des deux dernières décennies d'importantes mutations dans les systèmes de mise en valeur de l'espace. La conception et la mise en œuvre d'un Système d'Information destiné à fournir des connaissances sur les causes, les conséquences des changements en cours et les processus socio-économiques sous-jacents nécessitent une analyse préalable. Ce chapitre présente un tel état des lieux sur l'occupation du sol et l'évolution des principales formes d'utilisation de l'espace. Les données utilisées proviennent de la cartographie régionale de l'utilisation de l'espace et des facteurs potentiellement déterminants, d'une synthèse des données disponibles sur la zone d'étude et de travaux récents sur le terrain. Les résultats de ce diagnostic du système d'utilisation de l'espace révèlent que la pression démographique a contribué au développement de systèmes de mise en valeur extensifs, conduisant à une saturation progressive de l'espace dans plusieurs terroirs. Le modèle explicatif et prédictif formulé suppose que les trajectoires futures vont dépendre des investissements que les acteurs locaux et urbains vont consentir pour la gestion et l'aménagement de l'espace. La plupart des sites affichent une tendance malthusienne caractérisée par la dégradation et le déplacement des populations vers des zones plus productives. La relative stabilité observée dans plusieurs cas traduit la résilience de l'écosystème naturel de ces régions de savanes. Toutefois, quelques signes d'intensification au sens de Boserup sont perceptibles mais la véritable transition agraire reste attendue. Une analyse quantitative des dynamiques en cours et le développement d'un modèle de simulation pour explorer les scénarios d'évolution future fourniraient des bases d'une planification de l'utilisation de l'espace et de la négociation entre les acteurs impliqués dans la gestion.

Mots clés : dynamique agraire, changement d'occupation du sol et d'utilisation de l'espace, facteur déterminant, analyse systémique de la transition agraire.

Abstract

Land use systems in the far north of Cameroon are very diverse and incorporate an important number of interactions that determine their dynamics. During the past two decades, there have been many changes in the regional land use system. The design and implementation of an information system on the on-going changes and the related socio-economic processes requires a preliminary analysis. This chapter presents such an overview of the main land cover types and land use changes trends in the region. Data used for this purpose are derived from a combination of regional mapping of land use and its driving factors, with a synthesis of existing studies and field observations. The results of this diagnosis reveal that demographic pressure has led to extensive land use that has resulted in increasing land saturation in most areas. The explanatory and predictive model to be developed assumes that future trajectories will depend on the investments of local and urban actors to improve land quality and management. Most of the study sites appear to display a Malthusian tendency characterised by degradation and migration of people on more productive land. The relative stability in land use indicates the high resilience of savannah ecosystems. Few intensification signs in the sense of Boserup are emerging but the real agrarian transition is still expected. A quantitative analysis of on-going dynamics and the development of a simulation model for the exploration of scenarios for future changes could provide basis for land use planning and negotiation between actors involved in land management.

Key words : agrarian dynamics, land cover and land use change, driving factors, system analysis of agrarian transition.

5.1. Introduction

Le chapitre suivant de cette thèse porte sur la spécification de l'architecture fonctionnelle et informatique du SIE SMALL Savannah. Cette spécification conceptuelle devrait s'appuyer sur une bonne connaissance de la problématique et du fonctionnement du système d'utilisation de l'espace de la zone d'étude. Le présent chapitre est consacré à une analyse préalable qui fournit une description empirique de cette réalité. La zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun, comme la plupart des régions des savanes africaines connaissent depuis la période des indépendances, un développement orienté principalement vers les activités agricoles où la culture cotonnière a toujours joué un rôle prédominant. Pourtant, au cours des deux dernières décennies on a observé parallèlement au développement de la culture cotonnière, l'émergence d'autres formes de mise en valeur de l'espace par des populations rurales à la quête d'une sécurité alimentaire qui demeure incertaine (Njomaha, 2004). Une bonne partie de ces populations ont tendance à s'orienter vers les centres urbains qui se mettent en place et s'affirment de plus en plus comme des pôles d'attraction. En réponse à la forte demande alimentaire, on observe d'une part le développement d'une agriculture vivrière extensive basée sur les céréales traditionnelles, les cultures de décrue ou de contre saison et la riziculture. D'autre part, on observe le développement d'un élevage extensif basé sur l'exploitation des pâturages naturels et l'importance croissante des activités de pêche dans les plaines inondables (Mvondo, 2003 ; Bobo-Kadiri et Boukar, 1997). Dans un contexte caractérisé par la pauvreté, où la priorité est de limiter les risques et garantir un minimum de sécurité, la probabilité pour que la demande en ressources naturelles soit plus forte que les potentialités du milieu et qu'une faible priorité soit accordée à la protection de l'environnement est élevée. Ainsi, les espaces alloués à la conservation de la biodiversité sont soumis à une pression importante des populations périphériques. Ces transformations des espaces ruraux qui entraînent également des changements de modes d'utilisation peuvent déboucher sur des conflits d'usage de différentes natures (Hommer-Dixon, 1999). Etant donné la diversité des formes d'utilisation de l'espace et la complexité des interactions possibles, il est tout d'abord important de mieux comprendre la structure et le fonctionnement du système. De plus, les processus de changement d'utilisation de l'espace font intervenir une multiplicité de facteurs différents qui interagissent à différentes échelles spatiales et peuvent changer au cours du temps. La caractérisation du système agraire dans une perspective de modélisation nécessite une analyse intégrée qui permettrait d'identifier les différentes formes de compétition et d'interaction entre les utilisations de l'espace. Or les situations de compétition ou de complémentarité entre les formes d'utilisation de l'espace trouvent davantage leur origine dans la superposition des activités dans l'espace et dans le temps. L'objectif de ce chapitre est de faire un diagnostic et une caractérisation du système agraire et une analyse préalable des dynamiques d'utilisation de l'espace en vue de la modélisation. La section suivante s'appuie sur les résultats de la cartographie de l'occupation du sol couplés à une synthèse des informations disponibles sur la zone d'étude pour décrire la structure du système d'utilisation de l'espace. La section 3 analyse les dynamiques agraires survenues dans chaque zone géographique au cours des deux dernières décennies en faisant référence aux théories présentées au chapitre 2. Les connaissances qui se dégagent permettent de formuler des hypothèses sur les facteurs déterminants les changements d'utilisation de l'espace dans la section 4. La section 5 décrit le modèle explicatif et prédictif des trajectoires possibles de l'ensemble du système agraire.

5.2. Occupation du sol et changements dans le système d'utilisation de l'espace

L'analyse visuelle des images satellitaires en composition colorée combinée à une connaissance du terrain permet de distinguer quatre principaux types d'occupation du sol : les espaces cultivés, les zones de savanes boisées, les sols dénudés et les surfaces d'eaux permanentes. Il n'existe ni de zonage de l'utilisation de l'espace, ni de données satellitaires couvrant toute l'étendue de la région. Toutefois, la carte d'utilisation de l'espace réalisée met en exergue les zones réservées à la conservation de la biodiversité comme les parcs nationaux et les réserves forestières (figure 5.1). Dans certaines zones comme dans la région des monts Mandara et la région de Mindif, des zones sylvopastorales ont été délimitées. La plupart des espaces sont utilisés simultanément ou successivement pour l'agriculture, l'élevage, la pêche et la collecte du bois de feu en fonction de la période de l'année, des potentialités du milieu et des moyens de production. La répartition spatiale de ces utilisations montre que la région au nord de la plaine d'inondation du Logone est une zone à forte tendance pastorale alors que la région des monts Mandara est à forte tendance agricole. Les plaines centrales du Diamaré et de Kaélé, ainsi que la partie sud de la plaine d'inondation du Logone sont des zones où les activités agricoles et l'élevage sont assez intégrés. Les paragraphes suivants décrivent la structure et les changements des formes d'utilisation de chaque unité d'occupation du sol en mettant en exergue les possibilités d'interaction aux échelles locale et régionale. Les dynamiques spatiales décrites et les tendances d'évolution des différentes productions s'appuient sur les données statistiques disponibles et les observations localisées (MINAGRI, 1999; SODECOTON, 2001; MINEPIA, 2002 ; MINEF, 1993).

5.2.1. Espaces cultivés

Les surfaces cultivées sont passées d'une moyenne de 450 000 ha, à près de 700 000 ha au cours des deux dernières décennies (MINAGRI, 1983-1998). La principale stratégie pour augmenter la production reposant sur la conquête et la défriche de nouvelles terres jugées plus fertiles. Les données disponibles ne permettent pas d'évaluer avec précision l'importance des changements des surfaces cultivables à l'échelle régionale. Toutefois, les résultats de la cartographie de l'occupation du sol sur une zone de référence autour de la ville de Maroua révèlent une forte tendance à l'épuisement des possibilités de défrichement des brousses qui se traduit par une intrusion des populations dans les aires protégées pour les activités agricoles (chapitre 8). C'est le cas par exemple dans la réserve forestière de Laf (Boubaoua, 2001) et la réserve forestière de Zamay (Teicheugang, 2000) où des études plus détaillées ont été conduites pour faire un état des lieux. Les espaces cultivés sont principalement utilisés pour la production agricole le plus souvent combinée avec l'élevage (intégration agriculture - élevage). Les systèmes de mise en valeur de ces espaces dépendent des saisons, des types de production et des potentialités du milieu. Ces critères suggèrent une classification hiérarchique des formes d'utilisation des espaces cultivés (figure 5.2). En saison des pluies, les cultures pluviales (coton, sorgho, riz pluvial, maïs) sont pratiquées sur les terres exondées alors qu'en saison sèche les sorghos de contre saison sont pratiqués sur les vertisols et les cultures irriguées ou maraîchères s'installent sur les sols alluviaux regorgeant de l'eau, dans les bas fonds ou le long des cours d'eau lorsque les conditions le permettent.

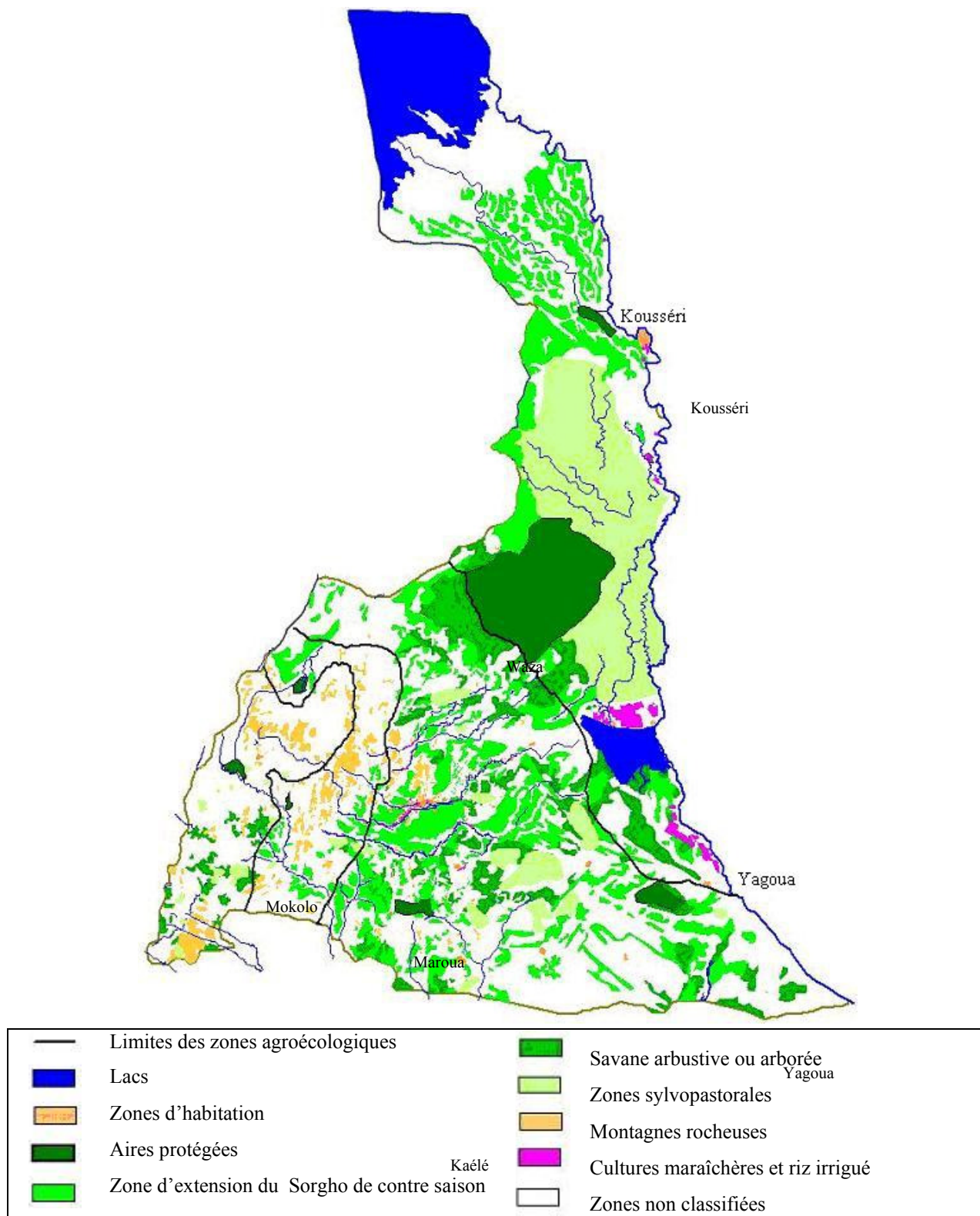


Figure 5.1 : Localisation des principales utilisations de l'espace de la région de l'Extrême nord du Cameroun. Source : Photo-interprétation des images satellites disponibles et exploitation des cartes existantes.

5.2.1.1. Agriculture de saison de pluie

En saison de pluies, le système pluvial est plus répandu avec la pratique des cultures de sorgho, mil pénicillaire, coton, maïs, arachide, riz et niébé. Toutefois, une importante partie des cultures maraîchères mises en place pendant la saison des pluies nécessite en plus des eaux de pluie, un apport complémentaire d'eau compte tenu de l'irrégularité des pluies dans la région. C'est le cas par exemple de l'oignon pluvial, des tomates et de la laitue qui sont irrigués en saison de pluie.

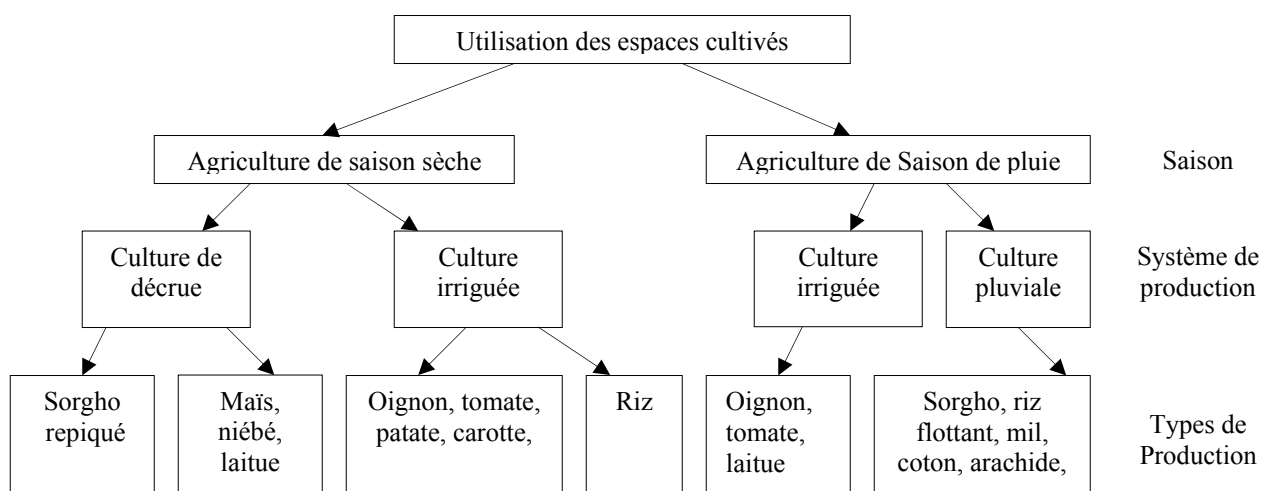


Figure 5.2 : Une hiérarchie des formes d'utilisation des espaces cultivés.

a) Sorgho pluvial et mil pénicillaire

Le sorgho pluvial et le mil constituent la part la plus importante de la production céréalière, suivie de celle des sorghos de contre saison. Ils conviennent à la majorité des sols. Le mil pénicillaire par exemple évolue sur des sols sableux pauvres (sud du Mayo Danay) ou sur des zones d'anciennes dunes (pays Toupouri). Dans les montagnes, les populations cultivent de nombreuses variétés de mils rustiques adaptés aux lithosols et s'accommodant mal aux sols à texture fine. Les sorghos de saison de pluies se font le plus souvent en rotation avec le coton et parfois l'arachide. On distingue deux principaux groupes de sorgho en fonction du cycle végétatif. Les sorghos précoces à cycle court (récolte en août ou début septembre) qui donnent de très bons rendements (800 et 1000 kg/ha) sur des sols limoneux ou sablo-argileux bien

structurés. Les sorghos tardifs (yolobri) à cycle plus long (récolte en novembre ou décembre), donnent des rendements plus faibles. Ils ont un caractère très extensif car les champs se disséminent dans la brousse parmi les jachères. La distribution géographique des sorghos pluviaux dépend de la répartition de la pluviométrie. Les sorghos précoces se trouveraient plus au nord de la région car l'arrêt des pluies en septembre dans ces zones gênerait la maturation des sorghos à cycle long. Les sorghos tardifs se retrouvent par contre à la latitude de Maroua et prennent plus de l'importance vers le sud. Leur limite septentrionale tend à descendre vers le sud avec la diminution des pluies. Dans les différents terroirs, les agriculteurs les combinent en fonction des potentialités du milieu. Ils réservent en général les meilleures terres sur alluvions récentes situées en bordure des mayos ou les terres fertilisées proches des habitations aux sorghos précoces. Cette stratégie a également l'avantage qu'elle permet de mettre en liberté le petit bétail dès le mois d'octobre après la récolte. Les statistiques agricoles indiquent que les surfaces de sorgho pluvial mises en culture chaque année oscillent autour d'une valeur moyenne de 250 000 ha en fonction des changements de la pluviométrie. L'évolution des rendements a également une distribution non uniforme mais l'approximation par une droite révèle une tendance à la baisse des rendements qui ont une valeur moyenne de 900 kg/ha. En ce qui concerne le mil pénicillaire, la baisse des surfaces mises en culture est très évidente car elles sont passées de 100 000 ha à seulement 20 000 ha au cours des deux dernières décennies (MINAGRI, 1983-1998). Cette tendance à l'abandon de la culture du mil serait une conséquence de la baisse des rendements observés (entre 400 et 600kg/ha). Cette réduction de la production céréalière a été compensée dans certaines zones par les cultures de maïs ou de sorgho de contre saison en fonction des potentialités du milieu.

b) Coton

Contrairement au sorgho pluvial, le coton est une plante relativement exigeante qui présente des rendements si bas sur les sols très sableux ou très pauvres en matières organiques qu'il ne peut y être cultivé. Il est adapté aux sols sur alluvions récentes en bordure de mayos où les cultivateurs pratiquent une rotation régulière coton - sorgho pluvial. Il est parfois cultivé sur des vertisols lorsque la teneur en argile n'est pas excessive ou qu'une topographie en faible pente assure un certain drainage. Dans ce cas la rotation se fait avec le sorgho de saison sèche. La culture du coton était déjà pratiquée dans la région depuis l'époque coloniale sous forme de plante pérenne. Plusieurs tentatives de modernisation et d'intensification de cette culture ont connu des échecs. C'est à partir de 1951, au moment de la création de la CFDT (Compagnie Française pour le Développement des Fibres Textiles), que les vieux cotonniers ont été supprimés pour être remplacés par le coton annuel qui est cultivé actuellement. Depuis son introduction jusqu'au début des années 70, la culture cotonnière a évolué de façon très extensive en particulier dans les plaines et les piémonts. Les surfaces cultivées sont passées de moins de 10 000 ha à près de 80 000 ha et les rendements moyens ont subi le même rythme d'accroissement, passant de 400 kg/ha à près de 875 kg/ha. Le succès de la culture cotonnière au cours de cette première phase s'explique par une combinaison de facteurs favorables qui viennent s'ajouter à la qualité de l'encadrement assurée par la CFDT. Ce sont une pluviométrie abondante et relativement régulière, une disponibilité de la main d'œuvre assurée par les populations des montagnes descendues vers les piémonts et les plaines voisines. Au cours de la décennie 70, la culture du coton traverse une période de crise attribuée essentiellement à la sécheresse qui a marqué la région pendant cette période. Elle a ainsi contribué à un découragement des paysans et explique la baisse importante de la production enregistrée. Les rendements moyens sont restés en dessous de 500 kg/ha pendant toute la première moitié de la décennie 70. Cette crise de la production cotonnière a conduit

à une réorganisation des structures d'encadrement et la mise en place d'un système de production intensif du coton assurée par la SODECOTON créée en 1974. Au cours des deux dernières décennies, la culture cotonnière a joué un rôle central dans le développement rural de la région. Les surfaces cultivées ne représentent que la moitié de celles enregistrées au cours des années 70, mais la production est presque la même grâce à une augmentation des rendements moyens qui atteignent 1250 kg/ha au début des années 80 et avant de se stabiliser entre 1100 et 1000 kg/ha (Roupsard, 1985). Les surfaces cultivées sont ensuite passées du simple au double au cours des deux dernières décennies. L'augmentation des surfaces est plus significative à partir de la deuxième moitié de la décennie 90, spécifiquement dans les zones de Maroua sud et de Kaélé où on a enregistré respectivement des accroissements de l'ordre 71% et 50%. Dans la zone de Maroua, elle se traduit par un intérêt des agriculteurs de la partie des monts Mandara qui investissent de plus en plus sur la culture du coton, et de ceux du secteur de Bogo où l'élevage bovin est important et le coton est considéré comme un moyen d'accès au tourteau pour nourrir le bétail ou agrandir le cheptel. Dans la région de Kaélé, bien que la pluviométrie ne soit pas favorable, la production cotonnière se présente comme la seule alternative pour les paysans de se procurer des revenus. Les superficies n'évoluent pas assez dans les secteurs de Tchatchibali et Doukoula à cause du manque de terres auquel viennent s'ajouter le caractère aléatoire de la pluviométrie et la compétition avec le riz. En effet, les engrais distribués pour la production du coton dans les zones frontalières du projet SEMRY, sont également utilisés pour la production du riz (SODECOTON, 2001).

c) Autres cultures pluviales : arachide, riz pluvial, niébé et maïs

L'arachide est une plante peu exigeante qui se contente des sols médiocres en particulier sur des terrains sableux qui permettent de l'arracher facilement et qui en revanche ne conviennent pas au coton. Ce sont essentiellement les sols ferrugineux tropicaux sur matériaux sableux, dunaires et interdunaires, sur lesquels l'arachide alterne avec le mil (Boutrais et al., 1984). Contrairement au coton elle ne nécessite pas trop de soins ni de suivis techniques particuliers. L'arachide était une importante culture d'exportation avant l'introduction du coton. Toutefois, elle conserve ce caractère commercial dans les zones montagneuses et les plaines sableuses qui sont les deux principales zones arachidières et contribuent à 80% de la production totale de la région (MINEF, 1993). Le Niébé en système pluvial est cultivé presque partout dans la région. La plante n'exige pas de fumure et sa diffusion dans l'agrosystème serait liée au fait qu'elle se présente comme une source de protéine concurrente. Ceci justifie son caractère essentiel et son importance (50% de la production de la région) chez les montagnards de la partie nord des monts Mandara qui ne disposent pas assez de sources de protéines. La production de niébé est par contre très faible chez les populations Musgum, Kotoko ou Massa qui pratiquent la pêche, la chasse et disposent d'un élevage important qui constituent des sources de protéines alternatives. Le maïs est pratiqué principalement dans la région des monts Mandara et dans la partie nord de la plaine d'inondation d'où provient près de 90% de la production de la région. Initialement cultivé dans la province du Nord, la culture du maïs progresse vers l'Extrême Nord depuis quelques années. Les statistiques agricoles montrent qu'entre 1987 et 1998, les surfaces cultivées en maïs ont évoluées de façon quasi linéaire, passant de près de 10 000 à 60 000 ha. Les rendements ont d'abord suivis une phase d'évolution croissante au cours de la décennie 80 avant d'amorcer une phase de baisse constante au cours de la dernière décennie.

5.2.1.2. Agriculture de saison sèche

En saison sèche, on distingue deux principaux systèmes de culture : les cultures de décrue et les cultures irriguées. Les sorghos de contre saison pratiqués sur les vertisols sont les cultures de décrues les plus importantes. D'autres cultures de décrue comme le niébé et le maïs sont pratiquées principalement dans les bas fonds des plaines d'inondation dès que les eaux se retirent. Les cultures irriguées en saison sèche comprennent le riz et les cultures maraîchères comme l'oignon et les légumineuses.

a) Les sorghos de contre saison

Les sorghos de contre saison sont des sorghos repiqués qui suivent un cycle contraire à celui des sorghos de saison de pluies. Ils sont semés en pépinière et sont repiqués en fin de saison de pluies et mûrissent en saison sèche. Ils sont cultivés sur des sols à texture argileuse qui déterminent les limites spatiales d'extension de la culture. On distingue deux grands groupes : le Muskuwaari, plus répandu est repiqué en fin septembre et récolté en février. Le Babouri par contre a une aire d'extension très réduite qui coïncide à peu près avec celle du groupe ethnique Toupouri qui le cultive traditionnellement sur les dépressions sablo-argileuses de leurs terroirs. Il est repiqué en août et récolté en janvier. Il se contente des sols ayant un pouvoir de rétention en eau moins élevé. Ce groupe tend à perdre du terrain au profit du coton et du Muskuwaari. Avec leur cycle cultural décalé par rapport aux autres cultures, les sorghos de contre saison présentent l'intérêt de ne réclamer la main d'œuvre paysanne qu'après la période d'intense activité agricole. Ceci permet un étalement des travaux pendant l'année, surtout lorsqu'on sait très bien que la concentration des activités pendant quelques mois de la saison des pluies est le principal handicap dont souffre l'agriculture dans cette région. L'extension de la culture du sorgho de contre saison qui a commencé dans la province de l'Extrême Nord du Cameroun dans les années 1950 parallèlement au développement de la culture cotonnière a atteint des proportions remarquables au cours des deux dernières décennies. On a observé de nombreux défrichements sur les vertisols disponibles qui sont les terres les plus recherchées par les agriculteurs pour la culture du sorgho de contre saison. Cette culture occupe depuis le milieu des années 80 (1984) une place très importante dans les plaines et on estime que leur production représente presque 40% de la production céréalière totale de la région. Au niveau de la zone cotonnière, les surfaces mises en cultures ont commencé à augmenter au cours de la décennie 80 en passant de moins de 40 000 ha à un peu plus de 80 000 ha. Après cette période les surfaces mises en culture ont très vite dépassé 100 000 ha et ont atteint 1800 000 ha au cours des dernières années. En fonction des conditions climatiques de l'année, les surfaces mises en culture chaque année à l'échelle de l'ensemble de la région, varient entre 150 000 et 200 000 ha. Une analyse du paysage des plaines de la région par télédétection a montré que des superficies plus importantes sont défrichées chaque année pour l'extension des champs de sorgho de contre saison. Cette extension qui a des conséquences importantes sur l'ensemble du système agraire des plaines de l'Extrême Nord du Cameroun est principalement impulsée par une augmentation de la demande alimentaire résultant de l'accroissement de la population. Toutefois, elle a été également déterminée par une combinaison de facteurs favorables incluant le développement de la culture cotonnière, un milieu favorable, le perfectionnement des techniques et la dissémination des connaissances des pratiques culturales paysannes. Une analyse du processus d'extension et de ses conséquences à l'échelle régionale a été menée et les résultats sont présentés au chapitre 7.

b) La culture du riz

Le riz est d'une importance économique remarquable dans la région et se cultive principalement dans la zone des Yaérés qui sont des vastes dépressions inondées chaque année. La majeure partie de la production vient des rizières situées le long du fleuve Logone à partir de Yagoua jusqu'à Pouss et Maga. Ces rizières ont été aménagées au début des années 80, dans le cadre du programme d'intensification de la culture initié par le gouvernement camerounais. Il a été construit à cet effet d'une part la digue sur le lac de Maga et d'autre part une longue digue pour empêcher les débordements des eaux du Logone. On trouve également des petites zones rizicoles sommairement aménagées au sud de Yagoua dans le bec de canard et plus à l'ouest dans les régions de Doukoula, Moulvouday et Guirvidig. Cette activité agricole permet de mettre en valeur des zones pratiquement inutilisées et permet aux populations autrefois orientées vers la pêche de diversifier les activités. Cette culture a connu une forte impulsion grâce à la création d'une station rizicole à Pouss en 1950 qui fut transférée en 1953 à Yagoua et remplacée en 1954 par la SEMRY qui ont successivement développé une infrastructure adaptée et un encadrement aux paysans. Déjà en 1969, environ 5500 ha de riz était cultivé dans la région pour une production de 7 519 tonnes. La courbe d'évolution de la production rizicole dans la région peut être divisée en trois principales phases : une première phase correspondant à la première moitié de la décennie 80 caractérisée par une augmentation de la production. En effet, les trois principales unités de production de la SEMRY atteignaient déjà une production de 100 000 tonnes de riz pour une superficie totale d'environ 13 000 ha en 1986. A partir de 1987, la production annuelle du riz a connu un fléchissement jusqu'en 1990 où on a enregistré une production de moins de 60 000 tonnes. Cette situation est attribuée d'abord à la faible compétitivité sur le marché par rapport au riz importé. Une contrainte importante étant l'éloignement et le mauvais état de l'infrastructure routière entre les zones de production et les marchés urbains du pays. Dans le contexte de crise économique que traversait le pays au cours de cette période, le gouvernement s'est vu obligé d'annuler les subventions à la société SEMRY qui n'était plus en mesure de supporter les charges liées au processus de production. La décennie 90 a été enfin caractérisée par une relance des activités qui restent toutefois assez mitigée du fait d'un nombre important de contraintes notamment la baisse des rendements, la faible rentabilité de la riziculture actuelle, la forte concurrence du riz importé, et les difficultés de la SEMRY liées à la vétusté du matériel agricole et à la gestion du personnel. Après l'installation des SEMRY, les rizières présentent actuellement un potentiel de 10000 ha cultivables en casiers aménagés dont seulement environ 6000 ha sont mis en culture chaque année. Il existe en plus de ces casiers rizicoles aménagés, des surfaces cultivables hors casiers, inondées naturellement qui sont très peu exploitées. Les rendements moyens sont passés de 5 tonnes/ha de paddy à seulement 3 tonnes/ha.

c) Les cultures maraîchères et les arbres fruitiers

Les cultures maraîchères sont pratiquées par irrigation et de façon intensive sur de très faibles superficies principalement dans les plaines du Mayo Sava et du Diamaré. La distribution spatiale de la production maraîchère est en premier dictée par les conditions du milieu. Les cultures maraîchères sont en général des cultures de contre saison qui exploitent les nappes d'eau souterraine en saison sèche. Ces sites sont parallèlement utilisés pour la production des fruitiers qui bénéficient de l'irrigation. Elles se pratiquent donc le long des cours d'eau ou sur les alluvions des lits majeurs des cours d'eau où la nappe phréatique est peu profonde et donc facilement accessible. C'est le cas notamment dans la plaine du Diamaré où les maraîchers sont concentrés le long des mayos Tsanaga et Boula et dans la plaine de Koza à Mora où les activités maraîchères suivent les mayos Ngassawé et Moskota. Environ 75% des périmètres maraîchers

sont consacrés à la culture d'oignon et le reste des périmètres sont utilisés pour la culture des légumineuses tels que les tomates, les carottes, les aubergines, la laitue, l'ail, le poireau, les choux, le gombo et l'oseille. L'irrigation se fait en général à partir des puits à ciel ouvert. L'agriculture maraîchère concerne deux principaux types de producteurs : les paysans ruraux pour qui l'activité constitue une source de revenus complémentaire à celle de la vente du coton, et les élites ou producteurs urbains qui ont le monopole de l'activité compte tenu des moyens dont ils disposent. Dans les zones de production concernées, ce développement a transformé le droit de la terre et créé des relations nouvelles entre propriétaires de la terre, manœuvre et exploitant. Dans la région, près de 48% des cultures maraîchères se font sur des terres en location. En particulier dans les régions du Diamaré et de Kaélé on assiste à de nombreuses transactions sur les terres destinées au maraîchage. Les propriétaires fortement sollicités préfèrent transférer les risques d'exploitation liés aux aléas climatiques en louant leur terre à des exploitants temporaires. Les règles de cession et la valeur de la terre dépend de l'origine ethnique ou de la croyance religieuse et révèlent les enjeux du contrôle de l'espace. Il n'existe pas de données récentes sur l'évolution des cultures maraîchères. Toutefois, la progression des maraîchers est perceptible à l'échelle de la région : au milieu des années 80, les maraîchers intéressaient déjà environ 7696 paysans. Le taux d'évolution annuel moyen calculé sur la base des données concernant cette activité entre 1982 et 1985 était de l'ordre de 14%. Cette progression n'est toutefois pas uniforme dans l'espace et les principaux facteurs contraignants du développement de la culture maraîchère sont l'approvisionnement en eau et le circuit de commercialisation qui comprend les moyens de stockage et les infrastructures d'évacuation des produits vers les marchés. Le développement récent de l'agriculture maraîchère est principalement favorisé par la demande urbaine au niveau de la région et des centres urbains du Sud-Cameroun. Toutefois, la qualité du site qui est déterminée par le niveau des nappes d'eau et la saturation de l'espace qui rend complexe le système d'accès à la terre se présentent comme des facteurs contraignants (Iyébi Mandjek, 2000).

5.2.2. Zones de savanes boisées

Les zones de savanes boisées et les ressources naturelles qu'elles regorgent sont destinées à plusieurs formes d'usages : l'élevage, l'approvisionnement en bois et la conservation de la biodiversité à travers les aires protégées. Ces trois principales utilisations s'intègrent plus ou moins bien avec une utilisation agricole extensive.

5.2.2.1. Utilisation pastorale des zones de savanes

Système d'élevage

On distingue dans la région un élevage sédentaire, semi-nomade et la transhumance. Mais, la transhumance semble être le système le plus courant du fait de l'importante variation saisonnière des ressources pastorales. C'est un système de type extensif principalement basé sur l'usage des pâturages naturels par les troupeaux. Les éleveurs ont un parcours saisonnier bien déterminé au cours de l'année. Ce type d'élevage est pratiqué sur l'ensemble des plaines d'inondation du Logone et des plaines de Mora qui en saison sèche, accueillent le bétail venant du Diamaré et des pays voisins, notamment le Tchad et le Nigéria (Requier-Desjardin, 2001). L'élevage sédentaire est également pratiqué par certaines communautés villageoises. Dans ce cas, ces éleveurs font également l'agriculture qui est une source

d'alimentation du bétail et le troupeau est en général maintenu dans le terroir (MINEF, 1993). Ce type d'élevage concerne en majorité les zones montagneuses dominées par une agriculture en terrasse et dans une moindre mesure la plaine du Diamaré et de Kaélé qui est une zone d'agro-élevage où on observe de plus en plus une régression de la transhumance. La pratique du nomadisme (éleveur en déplacement constant à la recherche d'eau et d'alimentation) est très limitée. L'utilisation pastorale de l'espace est également dépendante du rythme des saisons et des pluies. En effet le rythme assez contrasté commande le cycle de la végétation et le régime des eaux à la surface du sol (présence des mares). La plupart des éleveurs transhumants venant de la plaine du Diamaré et des pays voisins (Tchad, Nigéria, Niger) s'installent dans la plaine d'inondation du Logone en saison sèche, à partir de novembre ou décembre, au moment du retrait des eaux. Leur arrivée dépend de la quantité de pluie enregistrée au cours de l'année. Ils peuvent à ce moment trouver facilement du fourrage et accéder facilement aux points d'eau de surface alors que les pâturages des plaines et des montagnes environnantes s'assèchent et que les eaux de surfaces disparaissent. Entre novembre et janvier, les animaux se nourrissent des jeunes repousses herbeuses qui apparaissent après le retrait des eaux. Entre février et le début de la saison pluvieuse en mai, lorsque les eaux se sont considérablement retirées de la plaine vers les cours d'eau et dépressions, les éleveurs mettent les pâturages en feu pour brûler les herbes sèches et stimuler les repousses des herbacées pérennes dont se nourrissent les animaux. A partir du début de la saison des pluies (mai - juin) les éleveurs dirigent leurs troupeaux vers les zones qui ont reçu les premières pluies. Dès qu'il y a assez d'eau dans la plaine (juillet - août), les éleveurs migrent vers leur région d'origine où ils restent environ deux mois. Ce n'est que lorsque les eaux courantes s'assèchent et que les pâturages se dégradent que le cycle de transhumance vers la plaine d'inondation recommence.

Evolution des ressources pastorales et des formes d'utilisation

On distingue quatre principales zones pastorales présentant chacune ses spécificités en ce qui concerne les potentialités, les fonctions économiques et le système agropastoral pratiqué par les communautés villageoises. La zone de la plaine d'inondation qui reste en eau pendant une moitié de l'année constitue une réserve de fourrage pour la saison sèche. Avec ses vastes savanes herbeuses des prairies inondées qui ne peuvent être exploitées plus facilement à d'autres fins que pour l'élevage, cette zone a toujours été une importante zone de pâturage pour des milliers d'éleveurs de la sous région d'Afrique centrale. Elle abrite les troupeaux des éleveurs transhumants en provenance du Tchad, Niger, Nigéria et du Diamaré. La zone de la plaine de Mora est une zone agropastorale qui sert de passage aux transhumants venant du Nigeria vers la plaine. La zone des monts Mandara est une zone d'élevage sédentaire associé à une agriculture vivrière. La zone des plaines du Diamaré et de Kaélé est une zone d'agro-élevage pour près de 70% de la population. Elle accueille les transhumants venant de la plaine d'inondation du Logone en saison des pluies. Au cours des trois dernières décennies, la combinaison des activités humaines et des sécheresses a entraîné des modifications quantitatives et qualitatives des ressources pastorales. L'augmentation des surfaces agricoles dans l'ensemble et en particulier l'extension récente de la culture du Muskuwaari a contribué à une réduction des espaces pâturables et donc à une baisse des ressources fourragères. La baisse du niveau des inondations de saison de pluie dans la plaine du Logone aurait entraîné le remplacement des espèces les plus nutritives par d'autres moins appréciées par le bétail (Mvondo et al., 2003). Des changements similaires sont signalés dans la plaine du Diamaré et dans l'arrondissement de Mindif en particulier où les plantes fourragères vivaces ont disparu pour la plupart (Requier-Desjardins, 2001). Lorsque la superficie pâturable baisse et que les ressources pastorales se dégradent, on assiste par contre à

une augmentation de la taille du cheptel car de nombreux paysans mesurent la richesse de l'éleveur sur la taille de leur troupeau plutôt que sur le rendement escompté ou sur les ressources disponibles. Les tendances fournies par les données de recensement au cours des deux dernières décennies, montrent que l'effectif du cheptel bovin dans la province, estimé à un peu plus de 800 000 têtes en 1984 a d'abord connu une diminution importante à la fin de la décennie 80 du fait de la sécheresse. En 1991 le cheptel bovin est estimé à 650 000 têtes. Depuis le début des années 90, l'effectif du cheptel bovin est en hausse et atteint actuellement près de 1 200 000 têtes selon de le dernier recensement du cheptel (MINEPIA, 2002). Si l'on ajoute la charge supplémentaire créée par les flux de troupeaux venant de l'extérieure de la région, la pression sur les pâturages sera certainement supérieur à la capacité de charge des pâturages existants. L'insuffisance des ressources pastorales (espace et fourrage) en particulier pendant la saison sèche est le problème le plus crucial qui se pose aux éleveurs de la région. L'utilisation de plus en plus extensive des terres à des fins agricoles contribuant à une réduction considérable des pâturages, au rétrécissement voir à la disparition des pistes de parcours de bétail, constituant ainsi un réel problème de gestion de l'espace et des ressources naturelles. Le développement de la culture cotonnière et de la culture de contre saison en particulier induisent des effets à priori très compétitifs mais présentent également d'importantes potentialités d'intégration avec l'élevage. Dans les zones où le système d'élevage est principalement transhumant, le développement de ces productions agricoles réduit la disponibilité des espaces ou contribuent à une fragmentation de ceux-ci et les rend incohérents pour le pâturage. Dans les zones ou le système d'élevage dominant est de type sédentaire, il sera par contre difficile d'envisager un développement harmonieux de l'élevage qui n'intègre pas les spécificités de l'une ou l'autre des ces deux productions agricoles qui se présentent à la fois comme des sources de production pour l'alimentation du bétail à travers les résidus de culture et comme source de financement pour l'agrandissement du cheptel.

5.2.2.2. Approvisionnement en bois

L'approvisionnement en bois est une fonction essentielle des zones de savanes de la région. Les travaux de Assan (1991) et de Ntoupka (1999) ont montré que plus de 80% du bois consommé dans la région provient principalement des formations naturelles. Compte tenu de la demande croissante et des processus de dégradation de ces formations naturelles, l'utilisation durable des ressources ligneuses doit nécessairement passer par le développement des pratiques agro forestières, la création de plantations forestières et la mise en œuvre effective de forêts communautaires destinées à la production du bois de feu et de service.

Etat de la production et consommation de bois

La production du bois est également déterminée par le rythme des saisons. Une forte concentration des prélèvements est observée en saison sèche où une partie du bois est stockée pour la vente en saison pluvieuse. L'absence de pluies facilite la collecte et le transport, et l'allègement du calendrier libère assez de temps pour cette activité. En saison pluvieuse, le bois est rare et la plupart des prélèvements sont destinés principalement à l'autoconsommation. La collecte du bois destinée à la vente est concentrée dans les zones à accessibilité permanente. Les sites d'approvisionnement en bois de la ville de Maroua ont été identifiés par enquête. Ils sont principalement localisés dans les arrondissements de Moutourwa, Maroua, Mindif, Kay-Kay et Petté. Les zones regorgeant les ressources ligneuses ont été localisées plus précisément par télédétection (Fotsing et Madi, 1997 ; Yengue, 2000). On distingue principalement les

zones de savanes boisées au-delà des champs, les plantations forestières et les zones de cultures associées aux parcs arborés parsemés de *Faidherbia albida* ou *Prosopis africana*.

Très peu d'informations précises existent concernant la productivité en bois des formations naturelles des savanes. Des niveaux de productivité par zone agroclimatique ont été proposés par Goudet (1990) en fonction des pluviosités annuelles. Pour la zone soudanienne, la productivité est estimée en moyenne à 0,25 m³/ha/an. Ntoupka (1999) a obtenu des valeurs similaires dans la zone des savanes soudano sahéliennes de l'Extrême Nord du Cameroun et indique que cette productivité peut doubler si on adopte une méthode de coupe améliorée et de protection contre les feux. Ces informations peuvent servir de base pour estimer la production potentielle en bois de feu. Toutefois, la production ainsi obtenue reste indicative car elle inclut toutes les espèces ligneuses et par conséquent celles qui ne sont pas de meilleurs bois de feu. De plus, cette estimation nécessite une évaluation préalable des superficies occupées par les différentes zones de savanes boisées. Or cette information n'est pas disponible ou mise à jour sur l'ensemble de la région. Sur la base de la carte d'occupation du sol réalisée par Fultang (dans MINEF, 1993) la production potentielle de bois de feu dans la province est estimée à environ 1 669 640 m³/an. Cette production prend en compte la productivité des différentes unités d'occupation du sol notamment les forêts et reboisements, les savanes claires et denses, les zones peu ou très cultivées et les zones montagneuses ou rocheuses. On considère que un mètre stère est la quantité de bois contenue dans un volume d'un m³ et qui pèse en moyenne 200 kg en fonction de la densité du bois (MINEF, 1993).

Une estimation des besoins en bois énergie et de service de la population montre que, l'ensemble de la région présente une situation largement déficitaire. Les populations de la province dans l'ensemble, dépendent fortement du bois de feu. Les données montrent que 90% des ménages en ville contre 97% en milieu rural utilisent le bois comme source d'énergie principale. De plus, on estime que la consommation moyenne par habitant dans la région soudanienne est de 0,8 kg/j en milieu rural et de 0,5 kg/j en milieu urbain (MINEF, 1993). Cette différence s'explique par le fait que l'accès aux autres sources d'énergie est plus facile en ville. En prenant en compte la structure de la population et sur la base des projections des données de recensement de la population, les besoins en bois de la province de l'Extrême Nord s'élèveraient à près de 4 051 500 m³/an pour une population qui est actuellement estimée à 3 millions d'habitants parmi lesquels on compte un peu plus de 600 000 urbains. Ce besoin est 2,5 fois supérieur à la production potentielle des savanes de la région. Avec la réduction des surfaces boisées et la dégradation des formations existantes, cette production potentielle baisse évidemment. Ces informations amènent inéluctablement à s'interroger sur l'évolution de ce processus, les possibilités de maintien et de gestion durable de ces savanes boisées ainsi que sur les pratiques et les stratégies que les populations locales mettent en place pour exploiter ces ressources.

Dynamiques des ressources ligneuses et stratégies paysannes

L'évolution des formations ligneuses de la région est soumise à l'influence combinée de facteurs d'ordre biophysique, démographique et économique. La crise économique de la fin des années 80 a contribué à réduire considérablement le pouvoir d'achat et incité les populations à s'orienter vers de nouvelles activités génératrices de revenu (Madi et al., 2002). C'est ainsi que l'exploitation du bois de feu, est devenue au cours des années 90 une importante activité commerciale dans la région et présente d'importantes conséquences sur le potentiel ligneux. Le résultat des analyses diachroniques de l'occupation du sol confirme l'idée selon laquelle l'extension des superficies agricoles est la principale cause de dégradation du couvert ligneux (Fotsing et Madi, 1997). Le processus de dégradation des

ressources ligneuses se traduit également par une augmentation des distances de collecte du bois perçue aussi bien par les commerçants urbains que par les populations riveraines des sites de production. La plupart des personnes interrogées, affirment que la distance de coupe est devenue une contrainte majeure pour l'exploitation du bois (Van Well, 1998 ; Musa, 1995). Les zones d'approvisionnement les plus proches du centre urbain qui au milieu des années 80 se trouvaient entre 5 et 10 km se sont déplacées jusqu'à 40 à 50 km de la ville de Maroua. Les savanes situées dans un rayon de 20 à 30 km autour de Maroua ont été banalisées par une coupe sélective des meilleures essences et il ne reste plus que les essences telles que *Boswellia*, *sclérocarya birrea*, *sterculia setigera* ou *commiphora africana* qui ne sont pas appréciées comme bois de feu. Les résultats des travaux de Yengue (2000) relativisent l'importance du phénomène de déboisement et indiquent que la perte de la biodiversité constitue le véritable danger bien qu'elle soit difficile à percevoir.

La consommation de bois dans la ville de Maroua en 1990 était de 2 kg/jour/personne, soit deux fois plus grande que la consommation moyenne dans la zone soudano-sahélienne. Toutefois, une étude récente sur la demande en bois de feu menée dans la ville de Maroua et ses environs montre que la consommation des ménages urbains entre 1991 et 2000 a diminué, passant de 2 à 1,5 kg/jour/personne (Madi et al. 2002). Cette baisse serait une conséquence de la rareté de la ressource qui conduit non seulement à une utilisation plus rationnelle du bois, mais également à une utilisation plus accrue des sources d'énergie alternatives (gaz, pétrole, surtout en saison pluvieuse). Toutefois, le scénario envisageable pour l'évolution de la consommation du bois privilégie l'hypothèse d'une demande encore plus forte en bois de feu étant donné la difficulté d'approvisionnement en gaz des provinces septentrionales du pays et le niveau de pauvreté qui ne permet pas toujours aux ménages d'investir dans l'acquisition d'un réchaud à gaz ou à pétrole. Une importante partie de la population devra donc rester dépendante du bois de feu. D'autres formes d'approvisionnement en bois de feu autre que l'exploitation anarchique des formations naturelles devront être envisagées notamment par l'amélioration des techniques de coupe, le développement des pratiques agroforestières ou la création des forêts communautaires qui commencent assez difficilement à se mettre en place dans cette partie du Cameroun.

L'intégration de l'arbre à l'agriculture a été pendant longtemps négligée en zone des savanes du Nord Cameroun. Au contraire les différentes formes d'expansion agricole qui se sont opérées notamment le développement de la culture d'arachide, de la culture cotonnière et très récemment celle de la culture du sorgho de contre saison ont contribué à éliminer les arbres dans les champs. La plupart des actions de foresterie élaborées sur des bases techniques et fondées sur des savoirs exogènes à la société locale ont été très peu diffusées. Toutefois, il faut relever que certaines actions d'agroforesterie initiées en s'appuyant sur les pratiques paysannes commencent à connaître un succès à l'échelle de la région. C'est le cas par exemple de la densification ou la régénération assistée des parcs arborés dans les zones cultivées ou dans les zones de jachère (Gautier et Seignobos, 2002). En 1996, le projet DPGT a débuté avec les paysans, une opération de régénération essentiellement axée sur le *Faidherbia* dont les résultats sont visibles dans le paysage. Seignobos a décrit plusieurs exemples de construction récente de parcs arborés dans la région de l'Extrême Nord du Cameroun en association avec le système agricole et pastoral (Seignobos et Iyébi-Mandjeck, 2000). L'exemple le plus visible est celui des parcs à *Faidherbia* qui ont été construits méthodiquement par l'homme sur les champs permanents dans la zone des piémonts des monts Mandara et sur les plateaux de Kapsiki. Dans la région des monts Mandara, où la saturation foncière est survenue un

peu plutôt que dans les plaines, les paysans ont acquis une culture de l'organisation de l'espace par l'arbre et la gestion des longues tiges des sorghos des lithosols contribue à résoudre les problèmes de bois de feu.

La nouvelle loi forestière Camerounaise de 1994, ouvre une nouvelle perspective qui donne aux populations locales la possibilité de mettre en place des forêts communautaires. Quelques initiatives sont en cours dans la région sous l'impulsion et le parrainage de projets de développement mais restent à des stades préliminaires d'avancement. Dans la zone du Diamaré par exemple, la forêt d'Abouli parrainée par le CACID/IUCN a été réservée, le plan simple de gestion a été rédigé et soumis au Ministère en charge des Forêts. Dans la région du Mayo Sava, le projet PAAR /GTZ a parrainé deux forêts communautaires : la forêt de Doulo-Magdemé pour laquelle le plan simple de gestion a été rédigé et soumis à l'approbation de l'administration forestière, la forêt de Kassa Wara pour laquelle le projet reste au stade des réunions préliminaires. L'Institut de Recherche Agronomique pour le Développement (IRAD) a également parrainé une initiative de forêt communautaire à Boboyo dans le Mayo Kani et le projet se situe au niveau des réunions préliminaires. Les principales contraintes évoquées jusqu'ici dans le processus de création de ces forêts communautaires concernent la réticence des populations locales, la législation forestière qui ne prend pas en compte la spécificité écologique de cette partie du pays et la difficile collaboration entre l'administration et les membres de la société civile qui parrainent ces initiatives.

5.2.2.3. Conservation de la biodiversité

Un ensemble d'aires protégées composé de trois parcs nationaux et de plusieurs réserves forestières contribue à la conservation de la biodiversité dans la région. Le plus important des trois parcs de part la superficie et la valeur économique est le parc national de Waza qui s'étend sur environ 1700 km². Créé en 1968, il a été désigné et reconnu par l'UNESCO comme réserve de biosphère en 1982. On y retrouve d'importantes colonies d'oiseaux et la plupart des espèces fauniques africaines comme le lion, les girafes, les éléphants, les cobes de buffon, les damalisques, les hippotragues, les phacochères, les hyènes. L'importance du Parc National de Waza pour la région est certaine non seulement sur le plan touristique, mais également sur le plan de la conservation de la faune et de ses habitats. Les changements climatiques et les interventions humaines intervenues dans la plaine d'inondation du Logone ont conduit à une dégradation des ressources naturelles de ce parc (Mouafo et al., 2002 ; IUCN, 1996). Le Parc national de Kalamaloué est situé au nord de la ville de Kousséri et couvre une superficie de 45 km². On y rencontre des hippopotames, des crocodiles, des varans et plusieurs variétés de singes et d'oiseaux. Le Parc national de Mozogo-Gokoro situé sur le versant Est des monts Mandara est d'une superficie de 1,4 km². C'est une formation forestière qui a été protégée pendant très longtemps contre les activités anthropiques. La végétation ligneuse est composée de très grands arbres sous lesquels vivent des singes et plusieurs variétés de serpent. La plupart des réserves forestières de la région ont été créées sous l'autorité coloniale dans le but de freiner le phénomène de dégradation des ressources ligneuses et contribuer à long terme à la production du bois de feu. On dénombre ainsi une vingtaine de réserves forestières qui couvrent une superficie totale d'environ 20 000 ha dont les plus importantes sont celles de Laf (5000 ha), de Kalfou (4000 ha), Zamay (1000 ha), et de Mayo Louti (2600 ha). Cependant, la création de ces réserves forestières n'a pas toujours été accompagnée d'efforts d'aménagement visant à atteindre les objectifs de conservation ou de production de bois escomptés. Elles connaissent depuis la dernière décennie pour la plupart une intrusion des populations riveraines ou lointaines pour des exploitations agricoles, pastorales ou

l'approvisionnement en bois (Teicheugang, 2000 et Boubaoua, 2001). Au regard des proportions croissantes que prennent ces activités dans les périmètres de réserves forestières, il était important de faire un état des lieux des ressources disponibles, analyser les évolutions survenues au cours du temps et comprendre les facteurs qui déterminent cette pression humaine afin de faire des suggestions allant dans le sens d'une meilleure gestion de ces espaces (chapitre 8).

5.2.3. Zones dénudées et terres incultes

La formation des sols nus est l'un des processus de transformation des paysages les plus visibles par comparaison des images de télédétection. Ce phénomène est une conséquence des défrichements pour la plupart imputables à la surexploitation des terres à des fins agricoles ou pour des besoins d'approvisionnement en bois de feu et de service. Dans la région des monts Mandara, des piémonts et les plaines de Mora, le relief accidenté est un facteur qui influence la dégradation de la végétation à travers les ruissellements qui provoquent l'érosion des sols. Ce processus se traduit finalement par la formation des sols nus, le plus souvent dégradés et appelés hardé en langue peule. Certains de ces sols qui apparaissent hardé dépendent de la pluviométrie car la végétation s'y reconstitue le plus souvent lorsque la pluviométrie est plus importante. Dans l'ensemble de la région, une proportion d'environ 15% des surfaces apparaît dénudées sur les images et correspond dans la plupart des cas à des sols dégradés (ou hardés) non propices à l'agriculture (BONIFICA, 1992). Plus de la moitié (57%) de ces surfaces dénudées se retrouvent dans la partie de la plaine d'inondation du Logone où le paysage est caractérisé par une végétation dominée par une strate herbacée dans le nord et une prédominance de dunes de sable, qui alternent avec les vertisols dans la partie sud. En fonction de leur étendue et de la proximité des zones d'habitation, les zones dénudées sont principalement exploitées comme parc à bétail ou comme zones de parcours du bétail. Les éleveurs apprécient spécialement certains de ces sols hardé à cause des premières repousses herbeuses qui apparaissent dès le retour des pluies. A l'échelle des terroirs villageois de référence, les travaux de cartographie ont montré que certains de ces zones dénudées sont des lieux où s'opère l'expansion agricole récente en réponse aux situations de saturation foncière observées.

5.2.4. Surfaces d'eaux permanentes et zones inondables

La région présente un très faible potentiel en eau de surface, ce qui justifierait le fait que les études hydrologiques se soient le plus souvent orientées sur des problèmes de développement et d'aménagement des retenues pour alimentation en eau. L'ensemble des cours d'eau de la province est constitué principalement des écoulements non permanents communément appelés mayo. Le réseau de cours d'eau permanent est très limité et comprend : le fleuve Logone et son confluent le Chari qui constituent la frontière à l'est avec le Tchad, le Serbouel qui est un affluent du Chari prenant sa source au nord de la ville de Kousséri et l'El beid, un cours d'eau permanent qui prend sa source des eaux de la plaine et fait frontière à l'ouest avec le Nigeria. Les affluents du Logone arrosent la vaste plaine d'inondation du Logone qui reçoit également une grande partie des écoulements des mayos qui proviennent des monts Mandara. Pendant la saison des pluies, les cours d'eau des plaines déversent leurs eaux dans le secteur des dépressions environnantes en y laissant des dépôts argileux. Ces accumulations d'argile constituent des Karals qui s'établissent sur des sables argileux. Ce phénomène s'observe pour le mayo Tsanaga entre Gazawa et Bogo en passant par Maroua, dans le secteur de Dargala-Balaza et au sud de Maroua entre les cours d'eau Tsanaga et Boula. Les eaux permanentes et les zones inondées temporairement,

principalement exploitées pour les activités de pêche, sont concentrées dans la partie la plus septentrionale de la région. Les eaux permanentes sont constituées essentiellement des eaux du lac de Maga qui couvre environ 36 700 ha et des eaux du Lac Tchad qui couvrait environ à 195 500 ha dans le territoire camerounais. Ces superficies incluent les zones de végétations marécageuses environnantes. Les délimitations effectuées à partir d'images Landsat de saison sèche indiquent des superficies plus faibles soit 13 000 ha pour le lac de Maga et 62 800 ha pour les eaux du Lac Tchad. A l'échelle internationale, l'ensemble du lac Tchad a connu une réduction considérable dans le temps. Sa superficie observée en 2004 ne représente plus qu'à peine 10% de celle des années 1960 (Loth, 2004). En dehors de ces deux grands lacs, il existe de très petites retenues d'eau à Mokolo, Fianga et à Moulvoudaye. La pêche s'effectue également dans les mares ou sur une importante partie de l'étendue de la plaine où la présence de l'inondation ne favorise ni les activités agricoles, ni les activités pastorales. En effet, l'installation des canaux de pêche permet de conduire l'eau des crues vers les mares ou vers la plaine et les prises de poissons se font au moment du retrait des eaux. Cette technique de pêche a pris de l'importance au cours des dernières années et le nombre de canaux serait estimé à environ 3000. Un canal ayant une capacité de prise moyenne d'une vingtaine de sacs pesant de 30 à 50 kg chacun (Mvondo et al., 2003). Sur environ 2600 km² de plaine inondable autour de la zone de Waza-Logone, le total des prises a été estimé à 12 000 tonnes, soit une production de 46 kg de poissons frais par ha de zone inondée (Moritz, 1994). La principale saison de pêche s'étend de septembre à février. Le mois de septembre est souvent consacré à l'acquisition des équipements et la pêche proprement dite commence dans la plaine lorsque l'inondation atteint son niveau maximum vers le mois d'octobre. Les moments de pêche les plus intenses se situent entre novembre et décembre lorsque le niveau de l'eau dans les rivières commence à baisser. Après cette période, la pêche continue intensément dans les rivières et dans les canaux jusqu'en février. Pendant la saison sèche, jusqu'en mai, la pêche s'effectue principalement dans le fleuve Logone ou dans les points d'eau qui ne sont pas asséchés. La pêche est pratiquée principalement par les populations Kotoko ou Mousgoum qui ont une longue tradition de pêcheurs et dans une moindre mesure les Massa dont les activités sont plus tournées vers l'agriculture. On compte un peu plus d'une dizaine de milliers de pêcheurs actifs dans la zone.

5.2.5. Interactions entre les différentes formes d'utilisation de l'espace

La description des différentes formes d'utilisation de l'espace a mis en exergue un nombre important d'interactions dans le temps et dans l'espace. Une analyse de ces interactions aux différents niveaux d'organisation permettrait de mieux comprendre les dynamiques en cours et les stratégies des acteurs face aux différentes mutations. La figure 5.3 propose un schéma d'ensemble qui illustre quelques relations de complémentarité (+) ou de compétition (-) entre les différentes formes d'utilisation de l'espace. Une des caractéristiques fondamentales des espaces étudiés est leur caractère multifonctionnel : les mêmes espaces dont les ressources doivent être gérées de façon durable sont en même temps ou successivement utilisés pour la collecte du bois de feu, l'agriculture et l'élevage ou la pêche. La conservation des eaux et des sols est considérée comme une condition préalable pour tous les autres domaines d'activités directement productifs comme l'agriculture, l'élevage, la pêche et l'approvisionnement en bois. Réciproquement, certaines techniques agro forestières peuvent contribuer à la conservation des eaux et des sols. A l'échelle du terroir, le système agraire présente une forte intégration entre agriculture et l'élevage. La jachère est un

lieu de stabulation et d'alimentation du bétail et par conséquent, un parc arboré où dominent des espèces à intérêt fourrager est entretenu sur ces espaces. Inversement, ces espaces reçoivent pendant la période de repos, un apport de fumure animale régulier qui sera valorisé au moment de la mise en culture. A l'échelle de la petite région, l'extension des zones cultivées, en réduisant les espaces de pâturages et les couloirs de transhumances, contribue parfois à la disparition de certaines pistes. On aboutit à une fragmentation des pâturages qui les rend incohérents pour conduire les troupeaux. Le passage des troupeaux dans ces espaces expose ainsi les cultures aux dégâts. Dans la plaine d'inondation par exemple, les troupeaux transhumants arrivent le plus souvent pendant la période de maturation du riz ou de la culture du Muskuwaari. Pendant les années sèches, ils arrivent quelques fois plutôt alors que le sorgho pluvial n'est pas encore récolté. Ces cultures subissent ainsi de nombreux dégâts qui entraînent des conflits avec les agriculteurs sédentaires. Toutefois, le sorgho de contre saison apparaît sous un autre angle comme la culture privilégiée d'association avec l'élevage. Requier-Desjardin (2001) montre qu'elle joue un rôle prédominant dans le financement de l'achat des tourteaux de coton pour le bétail. De plus, on observe une généralisation actuelle des pratiques paysannes en ce qui concerne l'exploitation des résidus de récolte pour assurer une production substantielle d'aliment pour les troupeaux en saison sèche. Cette intégration qui marche assez bien permet un peu de relativiser les problématiques de compétition sur les espaces qui sont régulièrement évoquées.

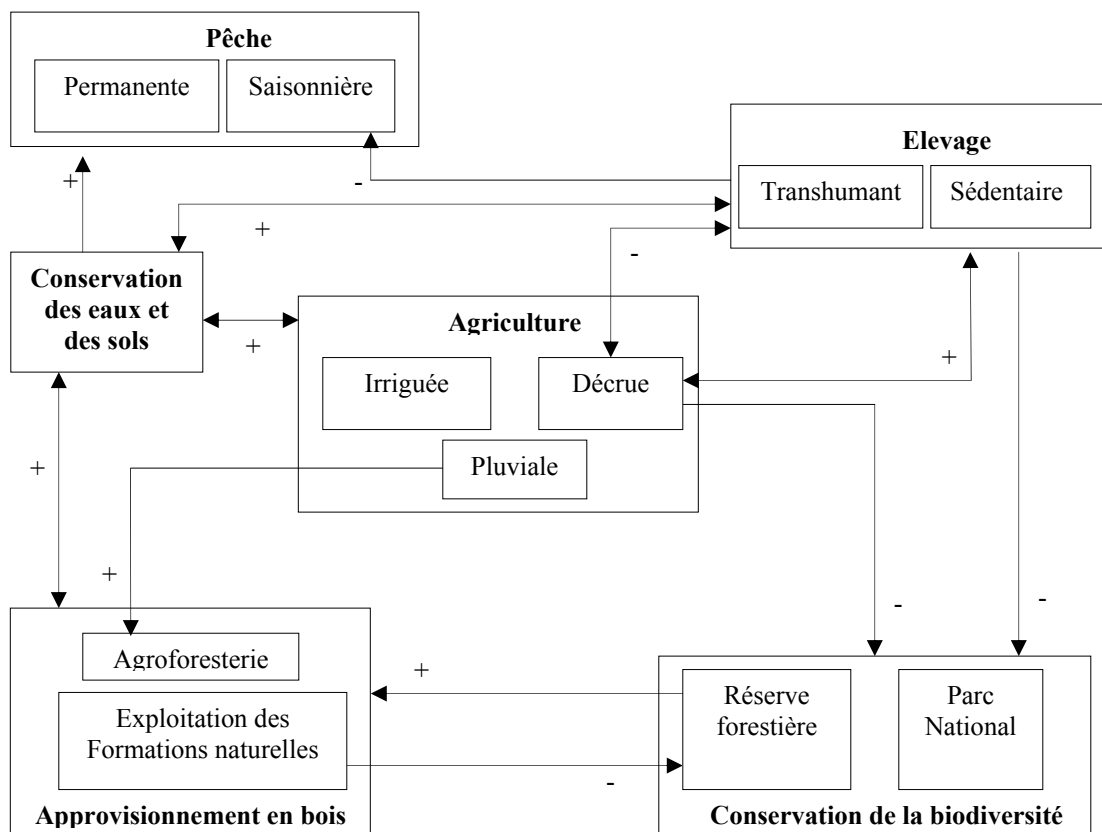


Figure 5.3 : Schéma de synthèse des interactions entre les sous systèmes d'utilisation de l'espace.

Les utilisations agricoles et pastorales de l'espace exercent des pressions très importantes sur les aires protégées. Ces pressions se traduisent par une intrusion des populations dans ces espaces initialement réservés à la conservation de la biodiversité. Ils y installent des champs ou exploitent les ressources naturelles. On a remarqué que les éleveurs transhumants étrangers (Oudah) du fait des taxes qu'ils versent aux autorités locales, utilisent les ressources du pâturage selon des pratiques destructives. De plus en plus, les éleveurs conduisent leurs troupeaux dans les parcs nationaux ou réserves forestières pour brouter et s'abreuver malgré les dispositions réglementaires. Des relations compétitives sont également observées entre les activités de pêche et d'élevage. En effet, au moment où les éleveurs transhumants arrivent dans la plaine d'inondation du Logone, il reste encore une importante quantité de poissons dans les canaux de pêche installés en saison des pluies. Ces canaux se superposent souvent aux pistes à bétail et sont exposés à la destruction lors du passage des animaux. Ce qui a des conséquences sur le niveau de la capture.

Toutefois on assiste à une augmentation de ces canaux du fait des conflits d'appropriation et d'accès aux mares entre groupes de pêcheurs autochtones et migrants. Les conflits liés au système d'appropriation et aux règles d'accès à la ressource halieutique sont amplifiés par la diversité ethnique des populations locales. En effet, les pêcheurs d'origine Kotoko, autochtones de la plaine se considèrent comme propriétaires des mares. L'analyse détaillée des différentes formes d'interaction possibles permettrait en partie de démêler la complexité du système d'utilisation de l'espace et de mieux comprendre les dynamiques agraires en cours dans la région.

5.3. Dynamiques agraires survenues dans chaque zone agroécologique

En plus des interactions entre les composantes du système agraire, un autre élément de complexité du système réside dans la diversité des situations qui se traduit dans les dynamiques agraires survenues dans chaque zone agro écologique de la région d'étude. Dans cette section, les changements survenus dans le système agraire au cours des dernières décennies sont décrits sur la base d'une synthèse des résultats des études réalisées dans la région d'étude. Nous distinguons trois cas correspondant à la diversité des situations agroécologiques de la région notamment : le cas des plaines intérieures, le cas des monts Mandara et le cas de la plaine d'inondation du Logone (figure 5.1).

5.3.1. Cas des plaines de Diamaré/Kaélé et des piémonts

Eléments caractéristiques du système agraire

Les plaines de Diamaré/Kaélé correspondent à différentes situations agraires tels que définies par le zonage agroécologique présenté au chapitre 4 (Dugué et al., 1994). En effet les plaines sont des zones caractérisées par une forte densité de population et une très faible disponibilité en terre. Le système agraire présente une importante intégration entre les activités agricoles et pastorales. Les productions agricoles

sont composées principalement des sorghos, de l'arachide, du niébé (haricot) et du coton. Les cultures maraîchères sont en cours de développement et leur localisation dépend de la proximité des cours d'eau et des conditions du milieu. L'accès au marché est relativement facile du fait de la proximité du principal centre urbain et l'existence d'un réseau de voie de communication assez dense.

Dynamiques agraires observées au cours des dernières décennies

La problématique des dynamiques agraires qui se sont opérées dans les plaines intérieures de la région a été formulée au chapitre 1 de la présente thèse. Les principaux processus sont reliés à la pression démographique et aux flux migratoires qui induisent des pratiques d'utilisation de l'espace qui ne garantissent pas toujours un développement durable. En effet, l'extension agricole qui occupe une place centrale dans les dynamiques a conduit à des défrichements massifs des savanes boisées, une dégradation des sols et une réduction des aires de pâturages. On a abouti dans plusieurs terroirs à une saturation foncière qui se traduit par une faible disponibilité des terres utiles, une réduction des temps de jachère. La rareté des ressources et la faible productivité des espaces qui accompagne ce processus de saturation sont de nature à déboucher sur des conflits d'usage. Des analyses détaillées des dynamiques agraires survenues dans cette zone ne sont pas effectuées dans ce chapitre car elles font l'objet des chapitres 8, 9 et 10. Une étude diachronique de l'occupation du sol à partir des images satellites d'archive et récentes a été menée sur une zone de référence qui est représentative de ces situations agraires (chapitre 8). L'analyse des changements et l'exploration des facteurs déterminants les dynamiques observées permettent de caractériser la structure des systèmes d'utilisation de l'espace et explorer les trajectoires d'évolution des changements dans un avenir proche (chapitres 9 et 10).

5.3.2. Cas des monts Mandara

Eléments caractéristiques du système agricole des monts Mandara

La région des monts Mandara est une unité géographique dont le paysage est constitué d'un ensemble de montagnes dont les plus élevées atteignent une altitude de 1 500 m, créant ainsi le contraste avec les zones de piémonts et les plaines environnantes. Le relief non uniforme combiné à la nature des sols de cette région généralement sableux n'offre pas des conditions naturelles très favorables aux activités agricoles et pastorales du fait de la faible capacité de rétention en eau de ces sites. Toutefois le niveau des pluies annuelles reste le plus élevé de toute la région. Malgré les très fortes densités humaines rencontrées, les populations constituées en majorité de l'ethnie Mafa ont su maintenir au cours du temps un système agricole assez original qui repose sur les cultures en terrasses, une gestion agroforestière autorisant une gamme variée d'association culturale et d'espèces ligneuses et une gestion efficace des nutriments et des matières organiques qui permettent aux sols de maintenir une certaine qualité (De Groot, 1999). Les principales productions agricoles sont le sorgho pluvial et le mil, pratiquées en rotation d'une année à l'autre, le plus souvent en association avec une variété d'autres cultures (l'arachide, le niébé ou haricot, le riz irrigué, le piment etc.). La pratique de la jachère est quasi inexistante et le système de culture est permanent. L'alimentation du bétail est assurée en saison de récolte dans les champs à partir des résidus et les crottes sont traitées et appliquées comme fumier dans les champs. Les travaux de recherche sur cette zone tendent à s'accorder sur le fait que les processus de migrations avec leur corollaire de pression humaine sur les ressources naturelles ont fortement déterminé les transformations survenues dans le

système agraire de cette région depuis la période pré coloniale jusqu'aux dernières années. Les paragraphes suivants décrivent les phases successives d'évolution du système agraire en faisant référence aux théories de Boserup (1965) et de Malthus.

Phase 1 : une intensification du système agraire héritée de l'histoire

La littérature n'est pas très explicite sur le stade initial du paysage et du système agraire dans la région des monts Mandara. Toutefois, certaines sources orales révèlent que cette zone aurait été dominée auparavant par de nombreuses formations forestières. Le paysage actuel caractérisé par une végétation anthropique à des stades plus ou moins avancés de dégradation ne présente les témoins de formations climaciques qu'au niveau des taxons (Fotius, dans Seignobos et Iyébi-Mandjeck., 2000). Les piémonts voisins n'étaient cultivés que très sporadiquement au temps des guerres tribales et de l'hégémonie peule au 19^{ème} siècle. La forte occupation de cet espace ne s'est amorcée qu'après l'installation de la paix. Pour mieux comprendre les circonstances des transformations du paysage agraire des montagnes, il faut rappeler le contexte de guerres tribales et de conquêtes successives. En effet, les montagnes ont à différentes périodes antérieures à l'arrivée des conquérants peuls, joué le rôle de refuge pour les populations venues de la plaine. Les charges démographiques de ces zones augmentant et donc les besoins alimentaires aussi, la nécessité de capitaliser sur la croissance démographique a incité à mettre en place un système agraire performant. La base de cet agrosystème était donc les terrasses et comprenait entre autre les sorghos adaptés aux sols des montagnes (lithosols), une production importante des légumineuses comme le niébé et l'élaboration quasi systématique des parcs à *Faidherbia albida* qui permettent de combler le déficit en azote des sols de piémont (Seignobos et Iyébi-Mandjeck, 2000), et la reconversion d'un élevage bovin libre en celui de bœufs de case. Ces innovations peuvent être considérées comme une transition au sens de Boserup, mais les charges démographiques observées sont restées très élevées par rapport à la production, ne garantissant pas assez des revenus par paysan.

Phase 2 : le processus de migrations saisonnières et ses conséquences

Avant l'avènement du coton dans les montagnes, les revenus n'étaient pas suffisants pour satisfaire les besoins de base et la production vivrière était insuffisante en périodes difficiles. Les migrations saisonnières organisées en réponse à ces insuffisances ont considérablement augmenté au cours des dernières décennies compte tenu des besoins importants et des facilités offertes par la mise en place des infrastructures et d'un important réseau social. Elles concerneraient près de 50% des chefs de ménages (Zuiderwijk, 1998). Ces migrations se déroulant généralement en saison sèche impliquent que les paysans concernés sont absents du terroir à une période où s'effectuent les travaux d'aménagement des terrasses et de gestion de la fumure. En ce sens, ce processus de migrations saisonnières est considéré comme une cause de la baisse de la fertilité des sols et donc une menace à la durabilité de ce système agraire basée sur les cultures en terrasse. Ces migrations saisonnières ont entraîné à moyen terme la dégradation des sols, qui s'est traduite par une réduction des rendements, obligeant ainsi les populations à migrer de façon plus massive et systématique vers les plaines et les grandes villes (trajectoire malthusienne).

Phase 3 : les migrations définitives vers les plaines et les changements survenus dans le système agraire

L'installation des populations Mafa dans les plaines voisines comme à Koza a entraîné des mutations importantes du système agraire. La pression démographique et les pratiques culturelles ont contribué à la dégradation des sols. En effet, l'absence de jachère a été induite par une forte densité de population et l'utilisation des charrettes pour le labour attaque les couches profondes du sol et les expose ainsi à l'érosion. Le système agraire dans les plaines environnantes est passé d'une agriculture extensive avec des longues périodes de jachère à une situation de saturation de l'espace où la pratique de la jachère est devenue impossible comme dans les montagnes. Quelques indicateurs de cette saturation sont : la superficie moyenne par ménage est quasiment devenue la même qu'en montagne (8 ha), et la quantité de travail à l'hectare plus importante (69 contre 46 jours) alors que le revenu moyen par ménage est inférieur à celui observé dans les montagnes (Zuiderwijk, 1998). L'absence de fumure et de mesures de conservation des sols est une contrainte qui a accentué la dégradation des sols. Dans ces conditions, l'augmentation de la quantité de travail n'était pas une condition suffisante pour satisfaire les besoins grandissant de la population car cette stratégie trouve vite ses limites du fait des faibles potentialités du milieu. La forte dépendance des paysans montagnards des migrations (saisonniers et de plus en plus définitives) et le clivage social grandissant créés principalement par les rentes foncières pratiquées dans les plaines voisines sont deux facteurs qui confirment l'hypothèse d'une évolution du système agraire au sens de Malthus. Toutefois des signes d'intensification agricole ont été observés dans les plaines voisines, se traduisant par l'investissement effectué par les paysans les plus riches pour la production de l'oignon irrigué. Cet investissement concerne non seulement l'achat de la terre mais également des innovations en terme de technique d'irrigation, de labour et de fertilisation. Cette filière est en cours d'expansion et de plus en plus de paysans y investissent les revenus provenant d'autres activités mais son développement effectif nécessite un appui technique et organisationnel aux producteurs.

Phase 4 : les mutations récentes et les perspectives d'un système agraire durable dans les montagnes

Les revenus provenant des activités agricoles et pastorales seraient plus importants dans les montagnes que dans les plaines voisines (Zuiderwijk, 1998). Compte tenu des avantages comparatifs en ce qui concerne en particulier la productivité agricole et le revenu des populations, le retour en montagne de ces populations ne semblait pas être une mauvaise option mais elle était contrainte par la faible disponibilité en eau (DeGroot, 1999). Ainsi, les actions liées à la création et l'aménagement des points d'eau mis en place dans la région par les différents projets de développement ont eu des impacts appréciables sur la qualité de vie des populations des montagnes. Les migrations saisonnières ne permettant pas toujours de subvenir à l'essentiel des besoins économiques, l'introduction de la culture du coton dans les montagnes est également venue comme une réponse à ce besoin économique. La culture du coton a commencé dans les montagnes dans les années 1993 et semble avoir pris de l'importance au cours des dernières années. Les données concernant les producteurs montrent que plus de la moitié reste en relation avec les plaines voisines soit parce qu'ils y habitent, soit parce qu'ils y disposent d'autres champs (Ndoum Mbeyo'o 2000). Le succès de l'expansion de cette culture de rente dans les montagnes est d'abord lié au besoin d'accumulation des revenus mais a bénéficié du contexte du moment caractérisé par la baisse de la productivité et de l'abandon du mil et la réduction des opportunités liées aux migrations saisonnières. Le coton a donc commencé très récemment à jouer un rôle important dans le système agraire des montagnes mais une question importante concernant les évolutions futures concerne la durabilité de ce système,

compte tenu des pratiques de production qui ont des impacts négatifs sur l'environnement et notamment la dégradation des sols (Njomaha, 2001).

5.3.3. Cas de la plaine d'inondation du Logone

Eléments caractéristiques du système agraire de la plaine du Logone

La plaine du Logone est un écosystème qui dépend fortement de l'inondation annuelle causée par les eaux de débordement du fleuve Logone et les crues des tributaires des monts Mandara qui durent près de cinq mois chaque année (entre août et décembre). Elle présente des conditions du milieu favorables à l'évolution des poissons et à la repousse des pâturages en saison sèche. La grande diversité des communautés vivant dans la plaine dépend de l'eau et des ressources naturelles qui sont utilisées pour l'agriculture, la pêche et l'élevage. Trois systèmes d'utilisation agricole de l'espace coexistent dans cette région : l'agriculture pluviale (sorgho, riz flottant), l'agriculture de décrue (cultures maraîchères, maïs, Muskuwaari) et l'agriculture irriguée (riz). Cet écosystème a connu de nombreux changements environnementaux suite à la construction du barrage de Maga dans le cadre d'un projet de riziculture irriguée (IUCN, 1996 ; Scholte et al., 1996 ; Scholte 2005). On peut distinguer à partir de ce repère, quatre principales phases dans la trajectoire suivie par le système agraire.

Phase 1 : Avant les aménagements hydroagricoles

De nombreuses études consacrées aux changements climatiques en Afrique sahélienne soutiennent que cette région a subi les conditions climatiques difficiles et continues des années 70 comme les autres régions sèches (Suchel, 1972). Au cours des décennies 70 et 80, la sécheresse au Sahel s'est caractérisée par un bilan pluviométrique très déficitaire avec une persistance d'années sèches (71-73 et 81-85) ayant de nombreuses conséquences sur l'ensemble du système agraire. Ces sécheresses en détruisant la couverture ligneuse, interdisant la mise en culture des champs de sorgho de contre saison, limitant celle du niébé et réduisant de façon générale les productions sous pluie dans la région de la plaine d'inondation, ont amené par exemple des groupes de populations d'arabes Showa à inverser leur pôle d'habitat. En effet, les campements d'éleveurs du lac avaient tendance à se substituer aux villages et les anciens villages devenaient des campements d'éleveurs situés sur les pâturages de saison de pluies (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000). La plaine d'inondation est un milieu très propice à la culture du riz et c'est ainsi que l'administration coloniale a encouragé cette culture depuis les années 50. La première initiative allant dans ce sens est la création d'une station expérimentale à Pouss en 1950, suivi en 1954 d'une ferme privée de 700 hectares et de la Société Rizicole du Logone. Le SEMRY (Secteur Expérimental de Modernisation de la Riziculture de Yagoua) qui voit le jour la même année met au point un système de riziculture inondée associée à des aménagements hydrauliques sommaires (digues et casiers rizicoles). Dans les zones de Pouss, Guirvidig, à l'est du Parc National de Waza, dans les bas-fonds inondables de Moulvoudaye et les dépressions interdunaires des pays Toupouri, la riziculture est pratiquée sans contrôle de l'inondation et le labour s'effectuant avec la houe. Jusqu'en 1973 le SEMRY contrôle près de 7 000 hectares de rizières dont seulement 40% sont aménagées, protégées contre les excès d'inondation et labourées avec les tracteurs (Roupsard, 1987). Avec une production d'environ 5 000 tonnes qui représentait un peu moins de la moitié des besoins, le système se trouvait dans une situation de blocage étant donné que la configuration technique ne permettait pas d'accroître les surfaces ou la production pour satisfaire l'importante demande.

Les rizières étant traditionnellement aménagées, il y avait une réticence des populations à accroître la part du riz dans leur agrosystème. Il était donc nécessaire de faire passer le système à une phase plus intensive en réalisant des aménagements hydroagricoles importants.

Phase 2 : Les changements agraires et les perturbations du système agraire

L'intensification du système de production rizicole est marquée par les projets successifs SEMRY-I, SEMRY-II, SEMRY-III qui mettent en place un système assez performant pour la maîtrise de l'eau et l'organisation de la filière de production et de commercialisation du riz. Le SEMRY-I localisé dans la partie sud, entre Yagoua et Djafga a permis avant les années 80, d'effectuer un accroissement considérable de la production grâce à une augmentation des rendements entre 4 à 5 t/ha, une multiplication des casiers et la pratique de la double récolte. Le très grand projet SEMRY-II visant l'aménagement de plus de 6 000 ha de rizières dans la zone de Maga était une conséquence de la réussite du SEMRY-I et a donné lieu à la création du long barrage de 27 km entre Pouss et Guirvidig, créant ainsi la retenue de Maga au sud et les casiers rizicoles au nord. Cet aménagement a provoqué d'importants mouvements de populations pour servir de main d'œuvre mais les résultats obtenus restent très controversés dans la mesure où la zone a connu à partir du début des années 80 une importante dégradation des ressources naturelles.

Une étude basée sur l'analyse des données spatiales, des données de terrain ainsi que sur les premiers résultats du programme de réhabilitation engagé depuis 1994 sous la supervision de l'IUCN et le World Wildlife Fund, a permis de mettre en évidence les effets néfastes des paroxysmes climatiques et de la poussée démographique qui ont accru la pression sur les ressources naturelles (Mouafo et al., 2002). Toutefois, cette étude montre que la dégradation des ressources observée est principalement imputable aux effets inattendus ou indésirables des aménagements hydrologiques (construction du barrage et des digues) comme la baisse dramatique du niveau des inondations. Deux cartes de l'occupation du sol ont été produites en exploitant une image Landsat MSS acquise en 1975 avant la construction du barrage et une image Landsat TM acquise en 1984 après la construction du barrage (figure 5.4). La comparaison de ces cartes met en exergue les changements survenus au cours de cette période notamment, la réduction des zones inondées, l'installation des différents périmètres rizicoles, l'apparition du lac et des retenues d'eau environnantes sur des espaces auparavant utilisés pour la culture du sorgho de contre saison. Les zones sèches constituées principalement de sols nus sont en extension dans l'ensemble de la zone.

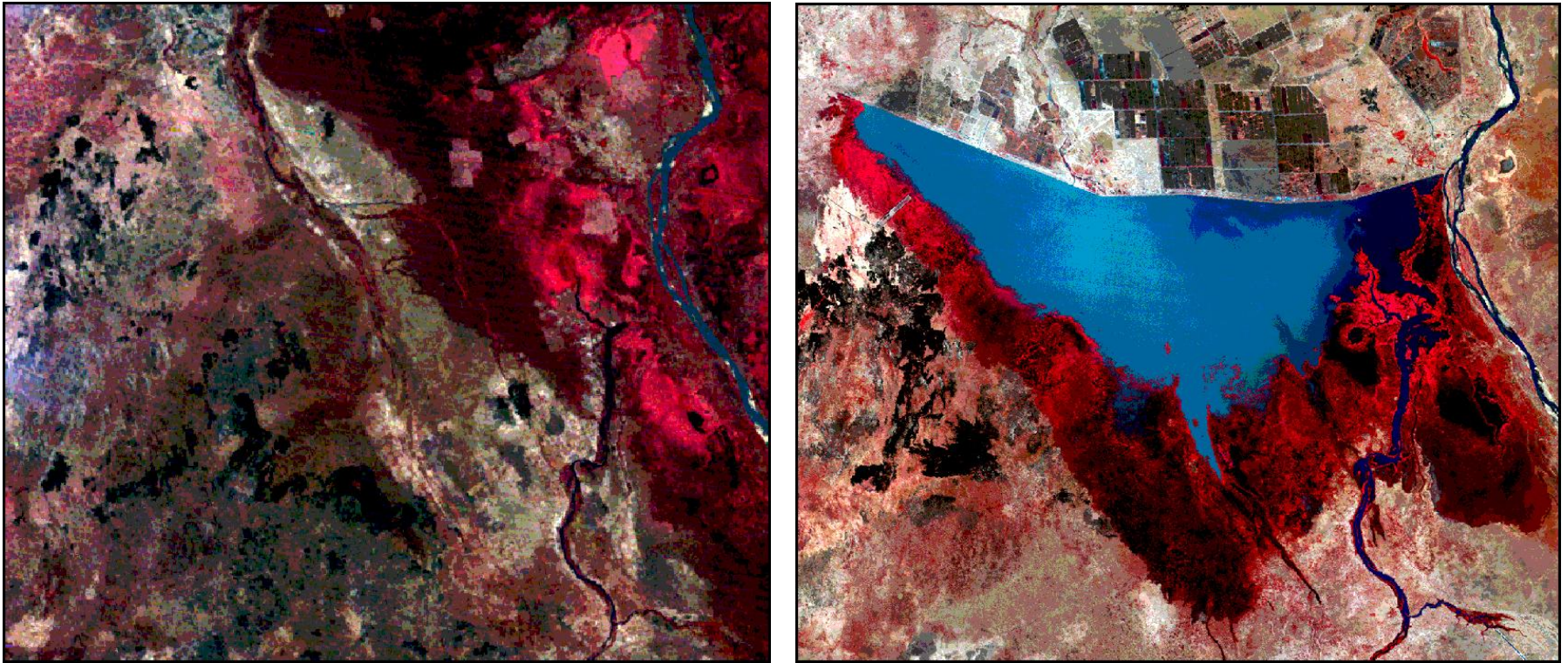


Figure 5.4 : Image Landsat MSS de 1975 (à gauche) et Landsat TM de 1984 (à droite) sur la zone d'installation du barrage de Maga long de 27 km. *Le lac a remplacé de nombreux champs cultivés en sorgho de contre saison. Les zones en aval du barrage se sont asséchées (blanc) et les casiers rizicoles de Guirvidig, Maga et Pouss apparaissent avec des formes géométriques remarquables. Les zones de savanes boisées, arbustives ou herbacées de type marécageux (rouge) sont concentrées essentiellement autour du lac. Les espaces au sud du lac ne peuvent être alloués au sorgho de contre saison à cause de l'importante quantité d'eau qui y reste et se retire très tardivement.*

La perturbation du régime hydrologique a profondément affecté l'environnement et les systèmes d'utilisation ou de mise en valeur de l'espace. Les surfaces inondées auraient diminué d'environ 60% contribuant à une diminution de la recharge de la nappe phréatique (Drijver et al., 1992). Ce facteur déterminant a déclenché un processus de dégradation caractérisé par une diminution de la productivité des pâturages, une réduction de la production des poissons, une baisse importante de la production du riz flottant et des cultures de décrue et une diminution de la capacité d'accueil de la faune sauvage. Compte tenu de l'assèchement de la plaine du à la rétention des eaux par le lac, la culture du sorgho de contre saison autre fois pratiquée à la suite du riz flottant pratiqué en saison de pluie a considérablement été abandonnée. La production du riz flottant a également considérablement baissé suite à la construction du barrage dans la mesure où la plaine a été privée des limons et minéraux qui jouent un rôle important sur la fertilité des sols du fait de la rétention des eaux dans le lac de Maga. Ceci a également eu des conséquences non seulement sur la productivité des terres cultivées, mais aussi sur celle des pâturages en aval. En effet, avec une diminution des inondations naturelles on a assisté à des changements dans la composition de la végétation se traduisant par une diminution du couvert herbacé, et un développement plus important des graminées annuelles. On est parvenu à une réduction importante de la faune sauvage et du cheptel due non seulement à la pauvreté des pâturages, mais aussi au manque de ressources en eau. Le nombre d'éleveurs transhumants arrivant dans la zone en saison sèche (novembre) a considérablement diminué (Scholte et al., 1996). Toutes ces dynamiques se traduisant par la pauvreté et les déplacements des populations, la nécessité de restaurer ou réhabiliter le système se faisait sentir.

Phase 3 : Le programme de réhabilitation pilote de la plaine

Le projet Waza-Logone mis en place en 1992 faisait suite à ce constat et avait pour objet de réaliser les actions d'un plan de réhabilitation dont la finalité était le renforcement à long terme de la diversité biologique de la région et une amélioration de la qualité de vie des populations. Les études menées par le projet Waza-Logone ont abouti à un programme de réinondation, à partir des eaux de crues du Logone et du Lac Maga dans les zones rizicoles (SEMRY II). Des épandages pilotes des eaux ont eu lieu en 1994 sur le Petit Goroma (20 à 30 m³/s) et en 1997 sur l'Aréitékéké (jusqu'à 10 m³/s). Environ 30 000 ha ont pu être réinondés (IUCN, 1996). Ce programme d'inondation pilote a entraîné des changements importants sur le plan écologique et social dans les zones nouvellement inondées. Dans les zones concernées par cet essai, on assiste à de nouvelles transformations allant dans le sens de la restauration des ressources productives de l'écosystème et qui induit, l'arrivée de populations et le développement d'activités liées à l'exploitation de ces ressources telles que l'élevage, la pêche, et l'agriculture. Sur le plan écologique, les changements concernent l'ensemble des ressources naturelles notamment la végétation, les sols, les poissons, les pâturages, etc. Les études sur le suivi de la végétation montrent que le nombre d'espèces pérennes, importante dans l'alimentation des animaux du fait de leur possibilité de régénération en saison sèche, augmente avec le niveau et la durée de l'inondation. De plus, une corrélation a été établie entre l'humidité du sol dans l'horizon superficiel, le niveau des repousses et la productivité globale des pâturages (Mvondo et al., 2003). Une évaluation des impacts du programme pilote de réinondation de la plaine peut être

effectuée en utilisant des images récentes de très haute résolution. L'acquisition de ces images de la plaine en saison sèche et pluvieuse permettrait de suivre les résultats du processus de réinondation engagé dans la région en 1994 et en 1997. Les changements observés dans la végétation portent à croire qu'une inondation à grande échelle contribuerait à une réhabilitation effective de l'ensemble de l'écosystème. Dans cette perspective, on peut assister à un retour plus important des populations. On pourra dans ce cas s'attendre à une forte dynamique de l'utilisation de l'espace impulsée par la croissance démographique. Il est donc nécessaire de se doter des outils et des méthodes pour évaluer explicitement les changements qui vont survenir afin de mieux comprendre le fonctionnement de cet écosystème.

5.4. Hypothèse sur les facteurs déterminant les changements d'utilisation de l'espace

Dans cette section, les hypothèses sur les facteurs qui déterminent les changements d'utilisation de l'espace observés dans la région d'étude sont formulées. Nous distinguons d'une part les facteurs biophysiques qui concernent le climat, le relief ou les potentialités des sols, et d'autre part les facteurs humains qui regroupent les facteurs d'ordre socio-économiques ou politiques. L'ensemble de ces facteurs présente un réseau complexe d'interaction entre eux et avec la structure et les changements d'utilisation de l'espace (figure 5.5). La relation entre chacun de ces facteurs et l'utilisation de l'espace est analysée afin de comprendre comment elle se traduit dans les processus de changements. Ce travail fournit des informations et connaissances pour sélectionner facilement les meilleurs candidats de facteurs qui se combinent pour influencer la dynamique d'une utilisation spécifique de l'espace.

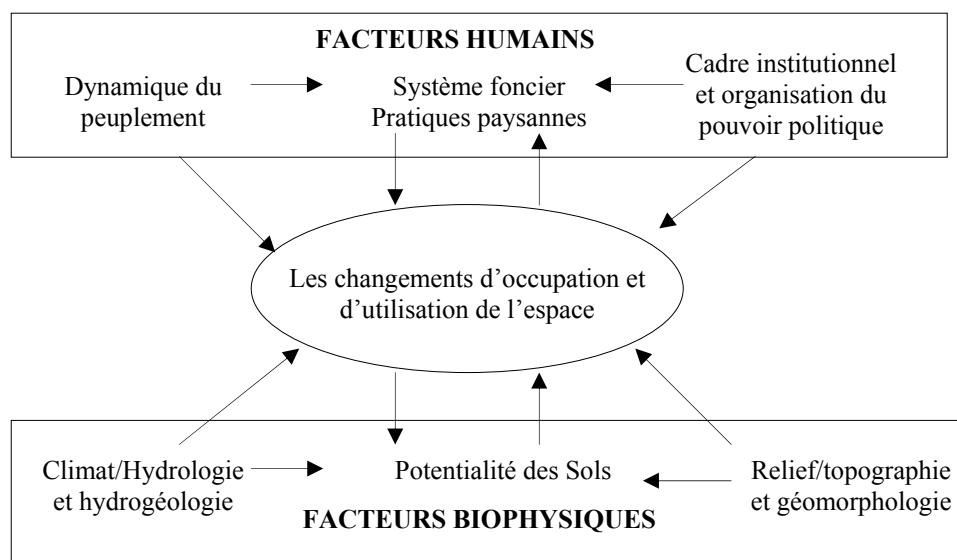


Figure 5.5 : Interaction entre les potentiels facteurs déterminant les changements dans l'utilisation de l'espace.

5.4.1. Facteurs biophysiques

5.4.1.1. Climat et ressources en eau

Le climat a une influence certaine sur la disponibilité et la distribution des ressources en eau nécessaires au développement des différentes activités agricoles ou pastorales. La réussite d'une campagne agricole par exemple sera déterminée non seulement par la quantité totale de pluie enregistrée, mais surtout par la répartition de celle-ci dans le temps. Pour le coton et les autres cultures pluviales, les pluies de début de saison (avril et mai) jouent un rôle très important car elles donnent le temps aux paysans d'installer les cultures le plus tôt possible en juin et de pouvoir libérer ainsi le temps pour l'entretien en début juillet. Pour la culture du sorgho de contre saison (Muskwuaari), en cas de pluies insuffisantes en septembre nécessaire à humecter et maintenir l'humidité dans les vertisols, on peut s'attendre à une mauvaise campagne. La charge en eau du karal serait plus déterminée par les pluies de septembre et octobre que par celles des mois précédents ou le cumul des pluies de la saison. De plus, on observe le plus souvent des campagnes où les fortes pluies d'août causent des inondations importantes et dévastent les cultures. Les paysans surpris par la saison sèche et dépourvus de plants n'arrivent pas à repiquer d'importantes surfaces de karal. La variabilité spatiale et temporelle de la pluviométrie est perceptible à l'échelle régionale et peut contribuer à expliquer la répartition et les changements dans l'utilisation de l'espace (figure 5.6a). A la différence des zones de plaines autour de Maroua, les zones à proximité ou dans la région des monts Mandara (Koza, Hina, Mokong, Zongoya) sont les mieux arrosées en début de campagne. Les moyennes annuelles de précipitation des décennies 70 et 80, partout inférieures à la moyenne des précipitations sur les 5 dernières décennies traduisent les sécheresses qui ont traversé la région à cette période (Beauvilain, 1995). On a assisté à une augmentation généralisée de la pluviométrie seulement au début de la décennie 90 (SODECOTON, 2001). Les ressources en eau souterraine exploitées pour l'approvisionnement en eau potable et l'abreuvement du bétail sont très limitées dans l'ensemble. Toutefois, elles présentent de meilleures potentialités dans la cuvette du lac Tchad et dans le delta du Chari où la profondeur des nappes varient de 0 à 30 m et atteignent 45 m par endroit. La partie ouest de la région, de Maroua aux monts Mandara et de Maroua vers la pédiplaine de Kaélé possède des ressources en eaux souterraines très limitées. Le déficit en eau est la raison principale évoquée par les populations de montagnes qui migrent vers les plaines. Les trois dernières décennies ont été jalonnées par le développement et la mise en place de diverses stratégies pour capter et retenir l'eau dans la région des monts Mandara : construction de biefs, barrages ou autres ouvrages traditionnels permettant d'alimenter les puits et forages. Entre le début des années 80 à nos jours un peu plus de 4 000 biefs ont été réalisées par les projets de développement et ONG travaillant dans la région et les observations ponctuelles amènent à croire que ces actions ont également un impact positif sur l'environnement, notamment en terme de reprise de la végétation autour des zones d'implantation de ces ouvrages.

5.4.1.2. Potentialités des sols

Les caractéristiques physiques des sols et leurs propriétés chimiques ont permis de les classer en niveaux de potentialité qui déterminent leur sollicitation pour les différentes activités agricoles (Brabant et Gavaud, 1985). Les meilleurs sols à usage agricole sont localisés principalement dans les plaines et correspondent en majorité aux sols sur alluvions et aux vertisols ou argiles noires (figure 5.6c). En effet, les alluvions déposées en bandes plus ou moins larges le long des grandes rivières, fixent à peu près tous les éléments fertilisants du sol. Ces terres alluviales sableuses à sablo-argileuses, très profondes et sur terrain plat sont très aptes pour toutes les cultures (culture pluviale, maraîchage, décrue et cultures irriguées). Les vertisols quant à eux ont une très bonne capacité de rétention des éléments fertilisants, faisant de ce type de sols, l'un des plus riches des plaines. Ces terres argileuses généralement peu profondes sont très aptes uniquement pour les cultures de décrue (de contre saison) qui s'accommodent bien à leurs propriétés vertisoliques et tirent profit de leur très bonne capacité de rétention en eau. Les premières expériences de culture du coton sur les vertisols ont vite montré que la culture ne supportait pas le niveau d'engorgement. Seul le riz peut être cultivé en saison des pluies sur ces sols, mais ceci nécessite une bonne maîtrise de l'eau. Les sols de qualité intermédiaire regroupent les sols hydromorphes sur les terres alluviales exondées et très profondes ou longuement inondées. Ces sols ont une aptitude comprise entre moyenne et élevée pour l'un des systèmes de production (pluvial ou irrigué) et une aptitude marginale pour l'autre. Les sols qui possèdent les plus faibles potentialités agricoles correspondent aux terres marginales ou inaptes pour l'un ou l'autre des systèmes de production. Les sols d'aptitude marginale sont des terres très compactes à faible profondeur ou des terres très sableuses et très profondes. Elles ont de très faibles réserves en eau et présentent un risque très élevé d'érosion. Celles qui sont compactes sont souvent sous forme de sols hardé (forme dégradée d'un vertisol) et peuvent être utilisées pour la culture du sorgho de contre saison par aménageant des diguettes. Celles qui sont très sableuses peuvent par contre être mises en valeur avec des cultures pluviales mais pour un rendement espéré très faible. Les sols classés inaptes correspondent principalement aux terres squelettiques et caillouteuses ou très sableuses et bien drainées sur terrain en forte pente. Le risque d'érosion est élevé mais les paysans des monts Mandara ont su développer des cultures vivrières en aménageant des terrasses sur certains de ces sols (sols régosoliques sableux).

5.4.1.3. Relief et géomorphologie

Le paysage de la région de l'Extrême Nord présente deux grands ensembles de reliefs séparés par un grand cordon dunaire qui s'étend sur une longueur de 180 km suivant la direction SE-NO entre les villes de Yagoua et Limani. Au nord de la zone dunaire, s'étend la cuvette tchadienne qui est une vaste plaine quasiment uniforme. En se déplaçant de la dune vers le fleuve Logone, on note d'abord les plaines internes exondées qui se situent entre Yagoua et Waza et dont l'altitude varie entre 300 et 320 m (figure 5.6b). Les plaines d'inondation du Logone, encore appelés Yaérés, situées plus au nord sont relativement planes. Au sud de la dune, le paysage présente par contre un très grand contraste topographique sur une très courte distance. Des monts Mandara jusqu'à la dune, on distingue le domaine montagneux minéral qui est relié aux plaines par l'intermédiaire d'une zone de transition constituée de pédiments et de glacis (piémonts). Dans l'ensemble de la région, l'érosion a des conséquences certaines sur les qualités des sols qui peuvent être limitant pour les usages agricoles. En zone montagneuse les pentes favorisent l'érosion alors que la pente générale faiblit brutalement au niveau des plateaux où les risques d'érosion sont amoindris.

Toutefois, la topographie mouvementée dans le détail et la faible cohésion des sols sont de nature à affecter la sensibilité de ces zones à l'érosion. Les populations de montagnes ont ainsi développé au cours du temps, une tradition d'aménagement au moyen de terrasses en pierres jointives. Les piémonts, sur pentes faibles mais régulières sont également très exposés à l'érosion qui s'effectue d'abord en nappes et peut parfois s'aggraver de ravines. Dans les plaines, les pentes sont moins fortes et l'érosion moins violente, et ainsi les produits de l'altération sont faiblement mobilisés. Les sols sont par conséquent plus profonds et à priori plus favorables aux activités agricoles qu'en montagne. Toutefois, l'effet de l'érosion n'est pas nul car une grande partie des plaines (la pénéplaine sur socle) est affectée par l'érosion. Sur les plaines rocheuses, les défrichements et les pratiques culturales augmentent les risques d'érosion. Sur les plaines sédimentaires, les berges alluviales qui présentent les sols les plus riches de la région sont convoitées par les agriculteurs mais, l'érosion suite au recul des berges même sur de faibles pentes, entraîne la destruction des champs. Contrairement aux populations de montagne, les agriculteurs de plaine mettent en place quelques techniques anti-érosives mais sont en général désarmées face à ces différentes formes d'érosion.

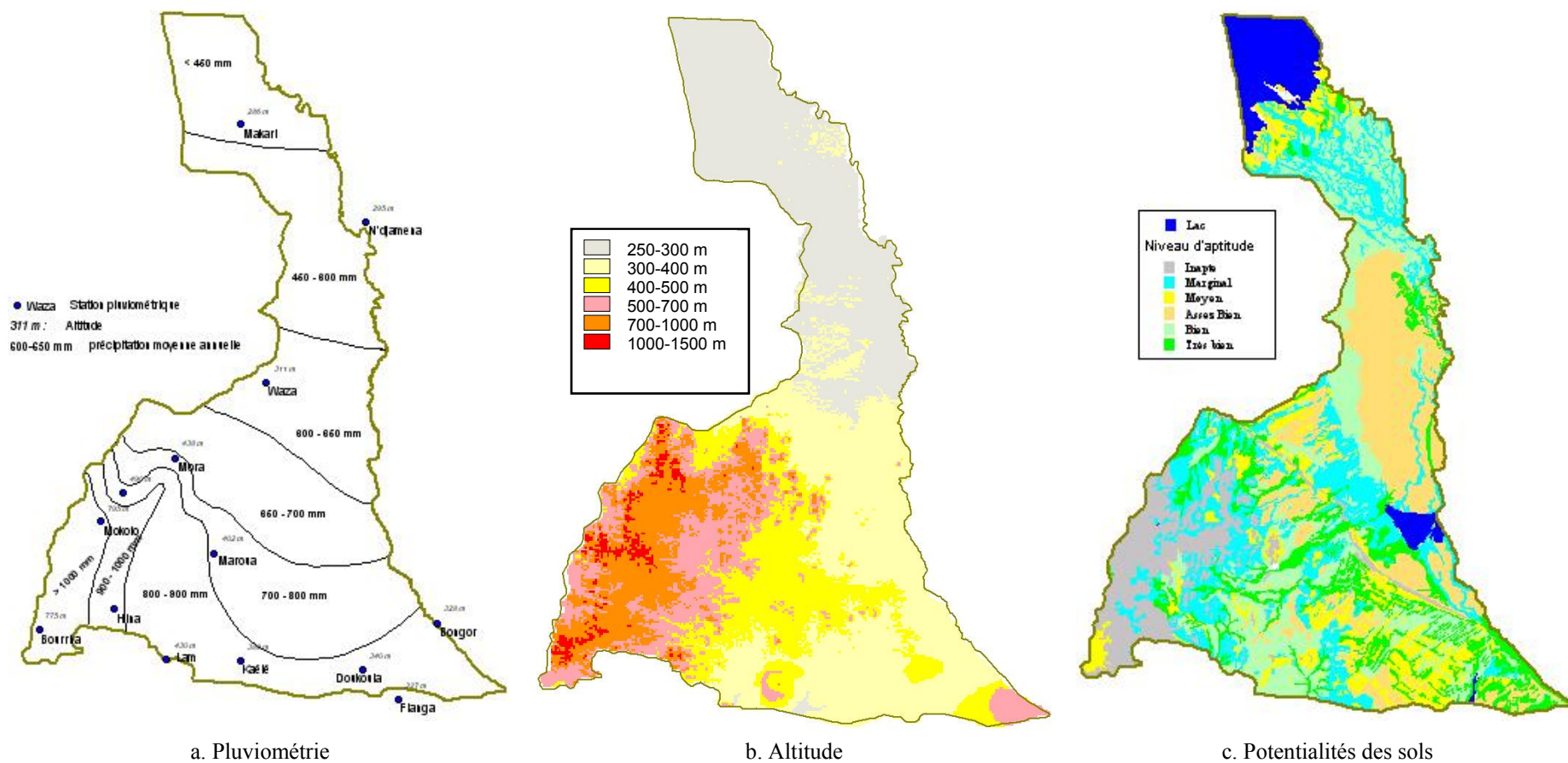


Figure 5.6 : Cartes de quelques facteurs déterminants d'ordre biophysique : pluviométrie, altitude et potentialités des sols.

5.4.2. Facteurs humains

Les facteurs humains ou socio-économiques et politiques sont ceux qui influencent les changements d'utilisation de l'espace sous l'action de l'homme : ce sont les facteurs socio-démographiques, les attitudes et les valeurs, les facteurs économiques tels que le niveau technologique, le système de marché, d'échange ou de propriété, et les facteurs politiques tels que le cadre institutionnel et l'organisation du pouvoir politique.

5.4.2.1. Les facteurs socio-démographiques

Les zones de savane de l'Extrême Nord du Cameroun se distinguent particulièrement par des très fortes densités de population qui varient dans l'espace et au cours du temps sous l'effet d'importants mouvements migratoires. De plus cette population est caractérisée par une importante diversité ethnique qui détermine les modes d'utilisation de l'espace. La spécificité de la dynamique du peuplement humain de cette région fait de ce facteur une entrée pertinente pour explorer les causes potentielles des changements observés dans l'utilisation de l'espace.

Densités de population et répartition ethnique

Les densités de population calculées à l'échelle des arrondissements sont très variées. A côté des zones très densément peuplées (plus de 150hab/km²) comme les zones urbaines de Maroua, Kousséri et Yagoua, les pays Mafa dans les monts Mandara et les pays Toupouri (Datchéka et Tchatabali), on a des zones à très faible densité comme Hilé Alifa et Kalfou et des zones qui restent encore presque vides comme Waza et Logone Birni (5 hab/km²) dans la plaine d'inondation (figure 5.7a). L'évolution démographique des communautés villageoises se projette dans l'espace dans la mesure où l'accroissement des ménages et de leur taille impose un réajustement permanent du système foncier, nécessite de nouvelles attributions de terres, le morcellement des parcelles et l'affirmation des droits nouveaux qui modifient l'emprise des unités de production (Pellissier, 1995). La région compte un peu plus d'une quarantaine d'ethnies différentes parmi lesquelles une quinzaine est représentative. L'aire d'extension des principaux groupes ethniques peut être localisées sur une carte avec plus ou moins de précision (figure 5.7b). Les populations *Toupouri*, *Mundang* et *Guiziga* occupent principalement la pédiplaine de Kaélé. Les *Fulbé* se sont installés principalement dans la plaine du Diamaré où ils ont conquis les populations autochtones (*Guiziga*) en occupant les terres les plus fertiles et les plus accessibles. Les *Mafa*, *Mofou*, *Mandara* et *Kapsiki* dominent les montagnes et les piémonts qui sont les zones les plus densément peuplées. Les *Arabes showa*, les *Kanuri* et les *Kotoko* cohabitent sur les rives du Chari, entre la ville de Kousséri et le lac Tchad. Les groupes *Musgum*, *Massa* et *Musey* se retrouvent sur les rives du Logone, entre la ville de Logone Birni et le bec de canard. Chaque groupe ethnique présente une histoire spécifique qui conditionne son mode de mise en valeur de l'espace. L'occupation de l'espace actuelle s'explique en partie par la différence fondamentale qui existe entre les ethnies musulmanes (*Foulbé* ou *Mandara*) et animistes qui ont non seulement des conceptions différentes de l'organisation sociale mais également des stratégies différentes d'organisation et de gestion de l'espace. En effet l'absence de tout contrôle de l'espace chez les peuples non islamisés est un corollaire d'une absence d'organisation politique effective de la plupart de ces sociétés, doublé d'un régime foncier qui privilégie les droits de l'individu sur la terre par rapport à ceux de la collectivité. Les montagnards Mafa sont un exemple de société proche de cette notion d'appropriation

individuelle de la terre. Les champs sont une propriété des chefs de famille qui peuvent les cultiver, louer, les prêter, les laisser en friche ou vendre sans se référer à une autorité supérieure. Ce système a pour conséquence un morcellement infini de l'espace en cellules indépendantes. Le système foncier Foulbé par contre axé sur un contrôle auto-centré de l'espace entraîne une dynamique d'extension du territoire et d'accumulation des biens au profit d'un pouvoir centralisé. Dans ce cas, la terre bien qu'acquise par droit de conquête appartient en réalité au chef traditionnel. En effet, l'appartenance de la terre à l'individu est assurée tant que l'exploitation effective est faite et que les droits d'usage de la terre sont respectés (paiement régulier de la dîme par exemple). La diversité ethnique peut également être vue comme un élément catalyseur de conflits d'ordre socio-politique ou liés à la compétition pour l'accès aux ressources naturelles qui deviennent rares. Les rivalités politiques entre *Arabes Showa* et *Kotoko* ou les conflits d'accès aux mares pour la pêche entre populations autochtones *Kotoko* dans la plaine d'inondation du Logone illustrent bien ces cas de figure. Une analyse spatiale des données sur les effectifs de population et du cheptel à l'échelle de la région montre en particulier que les densités d'occupation humaine et la répartition ethnique de la population contribuent à expliquer la distribution spatiale du cheptel. Une corrélation a été observée entre les aires de peuplement *Fulbé/Arabe showa* et les zones de forte densité de bovins (figure 5.7b et figure 5.8b). Les éleveurs de la plaine d'inondation du Logone appartiennent à trois principaux groupes ethniques : Les *Fulbé* et *Arabe showa* sont principalement des transhumants alors que les *Musgum* sont des éleveurs sédentaires. On remarque que l'élevage du gros bétail est monopolisé par les *Fulbé* et les *Arabes showa*. Les zones dont les charges sont les plus importantes (presque partout supérieure à 40 bovins/km² avec des pointes entre 70 et 80) sont localisées au nord des Yaérés et dans le Diamaré où on rencontre un peuplement important d'Arabes showa dans le premier cas et de Fulbé dans le second. Les zones au nord et à l'est dans le Diamaré (Bogo et Moulvoudaye) sont particulièrement saturées. Le nombre de bovin ramené à la population est le plus élevé dans ces aires de peuplement (figure 5.8c). Dans la partie sud des Yaérés, la charge en bétail est par contre très faible parce que les populations *Kotoko* et *Musgum* qui y sont dominantes, sont principalement tournées vers la pêche et pratiquent peu l'élevage bovin.

Migrations, mise en place du peuplement et perspectives de développement rural

L'histoire ancienne de la région du Nord Cameroun a été marquée par d'importants mouvements migratoires qui ont contribué à la mise en place des différents groupes de peuplement. Ces mouvements ont par conséquent déterminé certaines stratégies d'occupation et de gestion de l'espace (Boutrais et al., 1984). On peut citer par exemple la traite des esclaves, les guerres tribales ou les invasions peules qui ont amené de nombreuses populations dominées à s'orienter vers des zones de refuge principalement dans les montagnes. La surpopulation, la saturation de l'espace et l'insécurité alimentaire ont amené les populations *Mafa* des montagnes à développer des stratégies défensives de gestion de l'espace et des stratégies offensives se traduisant par une intensification des migrations temporaires ou définitives vers les piémonts (Iyébi-Mandjeck, 1997). Des mouvements de population forcés, organisés par l'administration coloniale et suivie par l'administration camerounaise ont ensuite amené certaines populations montagnardes à s'installer en plaine. Cette descente en plaine des montagnards représente de par son ampleur, l'une des mutations les plus spectaculaires qu'a connu cette région du Nord Cameroun depuis l'indépendance. Des mouvements de population plus organisés ont été entrepris par l'administration ou dans le cadre de projet de projet de développement en vue de la colonisation des zones moins peuplées ou pour servir de main

d'œuvre agricole dans les plantations des autres provinces du pays (SODECOTON et SEMRY dans la province, HEVECAM (1935) à Edéa et SOSUCAM (1967) à Mbandjock dans le sud du Cameroun).

L'histoire des migrations *Toupouri* récitée par Koulandji (1997) illustre bien l'importance de ces mouvements historiques. Les mouvements migratoires les plus récents observés au cours des deux dernières décennies parfois stimulés par la mise en place d'infrastructure de communications, traduisent essentiellement des réponses à l'augmentation de la pression démographique, à la dégradation locale des ressources naturelles et aux nouveaux besoins économiques des populations rurales. Les mouvements spontanés des individus/ménages à la recherche des terres plus fertiles, vers des zones moins peuplées ou vers les villes sont plus fréquents. Les populations *Guiziga* des plaines du Diamaré et de Kaélé par exemple, ont connu des migrations internes et externes qui sont très complexes et riches de signification si on considère la diversité des orientations spatiales et le fait qu'elles ne répondaient à priori à aucune contrainte de peuplement ou de disponibilité de ressource naturelle. Leur densité de population relativement faible et la qualité de leur sol permettant la pratique d'une grande variété de cultures avec des rendements atteignant la moyenne régionale ne sont pas de nature à justifier ces mouvements de population. Ces mouvements répondraient plus à une logique économique individuelle plutôt qu'une logique de contrainte naturelle. Une explication possible a été donnée par Boutrais et al. (1984) qui ont observé que le jeune *Guiziga* est plus enclin à quitter son village d'origine où il est soumis à une pression des autorités villageoises politiques ou religieuses ou des aînés qui obtiennent de lui des services tout en limitant son revenu à son rang social. Dans ce cas, les migrants se déplacent sur de courtes distances (inférieures à 20 km) mais l'importance des flux se justifie par le fait que ceux ci retrouvent dans les zones d'accueil les mêmes situations de dépendance sociale et économique qu'ils fuient dans les zones d'origine. Les migrations vers les villes constituent un phénomène récent même si les villes de la région sont assez anciennes. C'est ainsi qu'on assiste à un accroissement rapide de la population de certaines villes (Kousséri, Maroua, Mokolo et Yagoua) qui atteint des taux annuels de 8%. Les populations les plus concernées par les départs sont d'une part les Haoussa et les Foulbés qui ont une tradition commerciale séculaire, et d'autre part certaines ethnies « païennes » d'un dynamisme particulier comme les *Mundang*, *Guiziga* ou *Massa* qui réagissent positivement aux sollicitations extérieures.

Du fait de sa position géographique frontalière, la région reçoit également une population étrangère assez importante venant des pays voisins (Tchad et Nigéria) : ce sont notamment les réfugiés, les commerçants, les ouvriers agricoles temporaires et les éleveurs transhumants à la recherche des pâturages. Au niveau des politiques nationales, les migrations ont souvent été considérées comme une solution au problème de saturation foncière ou de surpeuplement. Toutefois l'exemple du Nord du Cameroun montre que si ces migrations organisées ne sont pas suivies dans le cadre d'un plan adapté d'aménagement et de gestion de l'espace, elles peuvent conduire à d'importantes mutations inattendues dans le système agraire. Au niveau local, si on considère la situation de fluidité permanente créée par les migrations, on peut affirmer qu'elles constituent un obstacle à l'amélioration de l'habitat ou à la durabilité des actions de foresterie rurale (agroforesterie ou foresterie communautaire). On a remarqué d'autre part que les migrations engendrent dans les zones d'accueil un processus d'expansion des terres cultivées qui se traduit dans le paysage par un défrichement important des savanes boisées. Ces pratiques agricoles extensives imposées par la pression démographique et la faible disponibilité des terres exposent les sols à la dégradation. Les terroirs où aboutissent les courants migratoires les plus importants connaissent ainsi très vite une situation de saturation foncière qui peut conduire à la dégradation du milieu. Dans certains cas, ce sont les systèmes de

culture pratiqués par les populations locales qui sont modifiés. On peut citer l'exemple des montagnards qui, au contact avec les populations des plaines se sont orientés vers la culture cotonnière au détriment de l'arachide qui était autre fois la principale culture de rente produite en quantité importante.

5.4.2.2. Le système foncier et les pratiques paysannes

La pression démographique et les nouveaux besoins de contrôle de l'espace par certains acteurs conduisent à la saturation foncière qui se traduit par la rareté des terres agricoles ou de pâturage, une réduction des temps de jachère et une contiguïté des terroirs. Cette situation influence les règles et les pratiques foncières locales qui à leur tour déterminent certaines mutations observées dans l'utilisation de l'espace. Le système foncier dans la région de l'Extrême Nord du Cameroun est caractérisé par une cohabitation entre deux systèmes qui s'appliquent en même temps. On distingue un système étatique moderne qui se traduit par les différentes lois relatives à la propriété foncière et aux forêts qui sont clairement définies (loi forestière de 1994). Ce système s'applique à l'ensemble des espaces non occupés qui relèvent du domaine national. Le système foncier traditionnel, défini par des règles propres aux communautés locales en fonction de leur culture et traditions, s'applique également sur ces espaces dont les chefs traditionnels réclament la propriété. Ce conflit apparaît le plus souvent quand les intérêts des populations ou élites urbaines sont en jeu sur ces espaces non occupés comme c'est le cas par exemple pour l'exploitation du bois de feu ou lorsqu'on souhaite mettre en place une plantation ou une forêt communautaire (voir section 5.2.2.2 de ce chapitre). Dans cette section, l'accent est mis sur les espaces utilisés pour l'agriculture et l'élevage qui sont de par les faits soumis au système foncier traditionnel (Teyssier et al., 2003).

Les grands traits du système foncier traditionnel

Les caractéristiques du système foncier traditionnel dépendent des différents groupes sociaux (ethniques ou religieux) et les règles de mise en valeur de l'espace peuvent donner lieu à différentes interprétations. Dans la seule plaine du Diamaré par exemple, les lois et les règles relatives à l'accès et au contrôle de la terre diffèrent d'un village à l'autre (Timmermans, 1998). Dans la plupart des cas, le rôle de l'autorité traditionnelle est dominant. Conformément à la législation foncière qui stipule que le territoire ou le domaine national est administré par l'autorité coutumière au nom de la population, l'autorité traditionnelle dans la pratique, a à sa charge l'allocation, le transfert des terres et la résolution des conflits liés à l'exploitation de ces terres et des ressources naturelles. Elle a sous son contrôle les brousses, les terres de jachère, les parcelles abandonnées sur lesquelles elle a pleine autorité de prendre des décisions. La terre peut être obtenue par différents moyens : l'héritage de la famille, le défrichement pionnier, le don, le prêt ou l'achat. L'héritage et les défrichements pionniers étaient initialement les modes d'accès à la terre les plus courants. Mais les possibilités de nouveaux défrichements sont devenues limitées et les héritages successifs résultent en un morcellement important des parcelles au point où les productions ne permettent pas au propriétaire d'assurer les besoins de son ménage. La vente et la location des terres agricoles sont devenues des pratiques qui sont de plus en plus courantes dans plusieurs villages. La valeur monétaire de la terre dépend de sa fertilité et des relations entre les contractants (ethnique, religieuse, subordination). L'autorité traditionnelle prélève une taxe de vente au vendeur et au propriétaire qui peut aller jusqu'à 20% du prix total. Dans les villages *Fulbé* en majorité musulmans, une taxe de 10% est prélevée sur les produits de récoltes. En cas de décès, de départ du propriétaire (usufruit) ou en cas d'abandon pour un certain nombre d'années, et si aucune requête n'est faite par un membre de sa famille, une terre cultivée peut

retourner sous le control du chef traditionnel qui l'allouera à un autre paysan qui manifestera le besoin. Le nombre d'années au bout duquel le chef décide de réallouer la terre peut varier entre 4 et 20 ans en fonction des villages (Timmermans, 1998). Les pratiques foncières courantes dans l'Extrême Nord du Cameroun sont donc, comme dans la majorité des pays d'Afrique noire, fondées sur le concept de séparation entre contrôle foncier et exploitation de la terre, le concept d'insertion dans un lignage et le concept d'usufruit d'une portion d'un bien collectif. Ces concepts ont été formulés par Pelissier (1995) sous la forme de trois principes. Le premier stipule que « c'est le défrichement qui fonde le contrôle foncier, c'est l'exploitation du sol, sa mise en valeur qui justifie la pérennité de la tenure ». Selon le deuxième principe, « tout membre de la communauté clanique, villageoise, ou lignagère a accès à la terre en fonction de sa capacité de travail et de ses besoins, de sorte que le concept de paysan sans terre est totalement étranger à la culture africaine ». Le troisième principe précise que « les vivants ne sont que les usufruitiers d'un bien qui ne leur appartient pas et qui par conséquent est inaliénable ».

Influence des pratiques foncières sur les changements d'utilisation de l'espace

Les grands enjeux fonciers concernent principalement la gestion des zones de savanes boisées (brousse) et des pâturages qui sont sollicitées pour des usages agricoles par les populations locales ou migrantes. En effet, l'extension des zones cultivées, débouche le plus souvent sur des conflits entre villages voisins, surtout dans les zones de brousses interstitielles entre ces villages, exploitées traditionnellement comme pâturages et pour la collecte du bois de feu. Ces zones de parcours indispensables aux éleveurs sont des champs de compétition entre des conceptions de l'espace radicalement opposées où, les rapports de force sont le plus souvent en défaveur des éleveurs. Le fait que l'utilisation agricole soit le plus souvent privilégiée dans la résolution des conflits est un facteur qui stimule le processus de réduction des brousses. L'accès à la brousse pour l'installation des champs est pendant longtemps resté ouvert et sans prix. Avec la diminution des brousses, l'accès à la brousse devient plus restreint. Certaines autorités traditionnelles demandent déjà une contre partie financière en retour de l'allocation d'une terre dans ces espaces. La monétarisation des transactions foncières qui se traduisent par une tendance croissante des locations et ventes est une conséquence de la forte demande et de la raréfaction des meilleures terres de brousse facilement accessibles (saturation foncière). Dans les villages d'accueil, l'arrivée des populations migrantes implique le plus souvent un réajustement permanent du foncier et une redistribution de terres dont l'arbitrage reste du seul ressort de l'autorité traditionnelle. Ces mutations, notamment le morcellement des parcelles affectent l'emprise des unités de production des paysans démunis alors que les pratiques rentières sous-jacentes profitent principalement aux paysans les plus riches et aux autorités traditionnelles (Timmermans, 1998; Pelissier, 1995). En effet, les intérêts supra locaux, collectifs et à long terme sont faiblement pris en compte dans le système foncier actuel. L'état qui est mieux placé pour définir un cadre privilégiant l'intérêt commun et le besoin de gestion durable devrait intervenir pour réajuster ce système. En d'autres termes le système foncier qui prévaut actuellement n'est pas favorable pour faire évoluer le système agraire vers une trajectoire de type Boserupien

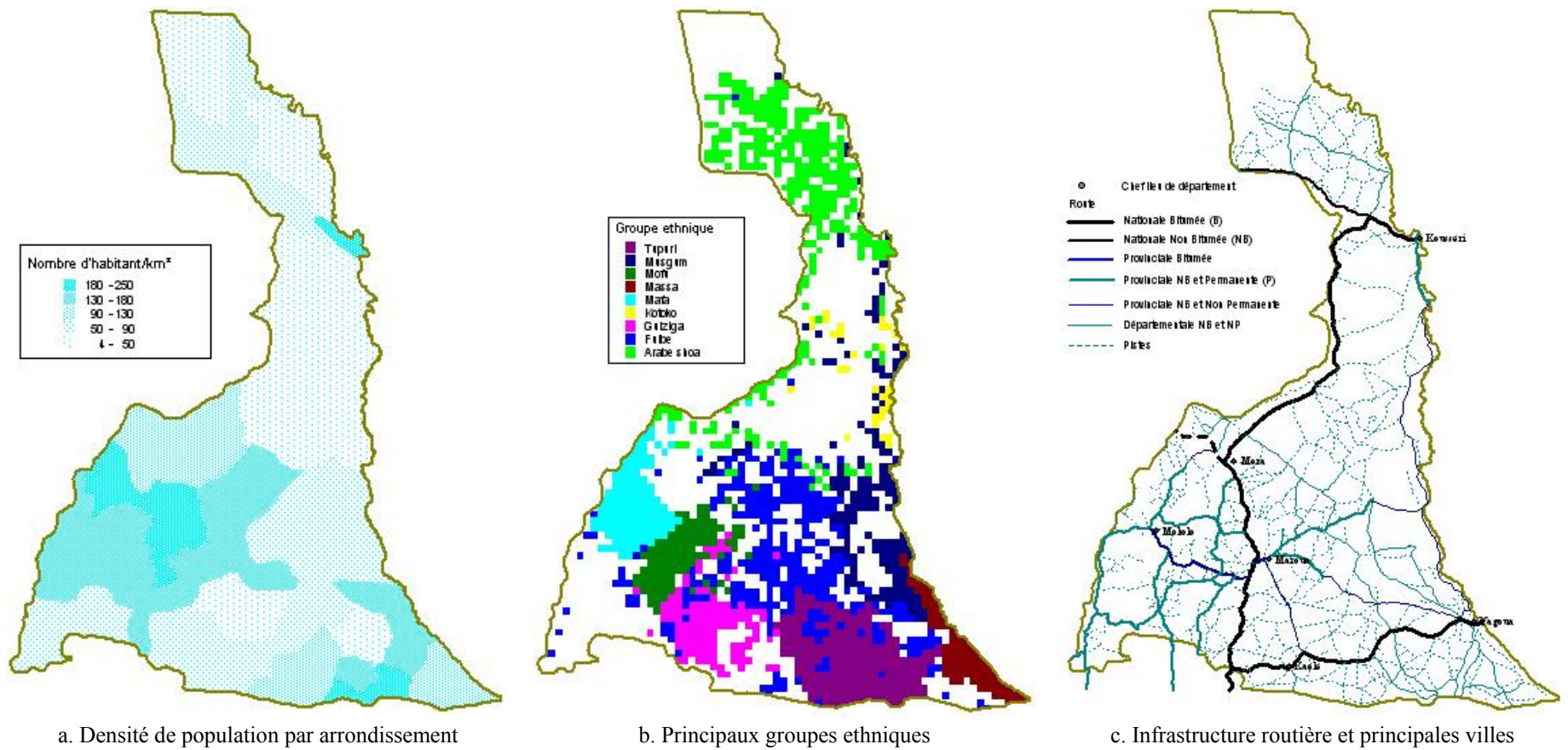


Figure 5.7 : Cartes de quelques facteurs déterminants d'ordre humain : densité de population, groupes ethniques et infrastructure routière.

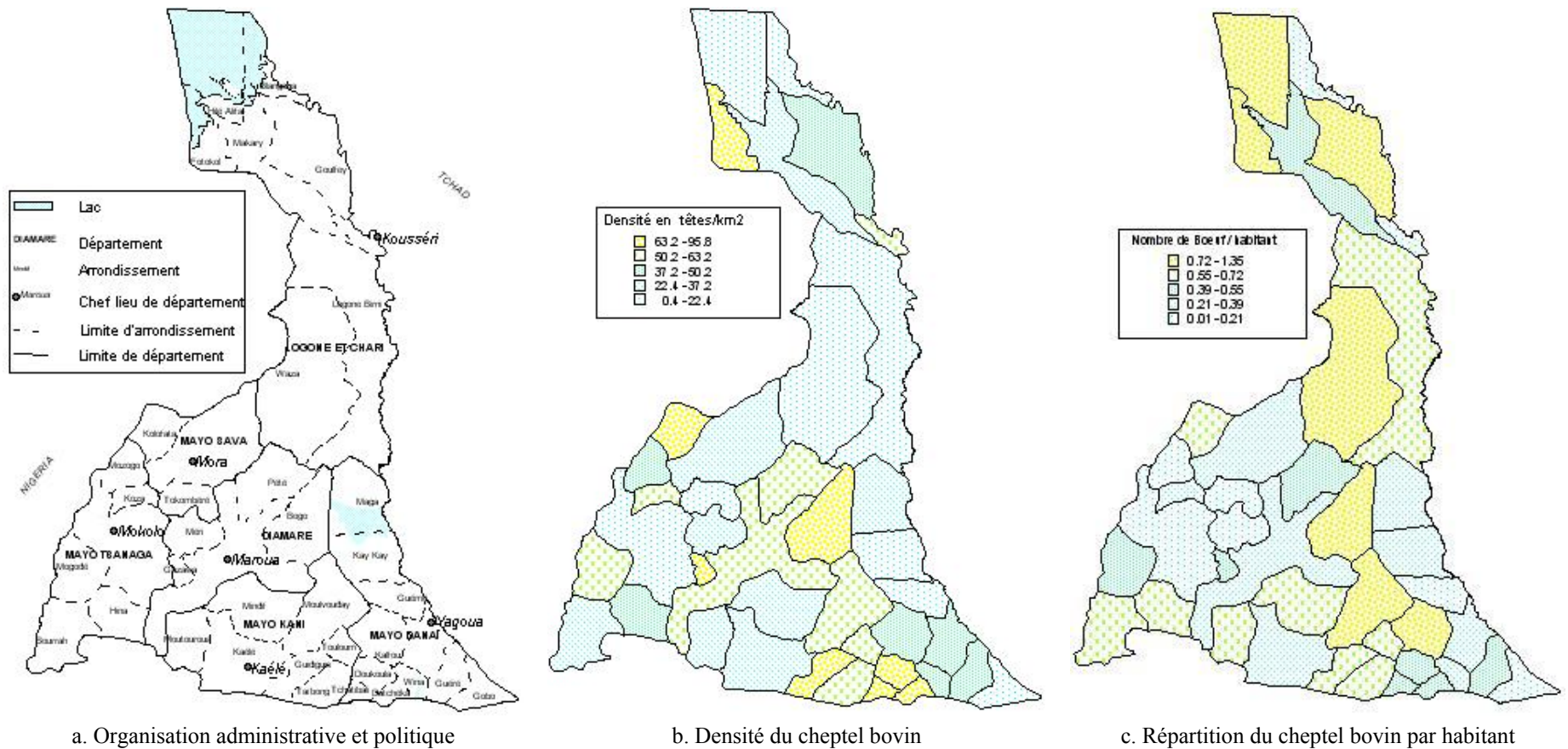


Figure 5. 8 : Cartes de quelques facteurs déterminants d'ordre socio-économique : organisation administrative, densité du cheptel bovin et répartition par habitant.

5.4.2.3. Les facteurs géoéconomiques et politiques

Accessibilité aux localités et développement des marchés

Le développement des infrastructures routières a une influence certaine sur le développement de nombreuses activités rurales en favorisant le déplacement des populations, les échanges entre villes et campagnes, et en offrant un accès plus facile aux ressources naturelles (bois de feu, évacuation des productions vivrières). La carte de l'infrastructure routière réalisée permet de distinguer trois types de route : les routes permanentes accessibles en toute saison, les routes saisonnières qui sont bloquées en saison des pluies et les pistes qui sont le plus souvent non permanentes (figure 5.7c). L'extension du réseau routier et son amélioration ne conduit pas seulement à un développement plus important mais conduit également à une réorganisation de la structure du marché, qui a ensuite des effets rétroactifs plus importants sur des infrastructures de développement. L'existence et l'accessibilité aux marchés ou aux grandes métropoles à partir des zones rurales sont également des facteurs déterminant les changements d'utilisation de l'espace dans la mesure où une importante partie de la zone qui reste encore enclavée ne subit pas les mêmes transformations que les zones accessibles et ouvertes sur les marchés. L'évolution récente de plusieurs centres urbains canalise les courants migratoires et influence ainsi la transformation des espaces environnants. La région est soumise à des flux croissants d'hommes qui s'orientent de plus en plus vers les grandes villes et on assiste ainsi à une polarisation de l'espace régional par un réseau urbain qui se met en place.

Malgré le caractère traditionnel de l'agriculture en grande partie destinée à l'autoconsommation, le surplus de production fait l'objet d'une activité commerciale qui prend de l'importance ces dernières années. Contrairement à la situation d'autarcie observée à l'époque post coloniale dans les montagnes, l'extension des cultures commerciales (riz coton, arachide) a contribué à une densification du réseau des marchés urbains qui présentent une importance variée si l'on considère l'effectif qu'ils accueillent, leur zone d'attraction, le tonnage des marchandises écoulées ou la nature et l'importance des moyens de transport. Le sorgho de contre saison « qui dans la culture peule était un symbole traditionnel » fait l'objet aujourd'hui de nombreuses spéculations (Interviews auprès des producteurs). L'activité commerciale qui se développe autour de la production de cette culture dans l'ensemble de la zone d'étude est entretenue par des productions déficitaires qu'enregistrent certaines régions et par l'existence de régions où la production n'est pas favorable (monts Mandara où les terres ne sont pas propices, les plaines du Logone qui présentent des contraintes de mise en culture du fait de la durée de l'inondation). De plus en plus de commerçants urbains achètent/initient la production et réalisent des bénéfices substantiels en revendant lorsque la disponibilité devient moins importante et que les prix sont plus élevés. Les flux des excédents de production sont destinés aux marchés internes ou externes (vers le Tchad). Le marché de Maroua reçoit ainsi les productions céréalières et le bois de feu en provenance des zones environnantes.

Cadre institutionnel et organisation du pouvoir politique

L'environnement institutionnel et politique lié à la gestion des ressources naturelles et l'aménagement de l'espace dans la zone d'étude est caractérisé par un encadrement très dense et diversifié. On peut distinguer trois principaux types d'intervenants : une administration fortement hiérarchisée à laquelle est associé un pouvoir traditionnel qui occupe une place particulière et des organismes ou projets de développement. L'administration représentée par les services des différents ministères techniques assure l'encadrement des

activités agrosylvopastorales et piscicoles grâce à une structure fortement hiérarchisée qui est calquée sur l'organisation du territoire (figure 5.8a). Elle comprend les délégations provinciale, départementale et d'arrondissement ainsi que des structures opérationnelles comme les postes agricoles, forestiers ou les centres zootechniques et vétérinaires, chargés de maintenir le contact avec les paysans et les réalités locales. Le Gouverneur de la province assure la tutelle de ces structures techniques et joue un rôle de coordination, d'orientation et de contrôle. Le préfet, placé sous l'autorité directe du Gouverneur assure au niveau du département, une mission permanente d'information et de coordination en matière économique et sociale. Au niveau de la province, les délégations provinciales sont chargées de la coordination et de l'exécution locale des programmes et opérations de leurs ministères techniques de tutelle. Elles sont en ce sens chargées d'appliquer la politique et mettre en œuvre les stratégies gouvernementales de développement. Elles doivent également mettre à disposition les données statistiques et donner un appui technique aux collectivités publiques. Au niveau local, les communes, qui correspondent en général à peu près à l'échelle de l'arrondissement sont des structures en principe autonomes mais placées sous la tutelle du ministère de l'administration territoriale et de la décentralisation. Elles interviennent dans le processus d'aménagement du territoire en contribuant par leurs moyens propres, à la création des infrastructures de bases (routières, hydraulique et électrique, marchés, et autres équipements socio-collectifs). Au niveau des cantons et des villages, la chefferie traditionnelle, structure d'encadrement de base des populations, est en principe placée sous la tutelle et le contrôle des autorités administratives. Mais dans la pratique, elle occupe une place à part en raison de son importance liée à l'histoire et à son organisation interne. Les chefs traditionnels ont à leur charge, la gestion des populations et des terroirs villageois. Ils jouent le rôle de couloir de transmission des directives de l'administration aux populations et assurent le suivi de leur exécution (récupération des impôts et taxes). Dans la pratique, l'encadrement de l'administration se superpose à l'encadrement de ces pouvoirs politiques traditionnels qui jouent un rôle d'auxiliaire de l'administration auprès des populations. Malgré la volonté de l'Etat d'appliquer dans cette partie du pays le système d'administration directe, le rôle des chefs traditionnels restent pertinent étant donné le faible niveau de scolarisation des populations rurales qui faute de comprendre s'accommodent difficilement à l'administration moderne et éprouve plutôt le besoin de se retrancher dans le système des chefferies traditionnelles. L'état est également appuyé dans la tâche d'encadrement des activités rurales par un nombre important d'organismes de développement qui ont des objectifs dans divers domaines de la gestion des ressources naturelles.

5.5. Hypothèses sur les trajectoires du système agraire et les facteurs déterminants

La revue et la synthèse des informations et connaissances disponibles permettent de formuler des hypothèses générales sur les changements d'utilisation de l'espace dans la région en faisant référence aux théories des dynamiques agraires présentées au chapitre 2 (Malthus, Boserup, Von Thünen, systémique). Le modèle descriptif et hypothétique formulé pour analyser les dynamiques agraires de la région est illustré à la figure 5.9. Ce modèle représente le processus de saturation foncière et les différentes trajectoires envisagées. En effet, la pression démographique a contribué au développement de systèmes de mise en valeur extensif, conduisant à une saturation progressive de l'espace dans plusieurs terroirs. La réponse la plus couramment observée a été le déplacement des populations vers des zones plus productives confirmant l'hypothèse d'une trajectoire de type malthusienne. La relative stabilité observée dans plusieurs

cas traduit la résilience de l'écosystème naturel de ces régions de savanes. On suppose également que les trajectoires futures vont dépendre principalement des réponses des acteurs locaux et urbains en terme d'investissement dans la conservation, la gestion des ressources naturelles et l'aménagement de l'espace.

5.5.1. Facteur démographique et processus de saturation de l'espace

Dans la plupart des zones de savane de l'Extrême Nord du Cameroun, les processus de pression démographique et de saturation foncière se sont opérés de manière similaire aux situations survenues un peu plutôt dans de nombreuses régions en Afrique de l'Ouest ou soudano-sahélienne (Pieri, 1989). En effet, la réponse la plus couramment observée à l'accroissement de la population dans ces régions a pendant longtemps été l'extension des surfaces cultivées. La forte croissance démographique a conduit dans les cas où l'environnement naturel le permettait encore, à un système de production agro-pastoral extensif qui a des conséquences certaines sur la disponibilité et la durabilité des ressources naturelles. Contrairement à la situation observée dans les savanes centrafricaines où la saturation s'opère avec de très faibles densités de population (Ankoguy-Mpoko, 2002), l'augmentation des surfaces cultivées par exploitant dans le cas des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun n'est pas le principal facteur qui conduit à la saturation de l'espace mais c'est principalement la croissance démographique. La figure 5.9 illustre la courbe d'évolution de l'espace libre et utile en fonction de la population. Le terme utile précise le fait que la saturation ne s'exprime pas seulement en terme de disponibilité quantitative mais également et surtout qualitative. En effet, les espaces de savanes non cultivés jouant le rôle de réserve foncière ont été progressivement exploités pour répondre à l'accroissement des besoins et pour absorber une force de travail en augmentation (Pelissier, 1995). Avec la croissance continue et rapide de la population, l'intensité culturale mesurée comme le rapport entre le nombre d'années de mise en culture et la durée totale, a tendance à s'accroître et on passe ainsi progressivement d'une agriculture itinérante à un système agricole spatialement saturé. On est parvenu dans la plupart des terroirs à un niveau de saturation de l'espace « utile » qui se traduit par la mise en valeur des terres jugées marginales (figure 5.9).

5.5.2. Résilience de l'écosystème naturel

L'hypothèse selon laquelle les processus de contraction des surfaces cultivées et de réduction du potentiel productif des milieux seraient induits principalement par les changements des facteurs biophysiques ou par les phénomènes de dégradation des milieux (instabilité du sol ou variation climatique), a été le plus souvent avancée dans les zones de savanes. Dans le cas spécifique de la région de l'Extrême Nord du Cameroun, le terme écosystème 'fragile' a été utilisé pour exprimer les différents risques liés aux aléas climatiques, à la dégradation ou l'érosion des sols qui induisent la rareté de l'eau, la perte de la biodiversité ou la baisse de la productivité des terres. Les situations de famines récurrentes dont les principales causes sont les sécheresses constituent des arguments en faveur de cette hypothèse. Les travaux de Ntoupka (1999) confirment que le milieu édaphique a une très grande influence sur la dynamique des écosystèmes de savanes et qualifient leur équilibre d'instable. En effet, en cas de maintien de la pression humaine sur de tels écosystèmes, on estime qu'ils vont basculer vers le stade de hardé, c'est-à-dire des sols nus ou presque rien ne pousse plus. La réponse la plus couramment observée dans ce cas de figure est la migration des populations vers des zones plus productives, confirmant ainsi l'évolution du système suivant

une trajectoire de type Malthusienne. Les nombreux cas où on observe encore une relative stabilité du système illustrent les résultats de Donfack (1993) qui révèlent que ces écosystèmes de savane présentent une résilience relativement élevée du fait que la diversité végétale baisse peu avec la pression anthropique et que certaines espèces végétales présentes dans des situations particulières sont adaptées à des longues périodes de stress hydrique. Au cours des deux dernières décennies, ces perceptions scientifiques concernant la résilience de l'écosystème face aux interactions humaines ont été de plus en plus relativisées pour s'orienter vers une vision systémique et prendre en compte les propriétés de seuil, d'interdépendance et d'interactivité. L'analyse des dynamiques agraires des différentes zones agro écologiques de la région (section 3) montrent que même si les conditions climatiques ont accéléré certains processus de dégradation, les trajectoires présentées dans chacun des cas sont déterminées par les dynamiques de peuplement (croissance démographique et migrations) ou des interventions humaines spécifiques dans le système (aménagements hydro agricoles). De plus, le passage entre les différentes phases d'évolution qui définissent la trajectoire du système correspond dans chaque cas à une variable qui a atteint un seuil critique (production/besoin, espace utile libre, revenu par paysan, etc.). Ainsi, des études plus récentes révèlent que dans la plupart des situations de la région, le facteur démographique a fortement déterminé la trajectoire du système agricole, le conduisant dans un processus de saturation progressive. La trajectoire actuelle est de type Malthusienne dans la mesure où les ressources par habitant diminuent sans que le système d'utilisation de l'espace change fondamentalement. Mais on n'est pas encore dans une situation dramatique telle que prédit par Malthus. Sur un total de 20 sites de recherche dans la région de l'Extrême Nord du Cameroun, Njomaha (2004) n'a identifié que 4 sites qui présentent ce type de trajectoire Malthusienne. Ses conclusions envisagent dans un avenir proche, une plus grande généralisation de ce scénario dès que la productivité va diminuer au-delà d'un seuil critique.

5.5.3. Une transition agricole toujours attendue

Le processus de saturation foncière qui se traduit successivement par un accroissement continu de l'intensité culturale, la réduction du temps de jachère et la mise en culture des terres marginales ne devrait en aucun cas être assimilé à une transition. Pour que l'on puisse parler de transition, il faudrait que ces changements s'accompagnent de changements techniques plus ou moins profonds. Dans les cas où les potentialités du milieu ne permettraient plus la mise en place d'un système extensif dans la région de l'Extrême Nord du Cameroun, la croissance démographique a conduit dans très peu de cas à une forme de transition véritable. Sur un total de 20 sites de recherche, Njomaha (2004) a identifié 3 sites où une forme de transition au sens de Boserup a commencé à se mettre en place. Elle se traduit par exemple par l'augmentation de la fréquence de culture des terres par un système de relais où le sol est utilisé en saison de pluies pour le maïs ou le coton et en saison sèche pour les oignons ou la patate, la pratique de la même culture au cours des deux saisons (patate). On peut également citer l'adoption des techniques d'irrigation pour les cultures maraîchères. Mais tous les cas de systèmes intensifs identifiés dans la région, n'ont pas nécessairement suivi ce schéma d'évolution où on part d'un système extensif sous l'influence démographique pour s'orienter vers une saturation de l'espace avant de subir une transition vers un système intensif. Par contre, les systèmes intensifs observés dans certains sites sont liés à des facteurs exogènes comme la demande urbaine ou des interventions gouvernementales. On peut citer le cas de la production du coton qui est passée d'un système de production extensif à un système intensif à partir du

milieu des années 70 avec la création de la SODECOTON. Il en est de même pour la production du riz irrigué avec la création des SEMRY. L'irrigation se fait dans des zones où le type de sol et la disponibilité en eau le permettent mais cette pratique reste très limitée dans l'espace et est différent de l'investissement qui est requis sur des zones cultivables. Il y a par exemple les cas de systèmes intensifs récents liés à la production maraîchère (tomates, oignon, légumes) pour le marché de Maroua ou des centres urbains du Sud Cameroun. Ces derniers cas amènent à formuler l'hypothèse d'une influence de l'accessibilité aux centres urbains et aux marchés sur la structure et l'évolution des systèmes d'utilisation de l'espace. A l'échelle de la région, la ville de Maroua en particulier exercerait une importante polarisation de certaines activités dans les zones environnantes.

Nous supposons que la trajectoire des changements d'utilisation de l'espace dans un avenir proche va davantage dépendre des investissements que les acteurs locaux et urbains vont consentir dans la mise en valeur de l'espace. Jusqu'au stade actuel d'évolution du système agraire, ces investissements sont restés très faibles. Il n'existe pas à notre connaissance des cas de pays en Afrique où des investissements importants ont été réalisés avant ce stade c'est à dire lorsque les terres utiles sont encore relativement disponibles (transition précoce et progressive). Dans le cas actuel, on peut donc s'attendre à plusieurs scénarios d'évolution possibles: un scénario de transition immédiate et rapide comme ce fut le cas dans la région du Machakos au Kenya (Tiffen et al., 1994), un scénario de transition tardive qui peut être plus ou moins rapide et un scénario d'évolution sans transition qui correspond à la trajectoire de Malthus.

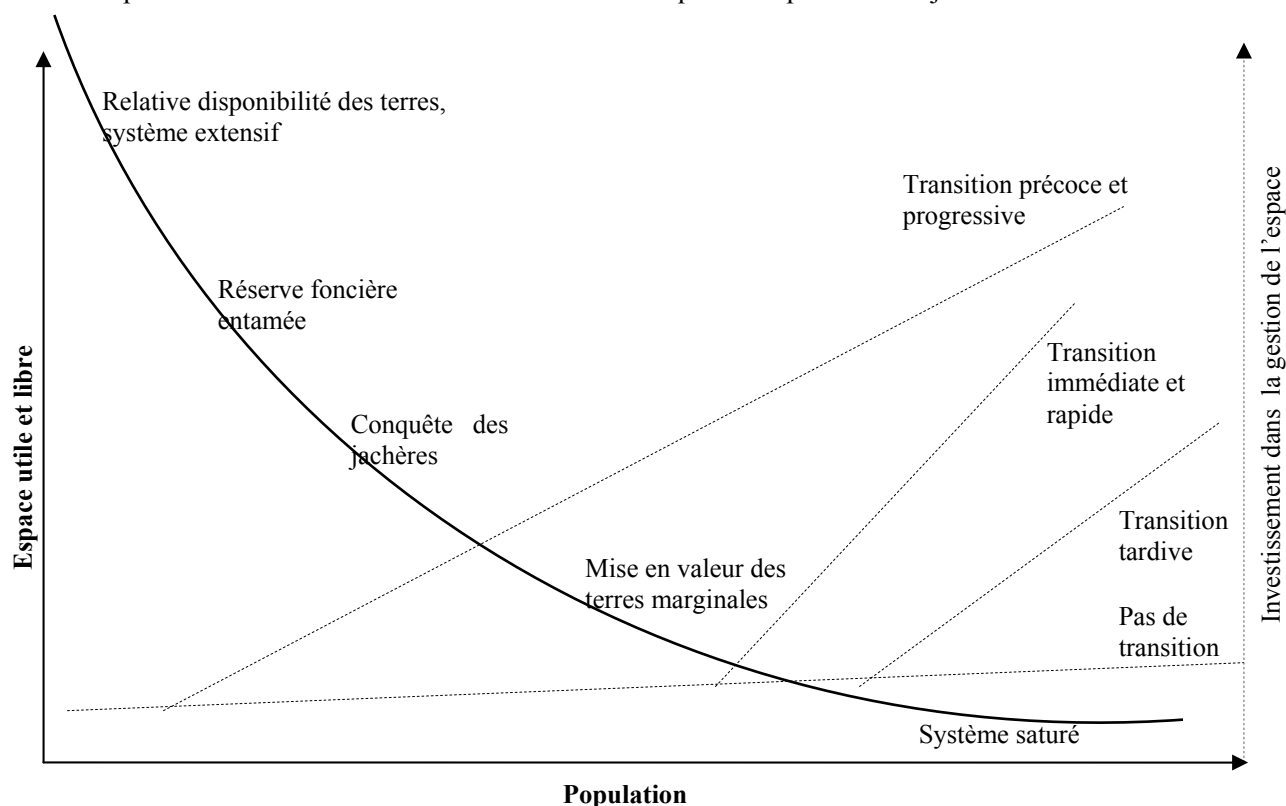


Figure 5.9 : Modélisation du processus de saturation foncière et trajectoires hypothétiques des changements d'utilisation de l'espace.

L'évolution des systèmes agraires à forte dominante sorgho repiqué dans l'Extrême Nord du Cameroun est un exemple qui confirme l'hypothèse d'un tel modèle d'évolution des changements d'utilisation de

l'espace. En effet, on a assisté dans l'ensemble des plaines de l'Extrême Nord du Cameroun à une extension des surfaces cultivées encouragée dans une première phase principalement par une forte demande alimentaire liée à la croissance démographique et aux risques liés au système de production agricole (risque climatique, influence de la culture cotonnière sur le niveau de production des autres cultures vivrières). Dans une phase plus récente, les objectifs de production étant passés de la simple subsistance à la subsistance et commercialisation, l'extension des superficies cultivées a pris des proportions plus importantes avec l'introduction dans cette filière, d'une nouvelle catégorie d'acteurs qui ont modifié les facteurs de production (capital, force de travail). On s'est acheminé progressivement vers un achèvement des possibilités de défrichements et certaines terres marginales commencent à être exploitées. Dans ce contexte, une question pertinente est de savoir vers quelles directions vont s'orienter les développements futurs et quelles sont les stratégies que les acteurs peuvent mettre en place pour accompagner une telle évolution et garantir un développement durable. En effet, deux réponses correspondant à différentes formes d'intensification du système sont théoriquement envisageables : l'involution et la transition agricole (De Groot et Kamminga, 1999). La première option suppose que les populations vont tout simplement chercher à accroître la production en gardant le même type de système. Dans ce cas, la productivité va certainement baisser graduellement jusqu'à un seuil et le revenu peut devenir très bas (trajectoire de Malthus). Les conditions naturelles et économiques peuvent être telles qu'il devient difficile de s'orienter vers la deuxième option. Celle-ci correspond à un changement qualitatif du système et suppose des innovations qui exigent nécessairement des investissements en terme de capital, force de travail, de connaissance technique ou de cohésion sociale (Trajectoire de Boserup). Une autre question pertinente est de savoir si les conditions pour une telle transition sont mobilisables par la recherche agronomique et les populations locales.

5.6. Conclusion

Une analyse préalable du système d'utilisation de l'espace de la zone d'étude à été effectuée dans ce chapitre en s'appuyant sur les connaissances empiriques et en utilisant les théories de changement d'utilisation de l'espace présentées au chapitre 2 et le dispositif multiéchelle présenté au chapitre 4 comme cadres d'analyse. Un état des lieux de l'occupation du sol et des principales formes d'utilisation de l'espace a été ainsi effectué en précisant les principales interactions et dynamiques observées. Le système d'utilisation de l'espace de la zone d'étude affiche les propriétés et processus complexes que le SIE SMALL Savannah devrait intégrer. Il est caractérisé par une diversité de situations dans l'espace et de nombreuses interactions entre les facteurs socioculturels et les conditions du milieu. On a observé une importante compétition entre les formes d'utilisation de l'espace d'une part et des conflits déclarés ou potentiels entre les acteurs impliqués dans l'utilisation et la gestion de l'espace. Les informations utilisées sont de nature variée et proviennent d'une diversité de sources : revue de la littérature, atlas, recensement de la population, statistiques agricoles, recensement du cheptel et base de données existantes. A partir de cet ensemble de données, une liste de facteurs qui déterminent potentiellement la structure et les dynamiques d'utilisation de l'espace a été sélectionnée et analysée empiriquement. Ce chapitre fournit ainsi deux types d'information qui sont utilisés dans les chapitres suivants pour la conception et l'implémentation de SMALL Savannah : les éléments du schéma de la base de données, les hypothèses sur les facteurs déterminants la distribution de l'utilisation de l'espace et les hypothèses sur les processus de changement dans un futur proche.



Photo 6. Une vue panoramique du paysage agricole autour du village de Gadas, Extrême Nord du Cameroun.

Chapitre 6. Architecture du Système d'Information sur l'Environnement SMALL Savannah

Résumé

Les Systèmes d'Information sur l'Environnement (SIE) sont vus comme des instruments ayant pour objectif l'observation et la compréhension des phénomènes qui se déroulent sur un territoire donné. Avec l'importance accordée aux problèmes environnementaux ces dernières décennies, on a assisté à la mise en place de nombreux projets internationaux visant à développer des Systèmes d'Information dans différents domaines où l'information environnementale est au cœur des processus de décision. Toutefois, les méthodes et les techniques conçues pour le développement d'applications de gestion simples ne sont plus adaptées aux exigences de cette nouvelle génération de Système d'Information. En effet, les systèmes environnementaux sont très complexes et leur gestion exige de nombreuses observations, un diagnostic des situations et des expertises variées pour expliquer et prédire l'évolution des phénomènes. Malgré l'intérêt croissant pour les SIE, les avancées conceptuelles et techniques liées à la spécification et au développement de tels systèmes d'information sont restées assez limitées. Cette thèse est un essai de définition et de spécification de l'architecture des SIE, que nous considérons comme une étape préalable à l'élaboration ou l'adaptation de toute méthode de conception appropriée. Le cas étudié (SMALL Savannah) est un exemple de SIE conçu pour l'analyse intégrée des dynamiques agraires en zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. Ce système combine un module d'observation et d'analyse spatiale pour la représentation des phénomènes à partir des données géographiques de sources variées, un module de diagnostic et de caractérisation, un module d'explication et de prédiction des changements d'utilisation de l'espace, et un module de modélisation dynamique et de simulation des trajectoires de changements d'utilisation de l'espace en vue d'une gestion durable.

Mots clés : Système d'Information sur l'Environnement, méthodes de conception, Base de Données, analyse spatiale, SIG, modélisation.

Abstract

Environmental Information Systems (EIS) are seen as instruments for the observation and understanding of phenomena that take place in a given location. As a consequence of increasing environmental problems, there have been a growing number of international projects with the objective to develop Information Systems in many fields of application where environmental information is crucial for the decision making processes. However, methods and techniques that were designed for the development of more simple management applications are not any more appropriate to the requirements of this new generation of Information Systems. In fact, environmental systems are very complex and their effective management requires a large number of observations, a diagnosis and a great variety of expertises in order to support the explanation and prediction of on going phenomena. The present thesis is an attempt to define and specify the architecture of EIS, which is seen as a preliminary step to the elaboration or adaptation of any appropriate design method. The case study (SMALL Savannah) is an example of an Environmental Information System designed for the integrated analysis of land use dynamics in the savannas area of the Far North of Cameroon. This system combines an observation and spatial analysis module for the representation of phenomena from various data sources, a diagnosis and characterisation module, a module for the explanation and prediction of land use change pattern, and a dynamic modelling and simulation module for the exploration of land use change trajectories geared toward a sustainable management.

Key words: Environmental Information System, design method, Data Base, spatial analysis and GIS, modelling.

6.1. Introduction

La gestion de l'environnement est une priorité pour la communauté scientifique internationale. En Afrique subsaharienne par exemple où l'on observe de nombreux changements naturels et anthropiques, l'enjeu principal est la promotion et la mise en œuvre du développement durable (Geny et al., 1992). Or, toute politique allant dans ce sens nécessite une meilleure compréhension des phénomènes environnementaux et une gestion rationnelle de l'espace et des ressources naturelles. La compréhension des systèmes environnementaux exige de nombreuses observations, un diagnostic des situations et des expertises variées pour expliquer les phénomènes et prévoir leur évolution. Avec l'importance prise par les problèmes environnementaux ces dernières décennies (déforestation, pollution, désertification, dégradation ou raréfaction des ressources naturelles, saturation de l'espace), une prise de conscience est notable au niveau des différents acteurs impliqués dans la gestion de l'environnement. On a ainsi assisté à la mise en place de nombreux projets internationaux visant à constituer des Systèmes d'Information Environnementaux dans différents domaines au sein desquels l'information environnementale est au cœur des processus de décision : la climatologie, l'avancée des récoltes, le suivi de la pêche, l'innovation sociale et les conditions économiques des populations, et l'évolution urbaine (Dzeakou et al., 1999 ; Courade, 1997 ; Kergreis, 1992).

Une des contraintes importantes à la mise place et l'adoption des Systèmes d'Information sur l'Environnement (SIE) reste la complexité des systèmes socio-environnementaux qui sont par essence des systèmes ouverts, dynamiques, et comportant de nombreuses interactions entre leurs composantes. La notion d'environnement est un concept assez global et complexe qui peut être considérée comme l'ensemble interactif et dynamique comprenant les différentes ressources naturelles (bioclimat, sols, eau, végétation, faune), le cadre de vie rurale ou urbaine et le paysage considéré comme produit des méthodes de mise en valeur actuelles et des traces de celles qui les ont précédées (Geny et al., 1992). Une avancée dans le domaine de la conception des SIE nécessite d'abord une réflexion approfondie sur les bases épistémologiques (Bartoli et Le Moigne, 1996). Au chapitre 2, nous avons présenté les concepts de base et un modèle de représentation des systèmes d'utilisation de l'espace qui montrent les spécificités des systèmes environnementaux et la nécessité de proposer des méthodes de conception de SI adaptée. Ce type de recherche orienté vers des domaines peu explorés conceptuellement bien que familiers pratiquement pour la plupart des professionnels nécessite l'expérimentation et l'illustration qui permettrait d'amorcer des retours critiques et de suggérer des nouveaux éléments de concepts, de méthodes et des modalités de leur mise en œuvre. Le travail de recherche mené dans cette thèse répond à ce triple objectif : définir les concepts et les éléments de spécification des SIE, proposer des éléments de méthode de conception et les illustrer sur un exemple. Le cas étudié ici, dénommé SMALL Savannah est un exemple de SIE conçu pour l'analyse intégrée des dynamiques agraires en zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. La démarche utilisée pour le développement du SIE SMALL Savannah couvre à cet effet les trois principales phases d'une méthode classique de conception et de développement d'un SI à savoir l'analyse préalable ou diagnostic du système réel, la conception du système d'information organisationnel et informatisé et la mise en œuvre des applications (Bouchy, 1994). Le chapitre précédent a été consacré à l'analyse préalable du système d'utilisation de l'espace. Cette description empirique a permis à cet effet d'identifier les données pertinentes et les processus que le SIE SMALL Savannah devrait pouvoir capturer. Le présent chapitre est consacré à la phase de conception qui devrait fournir une description conceptuelle du système.

Les quatre derniers chapitres de la thèse sont consacrés à des applications illustrant la mise en œuvre du système d'information.

Contrairement à l'intérêt et aux initiatives croissantes pour les observatoires environnementaux et les SIE, les avancées conceptuelles et techniques liées à la spécification et au développement de tels systèmes d'information sont restées assez limitées. Ce décalage pourrait s'expliquer par le fait que le concept de SIE pose encore un sérieux problème de définition qui n'aide ni à comprendre l'importance, les techniques et les approches requises pour le développement de tels systèmes. La plupart des applications environnementales sont développées sur des bases ad hoc plutôt que sur la base de méthodes formelles et les systèmes obtenus sont par conséquent peu ouverts (Fouda et Moore, 1998). Une autre raison importante de ce décalage est principalement liée à la complexité des systèmes environnementaux qui se caractérisent par de nombreuses interactions entre les composantes, des dynamiques non linéaires et la multiplicité des échelles d'opération des processus (chapitre 2). Les données environnementales sont par conséquent complexes et de natures variées (textes, cartes, objets géométriques, données attributaires, série statistique, photographies aériennes, images satellites, Modèle Numérique de Terrain, etc.). La représentation et le traitement de ces données font donc appel à une large gamme d'outils logiciels spécialisés tels que les SIG (Système d'Information Géographique), les SGBD (Système de Gestion des Bases de Données), les logiciels de traitement d'images, les systèmes experts, etc. Malgré l'intérêt croissant pour les SIE, les avancées conceptuelles et techniques liées à la spécification et au développement de tels systèmes d'information sont restées assez limitées. Les méthodes et techniques existantes qui ont été conçues pour le développement d'applications de gestion simples ne sont plus adaptées aux nouveaux besoins de cette nouvelle génération de SI (Bouzeghoub et al, 1997). Il s'agit notamment de la structuration des données complexes, de l'interopérabilité entre les composants logiciels et de l'ouverture du système vers un public plus large. On constate que les outils et techniques tels que les SIG ne permettent pas tous seuls de fournir une vision d'ensemble des données et des traitements, conduisant ainsi au développement d'applications lourdes ou inadaptées (Gayte et al., 1998). L'un des intérêts scientifiques de cette thèse est de contribuer à la définition et à la spécification des Systèmes d'Information sur l'Environnement en tant qu'outil pour les observatoires environnementaux (Fotsing et Assako, 2007). Ce travail devrait déboucher sur des propositions méthodologiques et opérationnelles adaptées au développement de cette nouvelle génération de Système d'Information.

Ce chapitre porte sur la spécification de l'architecture du SIE SMALL Savannah. La section suivante fournit un essai de définition des SIE et donne quelques exemples d'initiatives. La section 3 décrit les spécificités de SMALL Savannah qui permettent ainsi de justifier la méthode et le formalisme utilisés pour décrire les modèles conceptuels du système. La section 4 est consacrée à une description des fonctionnalités, des données, des traitements et de l'architecture logicielle de SMALL Savannah. La section 5 fait une synthèse des enjeux liés au développement des SIE et dégage les perspectives de recherches dans ce domaine.

6.2. Nature et structure d'un Système d'Information sur l'Environnement

6.2.1. Définition d'un Système d'Information sur l'Environnement

Il se pose un sérieux problème de définition des concepts liés aux Systèmes d'Information sur l'Environnement qui n'aide ni à comprendre l'importance, les techniques et approches requises pour le développement de tels systèmes (Fouda et Moore, 1998). Boulding a proposé une définition du concept de système d'information qui s'appuie sur le paradigme systémique (Le Moigne, 1977). En effet, il considère le système d'information d'une organisation comme une construction abstraite permettant de renseigner le système de pilotage (centre des décisions) et son environnement, sur le fonctionnement et l'efficacité du système opérant, siège de l'activité et de la dynamique du système. Cette définition est à la base de la méthode de conception MERISE qui a connu un grand succès pour la modélisation du fonctionnement et l'informatisation des systèmes d'information des organisations telles que les entreprises productrices de biens ou de services (Nancy et al., 1992). Dans ces cas, on supposait que pour une entreprise classique, il est possible avec plus de précision de délimiter les frontières du système c'est-à-dire distinguer le système interne de son environnement. L'environnement était considéré comme assez stable et on supposait que les interactions avec le système restaient faibles et sans conséquences majeures. De plus, on supposait que le système opérant n'avait pas besoin d'information en dehors des directives reçues du système de pilotage.

Cette vision de la notion de SI ne permet pas de modéliser complètement les systèmes plus complexes et plus ouverts comme les systèmes socio-environnementaux qui présentent de fortes interactions avec leur environnement et nécessitent de partager l'information entre les différents acteurs impliqués dans la gestion et le fonctionnement du système. Le système agricole tel que défini au chapitre 2, est un exemple de système environnemental qui met en exergue une telle ouverture du système et l'importance des interactions avec l'environnement (figure 2.3 du chapitre 2). On remarque que ce système est centré sur les formes d'utilisation de l'espace par les sociétés humaines et l'environnement du système est constitué des facteurs biologiques, physiques et socio-économiques qui influencent les activités liées à l'utilisation de l'espace. Contrairement à la définition d'un système d'information classique, la figure 6.1 adaptée de Gayte et al. (1997), montre que l'environnement est pris en compte dans la structure du système. Les opérateurs sont des acteurs qui utilisent directement l'espace. Il peut s'agir d'un paysan ou un groupe organisé. Le gestionnaire est un acteur intervenant dans la gestion de l'espace à un niveau de décision stratégique plus élevé. Il peut s'agir d'une autorité traditionnelle, d'une autorité administrative ou d'une structure technique en charge de la gestion des ressources naturelles à un niveau territorial donné.

Cette représentation d'un système environnemental relatif à la gestion de l'espace permet de distinguer deux niveaux de perception du système environnemental qui correspond à deux types de Système d'Information sur l'Environnement généralement observés. Dans un premier cas, le système environnemental est perçu comme un système de production. C'est la notion classique de système d'information qui assure le lien entre le système de pilotage et le système opérant constitué des acteurs qui utilisent l'espace pour des besoins de production. Le second cas qui nous intéresse dans cette thèse est celui où le système environnemental est perçu comme un système de gestion du territoire. C'est alors le Système d'Information sur l'Environnement qui assure la relation entre le territoire, le système opérant ou les acteurs et le système de pilotage (figure 6.1). Ainsi, un Système d'Information sur l'Environnement peut être défini comme un ensemble de ressources humaines, matérielles et de procédures permettant de

caractériser l'état et la dynamique d'un territoire donné, en référence aux problèmes environnementaux et de développement économique ou social auxquels ses communautés font face (Loireau, 1998).

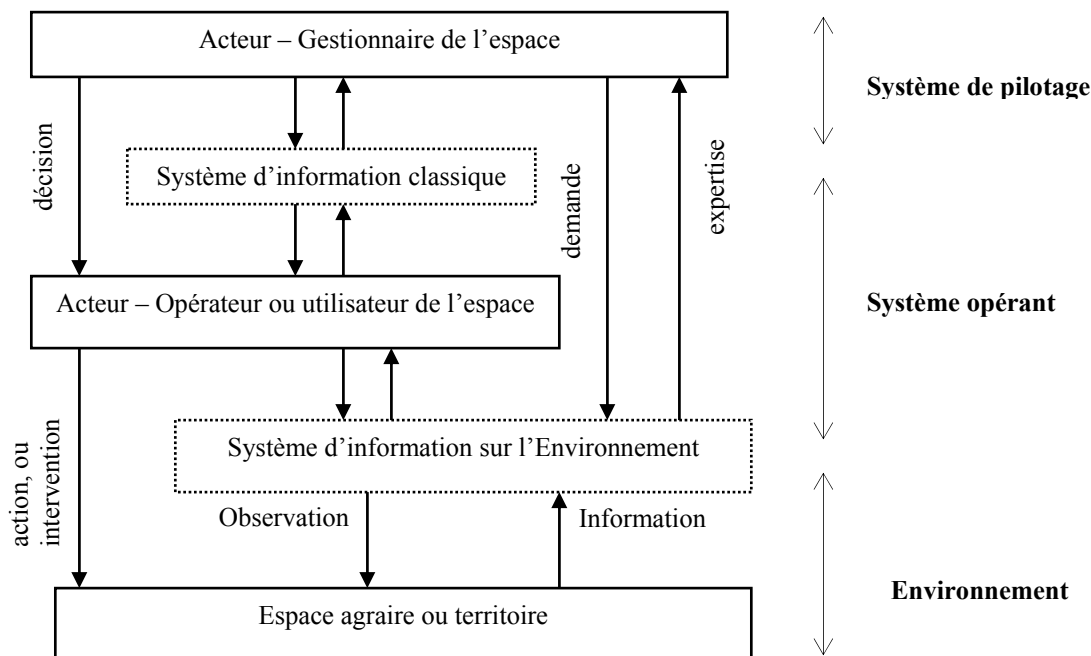


Figure 6.1. Structure d'un système environnemental relatif à la gestion de l'espace. Le système d'information est une entité abstraite qui relie l'organisation de l'espace et des acteurs aux gestionnaires à travers des échanges d'information, des actions ou des décisions.

6.2.2. Les fonctions d'un Système d'Information sur l'Environnement

Au regard de la définition du SIE, la finalité et les fonctions semblent être les mêmes que celles de tout système d'information notamment la génération, le traitement, la mémorisation et la diffusion de l'information nécessaire à la gestion ou à la prise de décision (Nancy et al., 1992). Toutefois, un Système d'Information sur l'Environnement présente des spécificités du fait de la nature du domaine d'application : la gestion de l'environnement. En effet, la notion d'environnement est un concept assez global qui peut être considéré comme l'ensemble interactif et dynamique comprenant les différentes ressources naturelles (bioclimat, sols, eau, végétation, faune), le cadre de vie rurale ou urbaine et le paysage considéré comme produit des méthodes de mise en valeur actuelles et des traces de celles qui les ont précédées (Burel et Baudry, 2003). La gestion de l'environnement nécessite donc une meilleure connaissance de la dynamique et des interactions entre ces différents écosystèmes et compartiments socio-économiques. De plus, l'importance prise par les problèmes environnementaux ces dernières décennies et l'adoption du concept de développement durable ont conduit les politiques d'environnement et de développement à s'orienter vers des approches intégrées de gestion qui exigent de disposer des moyens d'observation et de suivi de l'état de l'environnement, des outils d'analyse des impacts environnementaux et de prévision des changements, et des outils d'accompagnement des systèmes sociaux aux niveaux local.

Ces nouveaux besoins justifient l'intérêt des systèmes d'information sur l'Environnement qui apparaissent donc comme des outils adaptés pour supporter le fonctionnement des observatoires environnementaux qui sont orientés vers la compréhension et le suivi des phénomènes naturels. La notion d'observatoire est un concept très ancien qui trouve ses origines en astronomie. En effet, un groupe de personnes observait le comportement des astres à des fins de compréhension et de prévision. Aujourd'hui, les observatoires assurent des fonctions similaires et sont plus ou moins assimilés à des systèmes d'information qui produisent de façon régulière des informations pertinentes et représentatives, permettant de comprendre la structure et le fonctionnement des systèmes étudiés, de tracer les évolutions, d'effectuer des comparaisons dans le temps ou dans l'espace. En d'autres termes, ce sont de véritables outils de diffusion de l'information, d'aide à la décision et d'appui à la planification (Fotsing et Assako, 2007). En conclusion, les SIE peuvent être considérés comme des instruments des observatoires environnementaux ayant pour objectifs l'observation, la compréhension et la prévision des phénomènes qui se déroulent sur un territoire donné (Gayte et al., 1997). Pour atteindre ces objectifs, le SIE doit assurer trois fonctions complémentaires :

- observer le territoire en mesurant des variables, indicateurs ou descripteurs dans l'espace et le temps ;
- gérer et analyser les informations issues de ces observations ;
- présenter et communiquer ces informations au niveau décisionnel approprié sous forme de données, synthèses, connaissances ou expertises.

En se référant au schéma de la structure d'un système environnemental (figure 6.1), on peut distinguer deux principaux types de Système d'Information sur l'Environnement en fonction des utilisateurs et des fonctionnalités. Le premier type assure l'interface entre le gestionnaire de l'espace et les acteurs ou opérateurs impliqués dans les activités ou les phénomènes qui se déroulent sur le territoire. Ce type de SIE connu sous le terme d'applications de gestion fournit des indicateurs permettant d'engager rapidement des actions en fonction de la politique du gestionnaire. Le deuxième type de SIE assure l'interface entre le territoire et le gestionnaire. Les thèmes analysés étant plus complexes nécessitent une expertise pour interpréter les phénomènes. Le SIE, en plus des tâches d'observation, se présentent alors comme un instrument d'étude et de compréhension d'un thème donné. Cette deuxième catégorie de SIE correspond aux applications environnementales d'aide à la décision et d'aménagement de l'espace ou du territoire (Cheylan, 1991). Les possibilités de mise à disposition immédiate de l'information qu'offrent les réseaux de communication transforment le processus de collecte, structuration et de restitution de l'information et ouvrent des perspectives d'une nouvelle catégorie de systèmes d'information sur l'environnement (Fotsing et Assako, 2007). Ce type de SIE assure l'interface entre l'environnement et un public assez large incluant les décideurs, les gestionnaires, les acteurs, chercheurs ou journalistes. Le SIE correspond dans ce cas à un ensemble d'outils de capitalisation et d'intégration en réseau de connaissances acquises sur différents sites. Il répond ainsi à un besoin de partage et de transfert de connaissances scientifiques et des savoir-faire locaux entre les différents acteurs (Derniame, 1998).

6.2.3. Quelques exemples d'initiatives de mise en place de SIE

Au cours des deux dernières décennies, plusieurs initiatives de mise en place de SIE ont été observées, le plus souvent dans le cadre d'observatoires environnementaux ou socioéconomiques. L'UNESCO a par exemple contribué à mettre en place l'Observatoire du Sahara et du Sahel qui avait pour finalité

d'appréhender les évolutions climatiques, le processus de désertification et les transformations des modes d'exploitation des ressources (Kergreis, 1992). Le programme à moyen terme proposé à la conférence inaugurale s'articulait autour de quatre objectifs : la maîtrise de l'information sur l'environnement, le renforcement de la connaissance de base, la participation des populations et la diffusion de l'information. La FAO a mis en place le SMIAR (Système Mondial d'Information et d'Alerte Rapide) qui tire profit des technologies de l'information pour fournir aux gouvernements, organisations internationales et institutions s'occupant d'opérations de secours, les analyses et informations sur la situation alimentaire mondiale, et en particulier dans les pays où les risques d'urgence alimentaire sont les plus grands (Dzeakou et al., 1999). La Banque Mondiale a mis en place le PRGIE (Programme Régional de Gestion de l'Information Environnementale) qui vise la mise en place d'un système d'Information portant sur l'état de l'environnement dans le bassin du Congo. C'est un réseau d'acteurs impliqués dans la protection et la valorisation des produits forestiers, l'utilisation des ressources naturelles et la conservation de la biodiversité. La Communauté Européenne et la Banque Mondiale ont contribué à la mise en route de deux projets de type observatoire environnemental : Le SIMES (Système d'Information Multimédia sur l'Environnement en Afrique Subsaharienne) et WISE-DEV (Web-Integrated System for Environment and DEvelopment), avec pour objectif de développer des méthodes pour soutenir la constitution d'un réseau cohérent d'observatoires environnementaux interconnectés à travers Internet (Derniame, 1998). Le PRASAC (Pôle Régional de Recherche Appliquée au Développement des Savanes d'Afrique Centrale), financé par le Fond Français d'Aide à la Coopération, a engagé des travaux de recherche visant à mettre en place l'observatoire régional du développement durable des savanes d'Afrique centrale. Les thèmes abordés par le PRASAC sont liés au développement rural de cette région : le suivi et l'analyse des filières agricoles, l'analyse des dynamiques d'utilisation de l'espace et des ressources naturelles, le suivi des exploitations agricoles et l'évolution des stratégies des producteurs (PRASAC, 1998). En effet, les dynamiques agraires qui résultent de l'influence des facteurs biophysiques ou des mutations socio-économiques observées en zone des savanes d'Afrique centrale ne sont pas souvent maîtrisées par les projets et structures en charge du développement rural. Le manque ou la mauvaise qualité de l'information et des connaissances sur ces dynamiques et une compréhension partielle ou approximative des processus en cours contribuent probablement à ces situations d'échec. Malgré l'importance des initiatives orientées vers la mise en place d'observatoires environnementaux, on constate qu'il existe très peu de SIE opérationnels. La plupart des applications environnementales existantes sont développées sur des bases ad hoc plutôt que sur la base de méthodes formelles et les systèmes obtenus sont par conséquent peu ouverts (Fouda et Moore, 1998).

6.3. Spécificités du Système d'Information sur l'Environnement SMALL Savannah

Les spécificités de ce système d'information concernent la nature du système environnemental et du problème étudié (chapitre 5), les objectifs visés (chapitre 1 et chapitre 2), la structure logicielle du système proposé (chapitre 3) et l'approche de conception et de mise en œuvre (chapitres 4 et 6).

6.3.1. Le système d'utilisation de l'espace en zone des savanes de l'Extrême nord du Cameroun

L'analyse préalable effectuée au chapitre précédent montre que l'Extrême Nord du Cameroun est une région de savanes d'Afrique centrale où on a observé de nombreuses transformations des paysages agraires impulsées par la forte pression démographique et l'importante mobilité humaine. Ces dynamiques ont conduit dans plusieurs cas à une saturation foncière, à une compétition plus accrue entre les formes d'utilisation de l'espace et à des conflits entre les acteurs. La prise en compte de ces évolutions et la prédiction des développements futurs, sont des aspects importants que le SIE devra prendre en compte. D'autre part, plusieurs acteurs sont impliqués dans l'utilisation et la gestion de l'espace. La difficulté de préciser le rôle des acteurs impliqués dans le circuit d'information (concepteur, gestionnaire, enquêteur, utilisateurs à différents niveaux) constitue également une contrainte à prendre en compte. La diversité des acteurs implique également une diversité de points de vue sur les thématiques abordées et exige d'adopter des approches interdisciplinaires. L'ouverture du dispositif vers un public diversifié rend difficile la mise à disposition d'informations pertinentes et dédiées à un public cible donné. Cet exemple illustre bien les propriétés complexes des systèmes d'utilisation de l'espace telles que présentées au chapitre 2. La complexité de ces systèmes provient des dynamiques spatio-temporelles, du nombre important d'interactions entre ses composantes et de l'imbrication des échelles auxquelles opèrent les processus. La compréhension de ces liens interactifs et dynamiques est une priorité pour le développement durable des communautés rurales concernées. C'est une étape préalable pour le développement des outils de gestion et d'aide à la décision.

6.3.2. Finalité et objectifs du SIE SMALL Savannah

SMALL Savannah (en anglais, Spatial Modelling and Analysis of Land cover and Land use change) est un exemple de SIE développé dans le cadre de la mise en place de l'observatoire du PRASAC. Il est conçu pour analyser et modéliser les dynamiques agraires en zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. Comme nous l'avons mentionné en introduction de cette thèse, la finalité de SMALL Savannah est de mettre à disposition des informations et connaissances nécessaires à une meilleure compréhension de la structure et des dynamiques des systèmes agraires en zone des savanes. Ce SIE devrait permettre de : 1) caractériser à différentes échelles, les grandes dynamiques agraires survenues au cours des dernières décennies ; 2) explorer les facteurs déterminants potentiels et identifier les relations avec la structure et les changements d'utilisation de l'espace ; et 3) simuler les dynamiques d'utilisation de l'espace en vue d'explorer les trajectoires d'évolution future. Pour atteindre ces objectifs, le système développé combine un module d'observation et d'analyse spatiale pour la représentation des phénomènes à partir des données géographiques de sources variées, un module de diagnostic et de caractérisation, un module d'explication et de prédiction des changements d'utilisation de l'espace, et un module de modélisation dynamique et de simulation des trajectoires de changements d'utilisation de l'espace. Les informations et connaissances dérivées du système peuvent être utilisées pour la phase de négociation et de planification de l'utilisation de l'espace en vue d'une gestion plus durable. Sur le plan fonctionnel, le système SMALL Savannah fournit donc à la fois des possibilités d'application pour la gestion, l'aide à la décision et l'aménagement de l'espace.

6.3.3. Hétérogénéité des sources de données et multiplicité des outils logiciels

Les informations sur les processus de changement d'utilisation de l'espace portent sur une variété de thèmes et doivent le plus souvent être localisées dans l'espace et repérés dans le temps (cartes diverses, recensement de la population et statistiques agricoles). Les exemples de thématiques identifiées sont le peuplement de l'espace, les dynamiques d'occupation du sol, les dynamiques foncières, les conflits d'utilisation de l'espace et les stratégies des acteurs. Les types des données manipulées sont par conséquent variés et complexes. Le système doit prendre en compte les types numérique, alphanumérique, image, objet géométrique, modèle numérique de terrain ou tout autre type défini par l'utilisateur. Les méta-données c'est-à-dire les données décrivant les données sont nombreuses dans la mesure où les informations manipulées ne sont pas exactes, et dépendent toujours du protocole de collecte. De plus la même donnée est susceptible d'être utilisée par plusieurs utilisateurs qui ne connaissent pas nécessairement la problématique qui a donné lieu à la collecte de l'information, ou encore par des utilisateurs qui ont des points de vue divergents, bien qu'également fondés.

La mise en place et le développement d'un tel système nécessite de combiner une large variété de techniques informatiques (SGBD, SIG, module de traitement d'images, module d'analyse statistique et module de simulation). En effet, différentes applications informatiques sont développées indépendamment en utilisant ces outils pour répondre à des besoins spécifiques. Les données de télédétection et les logiciels de traitement d'images permettent par exemple de faire des observations systématiques et régulières des paysages naturels, le suivi de la dynamique des ressources naturelles à l'échelle d'une région et certains aspects des impacts des activités humaines. Les logiciels de SIG offrent de nombreuses fonctionnalités pour l'intégration et le traitement de données environnementales à référence spatiale. On constate que l'utilisation cloisonnée de ces outils ne permet pas de fournir une vision d'ensemble des données et des traitements, conduisant ainsi au développement d'applications lourdes ou inadaptées (Gayte et al., 1997). Les SIG par exemple, qui sont le plus souvent assimilés aux SIE présentent l'inconvénient de se consacrer exclusivement à la gestion de l'information spatiale et les autres notions comme le temps et les données complexes sont faiblement prises en compte. Le risque d'utiliser un seul outil pour développer l'ensemble du SIE est de réduire la solution du problème aux possibilités offertes par l'outil informatique. Toutefois la multiplication des outils et le manque de cohésion entre eux posent les problèmes de parcellisation des données et d'interopérabilité entre les applications.

6.3.4. Choix méthodologiques pour la conception du SIE SMALL Savannah

Sur le plan méthodologique, la démarche d'analyse, de conception et de mise en œuvre du SI couvre l'ensemble des phases nécessaires à une analyse appropriée des changements d'utilisation de l'espace (identification des problèmes, description du système, conception et mise en œuvre). La démarche de développement de plusieurs SI se focalise le plus souvent sur la modélisation conceptuelle et la mise en œuvre. Le défi méthodologique majeur de la communauté scientifique s'intéressant aux SIE est d'autant plus une meilleure connaissance du monde réel que le développement de nouvelles techniques d'implémentation de modèles logiques. En effet, l'histoire du développement des SIE et plus spécifiquement des SIG, marquée par de nombreux échecs montre que la phase d'analyse préalable et de spécification des besoins n'est pas le plus souvent bien faite (Laurini et Thompson, 1996 ; Pantazis et

Donnay, 1996). Cette situation est due en partie au fait que les utilisateurs ne connaissent pas précisément ce qu'ils veulent par conséquent, ils n'arrivent pas à effectivement articuler leurs besoins. De plus leurs besoins changent au cours du temps. Dans ce contexte, la réussite d'un projet de SIE passe par un certain nombre de qualité que le développeur doit rassembler : une ouverture d'esprit, une capacité d'abstraction pour modéliser le système, une formation multidisciplinaire aussi bien sur le plan technique que thématique (Bouchy, 1994).

De plus les méthodes et approches de conception ou formalismes de modélisation des SI existants ne sont pas adaptés aux spécificités des SIE présentés aux paragraphes précédents. Le choix méthodologique effectué pour la conception de SMALL Savannah repose donc sur une combinaison et une adaptation des méthodes classiques en fonction des situations, de manière à tirer profit des avantages de chacune des approches (Gayte et al, 1997). L'approche de conception descendante classique suggère de commencer le processus par une vue globale (représentant les aspects organisationnels et de gestion) et de la décomposer successivement de manière à déboucher sur des tâches élémentaires à programmer. Cette approche suppose qu'à partir de toutes les spécifications, il est possible de construire un système correspondant. Or il peut arriver que certaines spécifications soient contraires ou impossibles avec les technologies actuelles. De plus, il est difficile de spécifier clairement toutes les entités, attributs et associations étant donnée que les règles ne sont pas bien connues. L'approche ascendante suggère de commencer par les programmes de bas niveau et de construire le système graduellement par intégration successive en partant des niveaux inférieurs vers les niveaux supérieurs, tout en essayant de respecter au mieux les besoins de l'utilisateur. L'inconvénient de cette approche est la difficulté de connaître l'ensemble des attributs et des relations entre entités dans les situations complexes. Une approche intermédiaire entre ces deux consiste à commencer par les deux extrémités et essayer de développer le système graduellement pour atteindre les résultats intermédiaires. Une autre approche de conception est orientée par la technologie et suggère d'identifier au préalable le type de technologie disponible avant d'envisager la construction du système définitif. Cette approche semble plus adaptée à la conception des SIE perçus comme un ensemble de composants logiciels existant à interconnecter ou à intégrer (Derniame et al., 2001). L'approche de conception par prototypage suppose que les trois approches citées précédemment ne permettent pas de satisfaire suffisamment les besoins de l'utilisateur. Elle propose par contre des systèmes simples avec un nombre réduits de spécifications et essaie de construire le système désiré par corrections successives et intégrations. L'approche par prototypage est très utilisée et semble être prometteuse pour le développement des SIE dans la mesure où elle ne nécessite pas une connaissance complète de toutes les exigences au début du processus de développement. De plus elle offre une certaine flexibilité et donne l'opportunité d'essayer et de suggérer des changements. La méthode d'analyse et de conception POLLEN (Procédure d'Observation et de Lecture de L'ENVironnement) est un premier exemple de méthode de conception hybride qui a été proposée pour l'analyse et la conception des SIE (Gayte et al., 1997). Le formalisme de cette méthode est utilisé dans la section suivante pour décrire les différents modèles du système d'information SMALL Savannah.

6.4. Les modèles conceptuels du Système d'Information SMALL Savannah

Les trois principaux modèles conceptuels qui constituent l'architecture du système SMALL Savannah sont décrits dans cette section. Il s'agit du modèle fonctionnel qui décrit les fonctionnalités du SI, du modèle objet qui décrit le schéma conceptuel des données manipulées par le SI et du modèle du système informatique qui décrit la structure des composantes logicielles du SI.

6.4.1. Le modèle fonctionnel de SMALL Savannah

Le modèle fonctionnel décrit les services rendus par le système et permet de mettre en évidence les fonctionnalités du système, les composantes qui le constituent et la nature des interfaces entre celles-ci (Lissandre, 1990). Le formalisme utilisé pour représenter le modèle fonctionnel peut être le diagramme de flot des données de la méthode OMT ou les actigrammes de la méthode SADT (Structured - Analysis - Design – Technique). La méthode SADT utilisée dans ce cas s'appuie sur la théorie des systèmes et se trouve donc adaptée pour expliciter les fonctions et la structure des systèmes complexes. Le modèle est décrit par un ensemble de diagrammes indiquant les relations entre les différentes activités du système étudié. Les diagrammes sont obtenus par une analyse descendante qui consiste en une décomposition fonctionnelle et hiérarchique des activités du système. En effet, le premier niveau du modèle est en général très abstrait qui correspond à une seule activité. Les activités et les moyens nécessaires à leur réalisation sont progressivement détaillés. La décomposition en sous systèmes, composants, éléments ou fonctions, permet d'affiner la description des fonctions du système et de sa structure en facilitant ainsi sa compréhension. La figure 6.2 illustre cette démarche de décomposition hiérarchique. Une activité ou une composante du système est représentée par un rectangle à l'intérieur duquel est mentionnée la fonction globale. Chaque activité transforme des données en entrée en des données en sortie. Les données de contrôle ou contraintes influencent ou modifient la manière dont l'activité ou la fonction est mise en œuvre. Les moyens sont les éléments matériels mobilisés pour la mise en œuvre de l'activité. Les flèches sont affectées d'un label indiquant la nature des données échangées. L'ensemble des flèches indique les communications qui existent entre les activités du système sans aucun détail sur l'ordre d'exécution dans le temps. Les diagrammes ainsi construits sont appelés diagrammes d'activité ou actigrammes. La décomposition du système en sous-système dans la méthode SADT n'est pas réductionniste dans la mesure où les composants ou éléments dérivés maintiennent les relations qui existent entre eux et dont l'ensemble peut permettre de reconstituer le système entier.

Au niveau d'abstraction le plus élevé, SMALL Savannah est vu comme une boîte noire qui reçoit des données multi sources et multi thèmes relatifs à la gestion et à l'utilisation de l'espace (figure 6.3). L'activité principale de ce Système d'Information consiste à représenter les phénomènes observés et les analyser afin de fournir des informations et des indicateurs utiles à une meilleure compréhension des dynamiques agraires de la zone d'étude. Ce système offre ainsi des possibilités pour pallier le problème de rareté de l'information géographique et constitue en même temps un système de connaissance, de diagnostic et de prédiction des situations agraires (Mullon, 1992). Il peut dans cette perspective être utilisé comme un outil de gestion et d'aide aux politiques de développement et d'intervention en milieu rural. La principale contrainte identifiée pour la mise en place d'un tel système est la complexité du système agricole. Les principaux moyens utilisés par le SI pour atteindre ses objectifs sont les outils logiciels et matériels qu'offrent les nouvelles technologies de l'information.

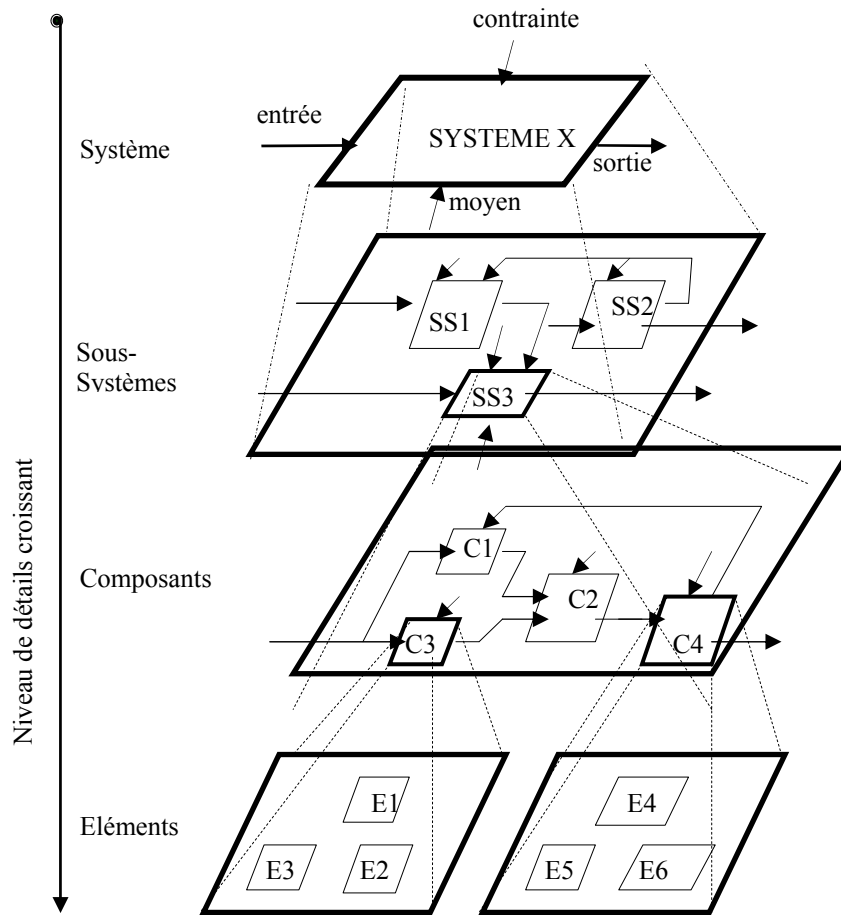


Figure 6.2 : Démarche de décomposition d'activité d'un système dans le formalisme SADT.

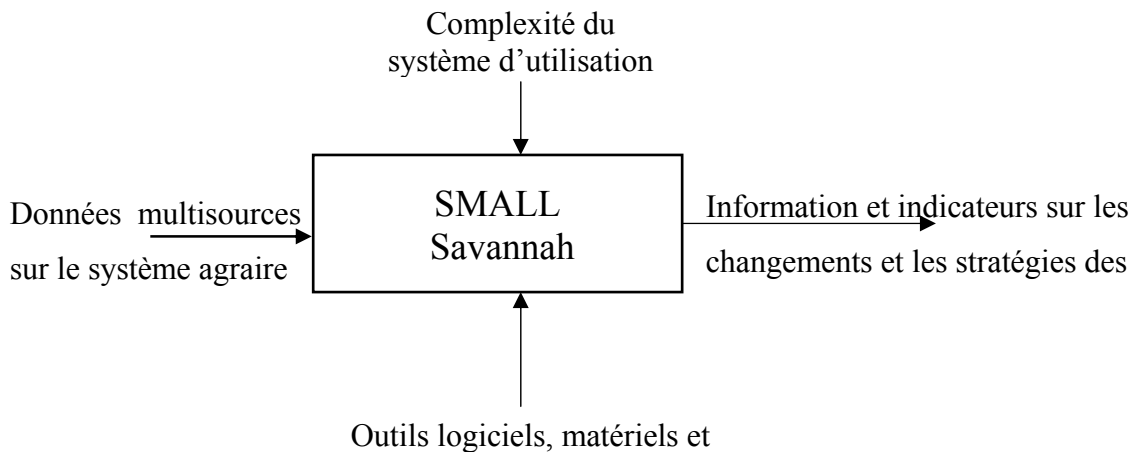


Figure 6.3 : Diagramme fonctionnel de niveau 1 du SIE SMALL Savannah.

A un niveau plus détaillé, le SIE SMALL Savannah peut être divisé en quatre principaux sous-systèmes ou modules qui concourent au fonctionnement du système comme le montre la figure 6.4 : observation et analyse spatiale, caractérisation et diagnostic, explication et prédiction, modélisation dynamique et simulation. On distingue les trois principaux type de données d'entrée : 1) les images, photographies ou cartes existantes ; 2) les statistiques, les bases de données et la littérature existantes, et 3) les données

primaires collectées sur le terrain. Le principal résultat du module d'Observation et d'Analyse spatiale est la base de données géographique du SIE qui est composée de couches de cartes et des données attributaires associées. Ces cartes sont exploitées comme données d'entrée pour les modules Diagnostic-Charactérisation et Explication-prédiction. Les informations produites par le module Diagnostic-Charactérisation portent sur la structure, le fonctionnement et les changements survenus dans le système d'utilisation de l'espace. A travers des indicateurs dérivées de ces informations, le module Explication-Prédiction fournit des modèles explicatifs des évolutions et les stratégies que les acteurs mettent en place. Le module de modélisation dynamique et simulation produit les dynamiques spatiales relatives aux trajectoires possibles de changement d'utilisation de l'espace. La diversité des outils logiciels et matériels utilisés pour la mise en œuvre sont : le système GPS (Global Positionning System), le Système de Gestion des Bases de Données (SGBD), le Système d'Information Géographique (SIG), le Module de Traitement d'Image (MTI), le Module d'Analyse Statistique (MAS) et la plateforme de Modélisation et Simulation (PMS). Les paragraphes suivants décrivent tour à tour et dans les détails les données en entrée, les fonctions, les ressources logiciels ou matérielles et les informations en sortie de chaque module.

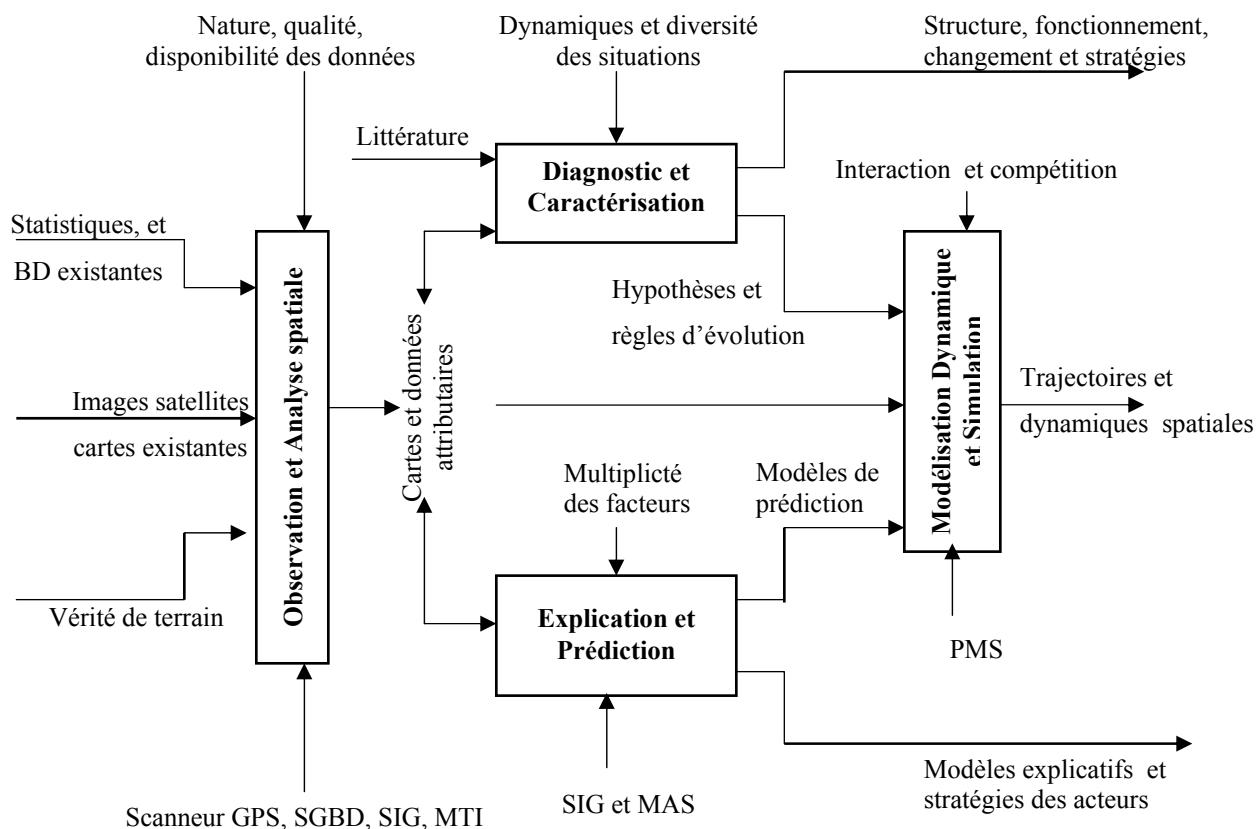


Figure 6.4 : Diagramme fonctionnel de niveau 2 mettant en exergue les quatre principaux modules du SIE SMALL Savannah.

a) Module d'observation et d'analyse spatiale

Le module d'observation et d'analyse spatiale a pour fonction l'acquisition des données multi-sources et la représentation des phénomènes étudiés. L'activité d'acquisition des données concerne les opérations suivantes : analyse d'images, saisie et importation des données existantes ou de terrain et numérisation des cartes papier existantes. Cette activité s'appuie sur les techniques et fonctions de structuration, de traitement, et d'intégration de données qu'offrent le GPS, les SGBD, les Modules de Traitement d'Image (MTI) et les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Dans le contexte spécifique des savanes d'Afrique centrale, les contraintes identifiées pour la mise en œuvre du module d'observation et d'analyse spatiale sont l'indisponibilité, la qualité approximative des données images et des statistiques. Les procédures d'acquisition et de traitement proposées dépendent du type de données et des besoins. Les cartes existantes au format raster sont mises en forme sous un logiciel de traitement d'image avant leur géoréférencement et leur digitalisation. Le traitement des images satellites combine traitement automatique et photo-interprétation (chapitre 3, section 2). Les relevés GPS et les données d'observations associées sont saisies sous un tableur et importées ultérieurement sous le SIG (chapitre 8). Les fonctions d'intégration et d'analyse spatiale fournies par les SIG sont utilisées pour dériver des variables qui traduisent l'inscription spatiale des phénomènes étudiés comme par exemple la pression humaine sur l'espace, l'influence de l'accessibilité au centre urbain sur les changements d'utilisation de l'espace (chapitre 9).

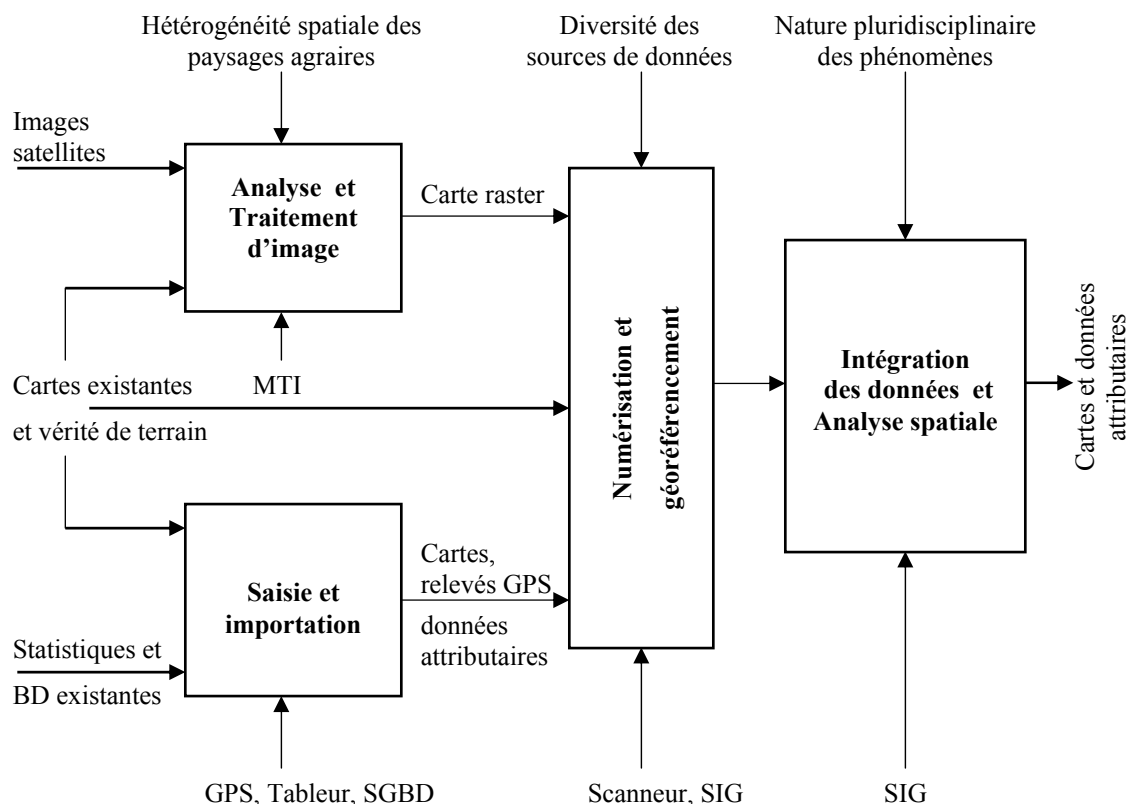


Figure 6.5 : Diagramme du module d'observation et d'analyse spatiale.

b) Module de diagnostic et de caractérisation

Le module de diagnostic et caractérisation est l'activité qui consiste à décrire la structure des unités d'occupation du sol, le fonctionnement du système d'utilisation de l'espace et les changements survenus au cours des dernières décennies. La finalité étant d'aboutir à mettre en exergue les dynamiques, les facteurs déterminants, les stratégies des acteurs, les règles d'évolutions ou logiques qui sous-tendent les processus qui opèrent dans l'espace (figure 6.6). Cette analyse de la dynamique du système agraire est basée sur une approche systémique et tire profit d'une combinaison des données et connaissances issues de sources diverses (chapitres 5, 7 et 8). La revue de la littérature et l'exploitation des données statistiques agricoles ou de recensement (population, cheptel), l'analyse historique du peuplement et de l'utilisation de l'espace, l'analyse d'images satellites ou de cartes existantes, permettent de formuler des hypothèses sur les logiques d'organisation de l'espace. La cartographie participative associée aux enquêtes auprès des populations rurales est un moyen réaliste de collecte des données complémentaires sur l'organisation de l'espace. Elle permet en même temps d'identifier les processus et les explications pertinentes sur la base des connaissances et perceptions paysannes (Bocco et Toledo, 1997).

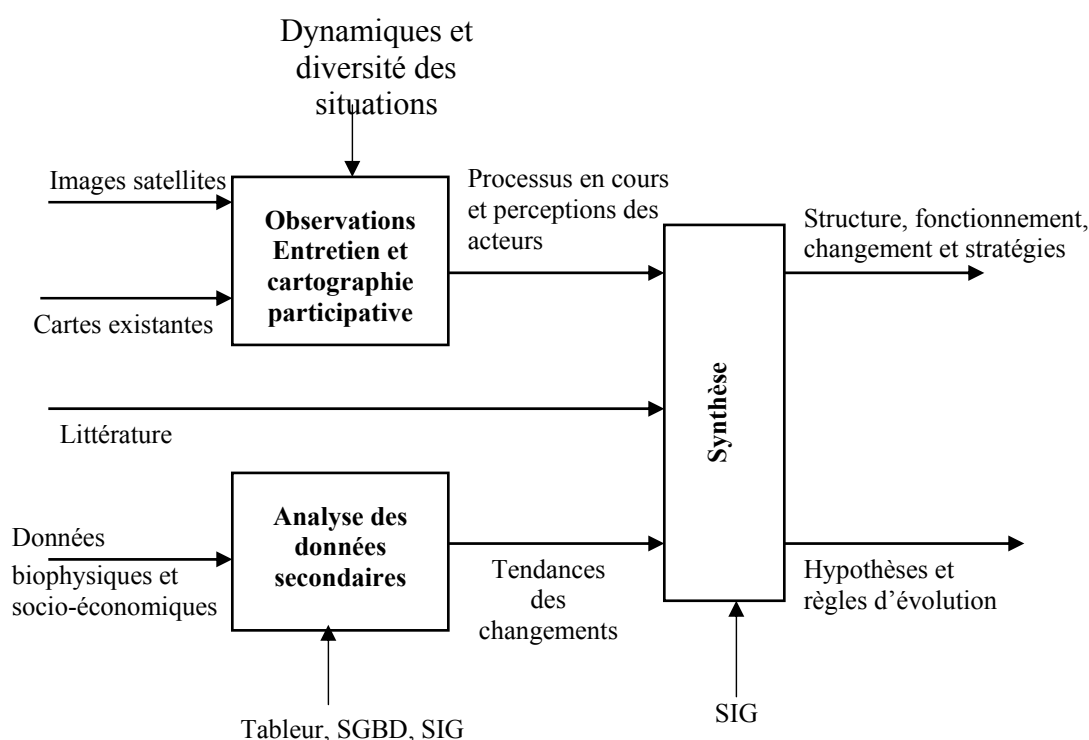


Figure 6.6 : Diagramme du module de diagnostic et de caractérisation.

c) Module d'explication et de prédiction des changements

Le développement de SMALL Savannah repose sur l'hypothèse selon laquelle l'analyse des dynamiques spatiales peut conduire à identifier et expliciter des processus pertinents des dynamiques agraires. La plupart des données ont une référence spatiale, les processus sont identifiés en prenant comme point de

départ leur inscription spatiale. Cette hypothèse est bien illustrée par la figure 6.7 qui montre que les données du module d'explication et prédiction sont principalement des cartes d'occupation du sol ou d'utilisation de l'espace et des cartes des facteurs potentiellement déterminants. Les fonctions d'analyse spatiale offertes par les SIG permettent de combiner ces données spatiales multi-dates et multi-thèmes afin de détecter les changements et de les relier aux facteurs déterminants potentiels (chapitres 7 et 8). Une analyse empirique de type régression statistique permet de quantifier les relations entre l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants et permet ainsi de prédire la distribution de l'utilisation de l'espace (chapitre 9). Les informations spatiales produites sont enrichies avec celles issues de la littérature et du terrain pour expliquer les changements d'utilisation de l'espace et montrer les stratégies des acteurs.

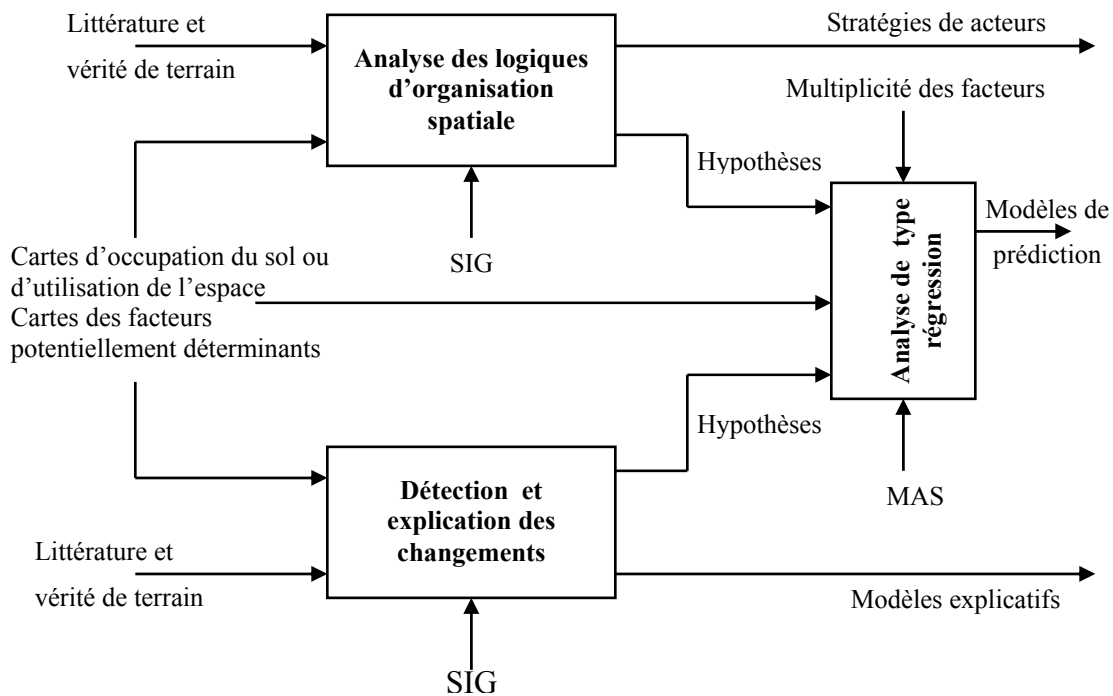


Figure 6.7 : Diagramme du module d'explication et de prédiction.

d) Module de modélisation dynamique et de simulation

L'une des caractéristiques importantes du SIE est la possibilité d'élaboration des scénarios de simulation des dynamiques d'utilisation de l'espace, dans la perspective d'anticiper les évolutions et proposer des alternatives de gestion de l'espace. La calibration du modèle dynamique s'effectue en utilisant les connaissances préalables sur les changements d'utilisation de l'espace fournies par le module de diagnostic - caractérisation. La formulation des scénarios s'appuie également sur les résultats du module de diagnostic - caractérisation concernant 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. La procédure d'allocation des changements prend en compte les probabilités de transition ainsi définies et les règles d'évolution qui traduisent des restrictions de changement ou une politique donnée de gestion de l'espace (chapitre 10). La principale sortie de ce

module est la future structure de l'utilisation de l'espace montrant la localisation et le moment où les conversions de l'utilisation de l'espace peuvent prendre place (Verburg et al., 2002).

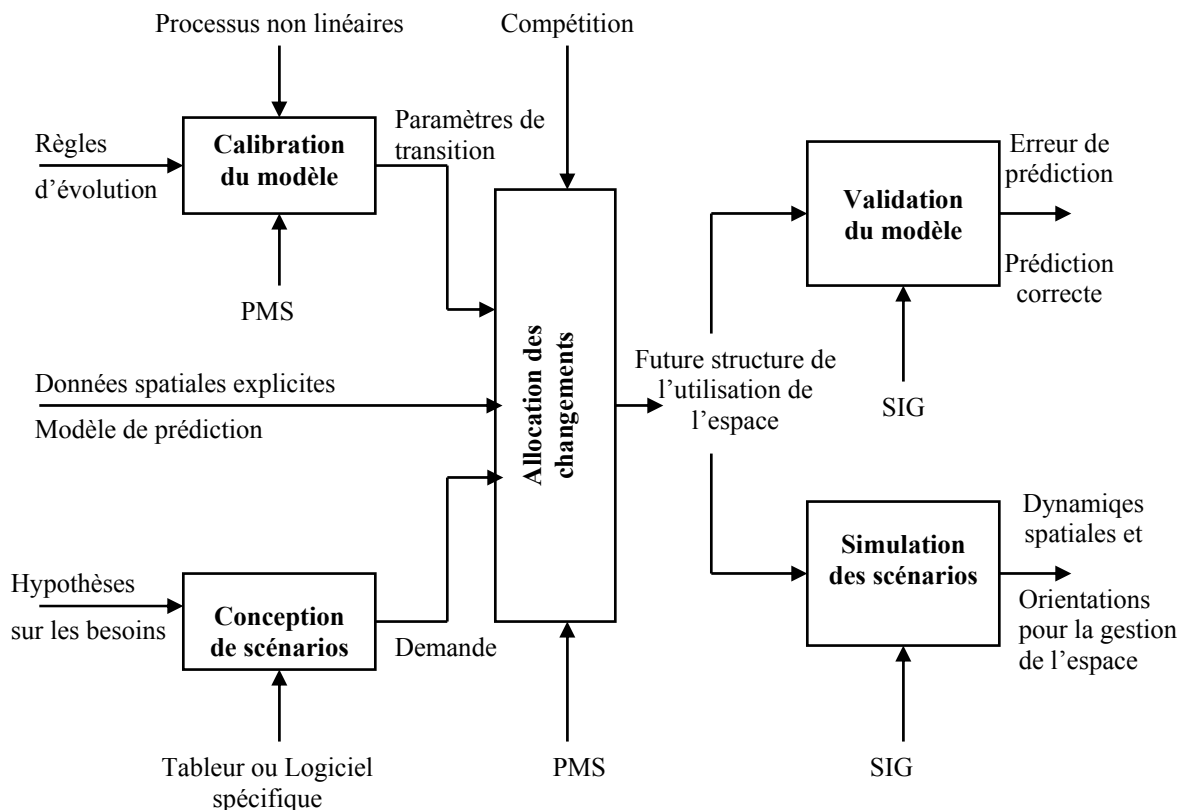


Figure 6.8 : Diagramme du module de modélisation dynamique et de simulation.

6.4.2. Le modèle objet de SMALL Savannah

Le modèle objet décrit l'ensemble des données manipulées, les relations sémantiques qui existent entre elles et les traitements appliqués. Le tableau 6.1 donne la liste des données manipulées, leurs sources et les variables dérivées à l'issue des traitements. On distingue principalement les données sur l'utilisation de l'espace et les données sur les facteurs déterminants d'ordre biophysiques, sociodémographiques et géoéconomiques. Toutes ces données ont été structurées et intégrées dans la base de données du SIE. On peut remarquer que ces données sont de sources différentes et par conséquent de nature et de formats variés (texte, image, carte, plan etc.). L'un des problèmes majeurs du développement des SIE opérationnels est l'inexistence d'un formalisme unique permettant de représenter et gérer cette diversité des types de données. Le modèle relationnel est l'un des premiers modèles de base de données et le plus largement utilisé. Il repose sur le formalisme « Entité-Association » (Nancy et al., 1992 ; Gardarin, 1998). Ce modèle souffre toutefois d'une simplicité qui rend difficile la description d'objets structurés ou complexes. Les faiblesses concernent notamment la modélisation de certains aspects des données géographiques telles que la composante spatiale, la dynamique des objets et la représentation multiple des objets. C'est ainsi qu'on a assisté à une évolution vers des modèles plus riches sémantiquement (Pornon, 1993 ; Fotsing, 1996). Le modèle « d'Aggrégation-Généralisation » est une extension du modèle « Entité-Association » avec les concepts d'agrégation et de généralisation qui correspondent respectivement à la

composition d'objets (« est composé ») et à la hiérarchie d'héritage (« est un type de »). Le modèle objet combine ces deux types de modèle et permet de décrire dans un même schéma, les données et les traitements. L'approche Orientée-Objet est une perspective intéressante pour représenter les objets complexes et décrire les structures hiérarchiques adaptées à la représentation multiple (Bouzeghoub et al., 1997). De nouvelles approches consistent à enrichir les modèles existants pour les adapter aux données géographiques (Caron et Bédard, 1993). Le formalisme utilisé dans cette section pour décrire les données combine et adapte les concepts du modèle Entité-Association et du modèle Orienté-Objet mais, la mise en oeuvre dans le système informatique utilise le modèle relationnel.

Nature des données	Sources	Variables	Description
<i>Biophysiques</i>			
Relief	USGS, 1998	Altitude	Altitude
		Slope	Pente
Types, aptitudes et potentialités des sols	Brabant et Gavaud, 1984 et 1985	Soilpot	6 variables de potentialité agricoles
		Soilsorg	6 variables d'aptitude au sorgho
Pluviométrie	SODECOTON, 2001	Rainfall	Pluviométrie moyenne 1994-1998
<i>Socio-démographiques</i>			
Population par village	RGPH, 1987	Density	Densité de population
		Rurpot87	Indice de pression population rurale
		Rurpot99	Indice de pression population rurale
		Poppot87	Indice de pression population totale
		Poppot99	Indice de pression population totale
Distribution ethnique	Seignobos et Iyébi-Mandjeck, 2000	Fulbe	Pourcentage de Fulbé
		Mofu	Pourcentage de Mofu
		Guiziga	Pourcentage de Guiziga
<i>Géographiques et économiques</i>			
Réseau hydrographique	IGN, 1973	Distriver	Distance aux cours d'eau
Infrastructures routières et Marchés	IGN, 1973	Distroad	Distance à la route
		Travelc	Temps déplacement à la ville principale
		Travelu	Temps déplacement aux centres urbains
		Travelm	Temps de déplacement aux marchés
<i>Utilisation de l'espace</i>			
Recensement du cheptel	MINEPIA, 2002	Livestock	Densité du cheptel en UBT/km ²
Utilisation de l'espace	Images SPOT Chapitre 8	LU1987	6 variables d'utilisation en 1987
		LU1997	6 variables d'utilisation en 1999
		LUchange	6 variables des changements

Tableau 6.1 : Ensemble des données et variables obtenues à l'issue des traitements.

Les données manipulées portent sur l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants. Ces données peuvent être regroupées en quatre thèmes principaux dont les sous-modèles correspondant sont décrits dans les paragraphes suivants: l'occupation du sol et l'utilisation de l'espace, les facteurs biophysiques, les facteurs sociodémographiques et les facteurs géoéconomiques. L'ensemble des données a une référence spatiale qui est décrite implicitement dans les modèles. Les méta-données (échelle, source, nature des données) sont représentées comme des propriétés et nous avons introduit à cet effet une association (dérivé de) qui permet de décrire des versions différentes du même objet. Dans le diagramme objet, une flèche est orientée vers l'entité dérivée et le traitement appliqué est une propriété de cette association (voir les figures de 6.9 à 6.11). Les méthodes de traitement indiquées dans les modèles ne sont pas décrites dans ce chapitre. Elles peuvent être trouvées aux chapitres 3 et 8, pour les méthodes d'analyse d'image et aux chapitres 5, 9, pour les modèles de dérivation des variables correspondant aux facteurs déterminants.

a) Sous-modèle de données sur l'occupation du sol et de l'utilisation de l'espace

Le sous-modèle de données sur l'occupation du sol et l'utilisation de l'espace représenté à la figure 6.9, comprend : les données d'occupation du sol et d'utilisation de l'espace dérivées directement des images satellites ou de photographies aériennes, les données issues des statistiques agricoles et les données du recensement du cheptel (MINAGRI, 1999 ; MINEPIA, 2002).

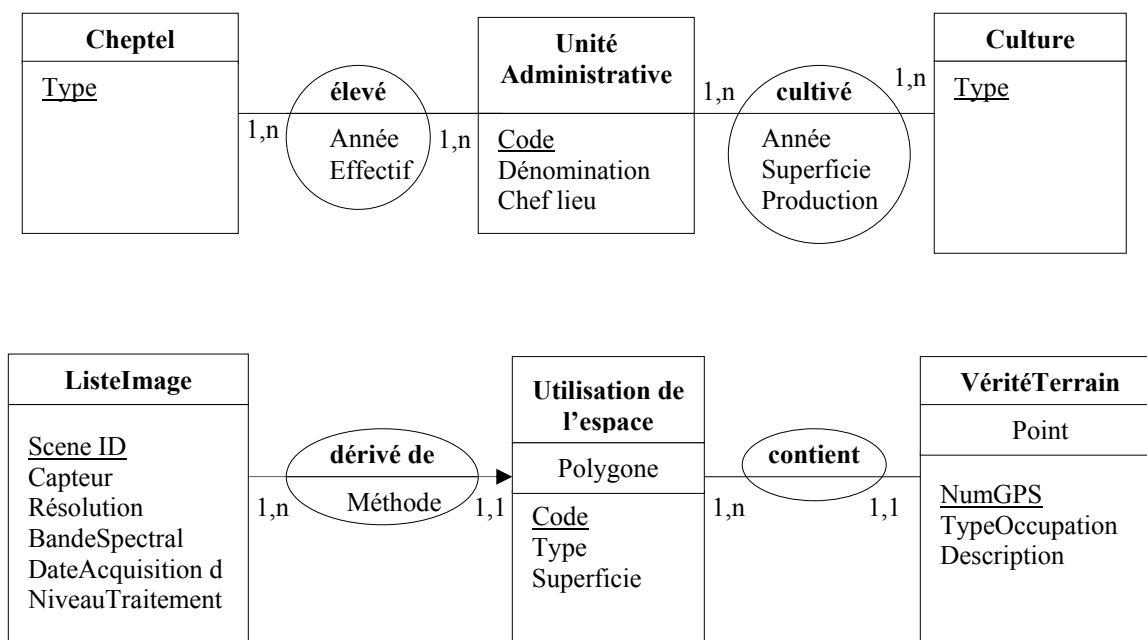


Figure 6.9 : Exemples de structure de données sur l'occupation et l'utilisation de l'espace. La méthode de dérivation des structures d'utilisation de l'espace est décrite au chapitre 3. Les valeurs (1,n) correspondent aux cardinalités minimales et maximales telles que définies dans le modèle Entité-Association.

Les différentes méthodes d'extraction des unités d'occupation du sol sont décrites au chapitre 3. Chacune des images satellites brutes ont subi des opérations de prétraitement telles que la correction géométrique, l'amélioration de contraste et les compositions colorées. La qualité des données d'utilisation de l'espace dépend du choix des images et des traitements numériques qui sont ensuite appliqués. En effet, à partir des images, les unités d'occupation du sol sont extraites par une combinaison de différentes méthodes

automatiques et manuelles parmi lesquelles les classifications multispectrales, les indices de végétation, la morphologie mathématique, la photo-interprétation et la cartographie participative. Les points GPS issus des campagnes de terrain sont intégrés dans la base de données et servent pour la validation de la nature des unités d'occupation du sol (chapitre 8). La carte des localités permet de mieux repérer les structures et les unités d'occupation du sol. Les données de statistiques agricoles, au niveau des unités administratives, portent sur la production, les surfaces mises en culture et les rendements de chaque type de culture et sont disponibles par année. Les données sur l'effectif du cheptel sont également disponibles pour chaque année à l'échelle des unités administratives (chapitre 5). La valeur du type de cheptel peut être bovin, ovin ou caprin. La mise à jour de cette partie de la base de données et l'amélioration du dispositif de collecte de l'information permettrait de suivre et comparer l'évolution de la production agricole et du cheptel entre les différentes zones.

b) Sous-modèle de données sur les facteurs biophysiques

Les données sur les facteurs biophysiques qui sont actuellement disponibles concernent le relief, les sols et la pluviométrie. Pour chacun de ces thèmes, des variables plus pertinentes sont dérivées des données cartographiques de bases (figure 6.10).

La précision de la carte du relief est améliorée et une carte de pente est ensuite dérivée. La carte initiale du relief est un Modèle Numérique de Terrain (MNT) provenant de la base de données hydrologique avec une résolution d'un kilomètre (USGS, 1998). L'altitude et la pente sont les deux variables dérivées de ce MNT et utilisées dans le modèle de changement d'utilisation de l'espace (chapitre 9). En effet, la résolution initiale d'un kilomètre ne permet pas d'avoir une carte de pente assez réaliste. Elle affiche des pentes nulles sur des plages de 1km qui forment des plateaux artificiels sur des hautes altitudes. La solution à ce problème a consisté à faire une interpolation pour améliorer la précision du MNT (6.9a). On obtient un résultat satisfaisant compte tenu de la nature du relief de la région qui présente très peu de changements du sens de la pente sur de faibles distances comme 1 km.

Une carte des potentialités agricoles des terres et une carte d'aptitude des terres à la culture du sorgho de contre saison ont été dérivées en s'appuyant sur les propriétés physiques des sols et leurs aptitudes aux cultures (6.9b). La carte de base des types de sols est numérisée et intégrée dans le SIG. Pour la carte des potentialités agricoles, les unités de la carte des sols ont été regroupées en fonction de la combinaison de leur niveau d'aptitude pour les cultures pluviales et pour les cultures irriguées (chapitre 5). Une carte d'aptitude des sols à la culture du sorgho de contre saison a été créée en s'appuyant sur les caractéristiques physiques des différents types de sol (chapitre 7).

Les données pluviométriques sont saisies sous forme de tableaux pour chaque station. Les cartes de point correspondantes sont créées par géocodage avec une carte de localisation des stations (6.9c). La carte obtenue est utilisée pour dériver une carte d'isohyètes par interpolation (chapitre 5). A l'échelle de la région de l'Extrême Nord du Cameroun, une carte des cours d'eau est obtenue par digitalisation de la carte topographique. Les deux problèmes que pose cette carte obtenue sont la faible précision et l'absence de mise à jour. A l'échelle de la zone de référence, les traitements des images SPOT sont utilisés pour dériver des cartes plus précises et plus récentes du réseau hydrographique, ici relativement mobile. La morphologie mathématique est utilisée et une digitalisation manuelle est effectuée pour compléter les branches de réseau non détectées automatiquement (chapitre 3).

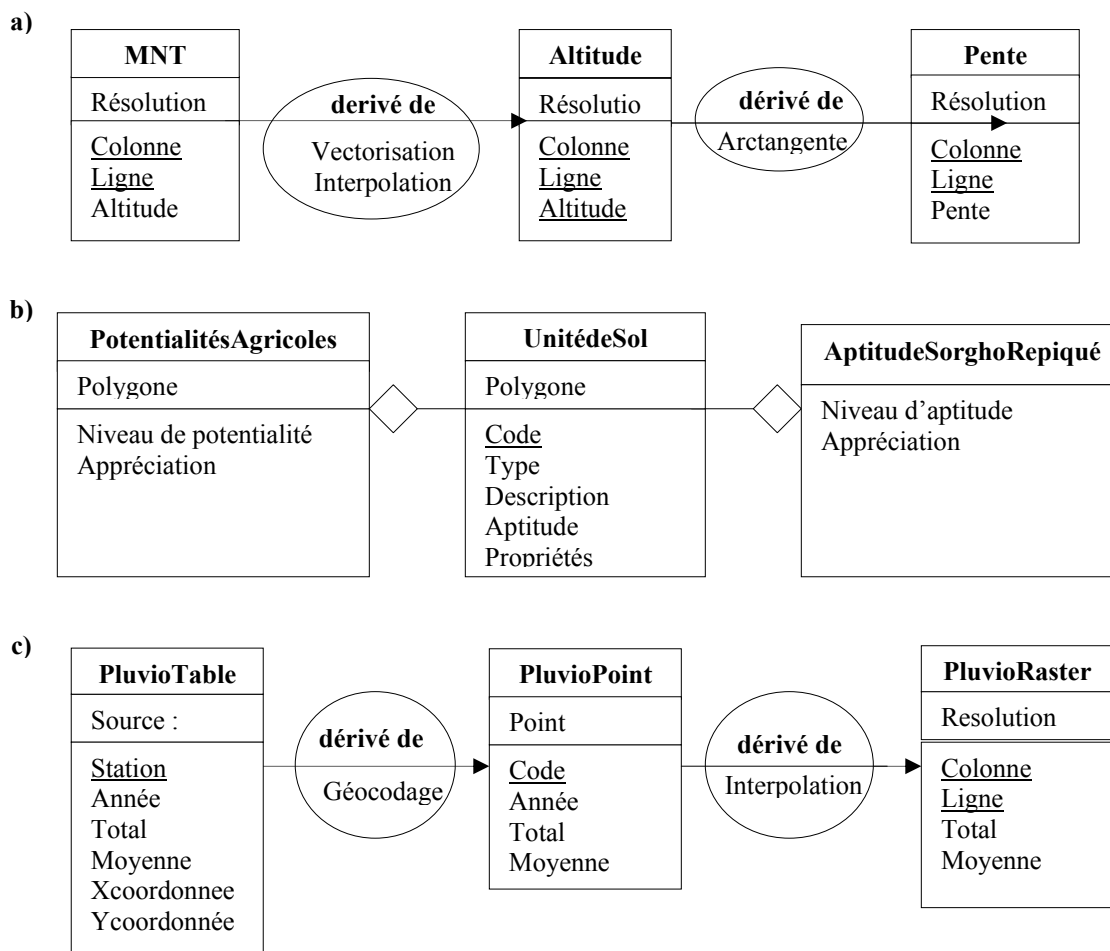


Figure 6.10 : Exemples de structure de données sur les facteurs biophysiques. Les détails sur les fonctions d'interpolation et de calcul de pente sont décrits au chapitre 9. Les unités d'aptitude et de potentialité des sols sont composées d'unité de type de sol (voir chapitres 5 et 7).

c) Sous-modèle de données sur les facteurs sociodémographiques

Les données sociodémographiques sont très importantes dans les études sur les changements de l'utilisation de l'espace, en particulier pour estimer la demande ou la pression sur les ressources agricoles ou pastorales. Les données sociodémographiques de base comprennent les données de population et la répartition ethnique (figure 6.11). Les données de population proviennent du dernier recensement général de la population du Cameroun qui date de 1987. Cette source de données présente deux problèmes pour son exploitation : l'échelle de collecte et l'absence de référence spatiale. Sur le plan administratif, le pays est divisé en provinces, une province est divisée en départements, un département en arrondissements, un arrondissement en villages et les villages en quartiers. Ce sont à ces échelles que l'utilisateur souhaiterait obtenir les données mais elles ne sont disponibles que pour des zones de dénombrement (ZD), unité choisie pour le recensement. Les informations disponibles que l'on peut extraire de ces statistiques sont, le nombre de ménage, la population totale d'une ZD et la nature de la ZD (urbain ou rural). Au niveau du village et du quartier, le nombre de ménages est également connu. La structure de données définie permet de calculer l'effectif de la population pour un village donné dans les différents cas notamment pour

les ZD regroupant plusieurs localités ou pour les localités découpées en plusieurs ZD (Yonta, 2001). Les données de population par village sont utilisées pour dériver une carte de densité de population (6.11a) et une carte des zones d'influence potentielle de la population autour des zones d'habitation (chapitre 9). La carte de base de la distribution ethnique est issue de l'atlas de la province de l'Extrême Nord (Seignobos et al., 2001). Chaque ethnie est représentée par une couleur et les effectifs sont représentés par des symboles proportionnels (100 ou 1000 habitants). La digitalisation de cette carte a permis de créer une carte de point dont la structure comprend les attributs correspondant à l'ethnie et l'effectif. Une jointure spatiale est ensuite effectuée entre la couche de point et une couche contenant des grilles carrées et dont la structure de données associée comprend les attributs, effectif, densité et pourcentage de chaque ethnie par rapport à la population totale (6.11b).

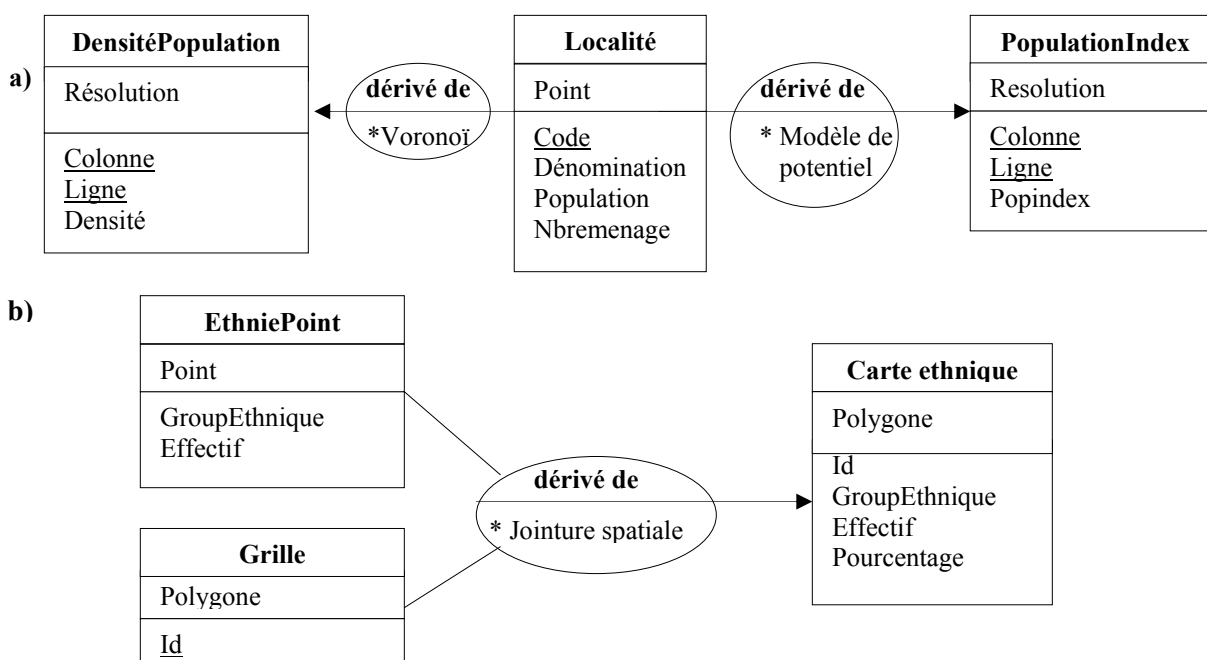


Figure 6.11 : Exemples de structure de données sur les facteurs socio-démographiques. *Le modèle de potentiel est décrit en détail au chapitre 9. La fonction de Voronoï et la jointure spatiale sont mises en oeuvre sous le SIG.

d) Sous-modèle de données sur les facteurs géoéconomiques

Les facteurs géoéconomiques pris en compte dans le modèle de simulation sont représentés par une évaluation de l'accessibilité aux marchés et aux principaux centres urbains. Les données de base utilisées pour dériver les variables d'accessibilité sont constituées des cartes de l'infrastructure routière, du réseau hydrographique et de l'utilisation de l'espace. Chaque route est caractérisée par les propriétés suivantes : la présence de bitume, le type de la route, la nature et l'importance politico-économique. Le modèle d'accessibilité décrit au chapitre 9 permet de calculer une carte du temps de déplacement de chaque position de l'espace vers une destination donnée : la ville, le marché ou le centre urbain le plus proche (figure 6.12).

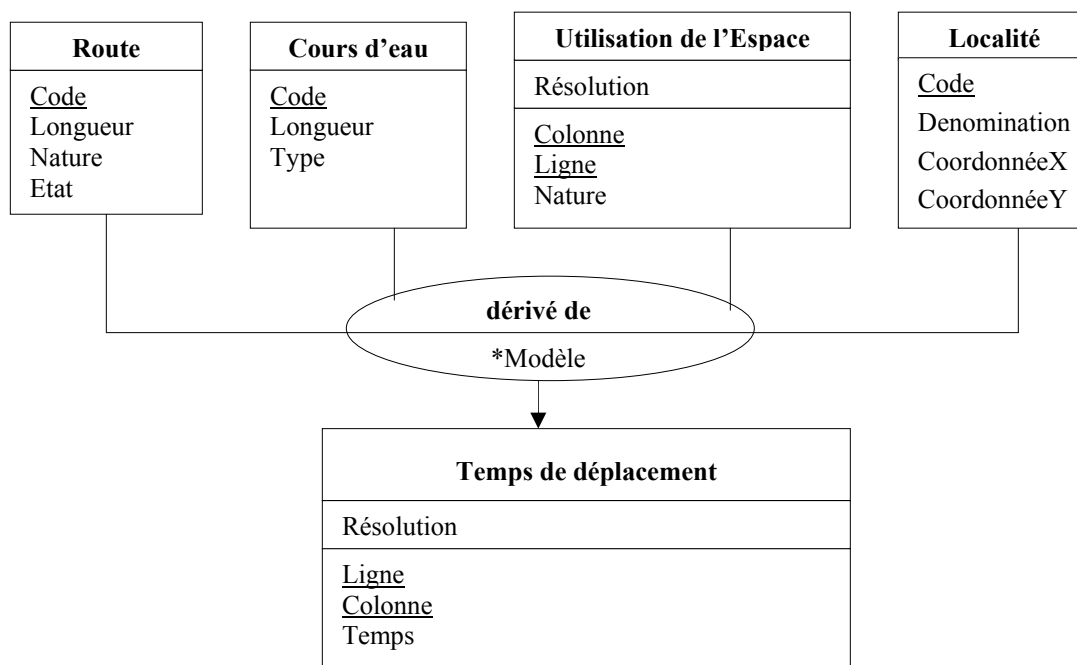


Figure 6.12 : Exemple de structure de données sur les facteurs géoéconomiques. * Le modèle d’accessibilité est décrit en détail au chapitre 9.

6.4.3. Le modèle du système informatique de SMALL Savannah

Dans la section précédente, les données et les traitements ont été décrits sans aucune référence aux outils logiciels nécessaires pour la mise en œuvre. Le modèle du système permet de préciser l’architecture du système informatique et ses relations avec l’organisation des ressources humaine, matérielle et logicielle, nécessaires à son fonctionnement. Le modèle du système est représenté par un diagramme montrant les différents sous-systèmes et leurs interrelations. Un sous-système est un ensemble de classes et de fonctions qui présentent une certaine cohésion, c’est-à-dire qu’il regroupe les parties du système qui ont les mêmes fonctionnalités et utilisent les mêmes structures de données, les mêmes types de matériel ou les mêmes composants logiciels. Le formalisme de représentation est un graphe dont les nœuds sont les sous-systèmes et les arcs sont les relations de dépendances logiques ou fonctionnelles. Les relations entre les utilisateurs et les sous-systèmes peuvent être représentées. Les liens entre les différents sous-systèmes sont de type fonctionnel et correspondent aux échanges de données nécessaires au fonctionnement de l’ensemble du système. .

Le diagramme du système informatique de SMALL Savannah est composé de cinq sous-systèmes (figure 6.13). Chaque sous-système assure une fonction spécifique dans le processus de traitement et l’implémentation physique est réalisée avec un ou plusieurs logiciels appropriés. On distingue cinq sous-systèmes principaux parmi lesquels deux assurent principalement le stockage et la gestion des données géographiques. Les trois autres sous-systèmes assurent les tâches d’analyse statistique, de simulation des dynamiques et de visualisation des résultats.

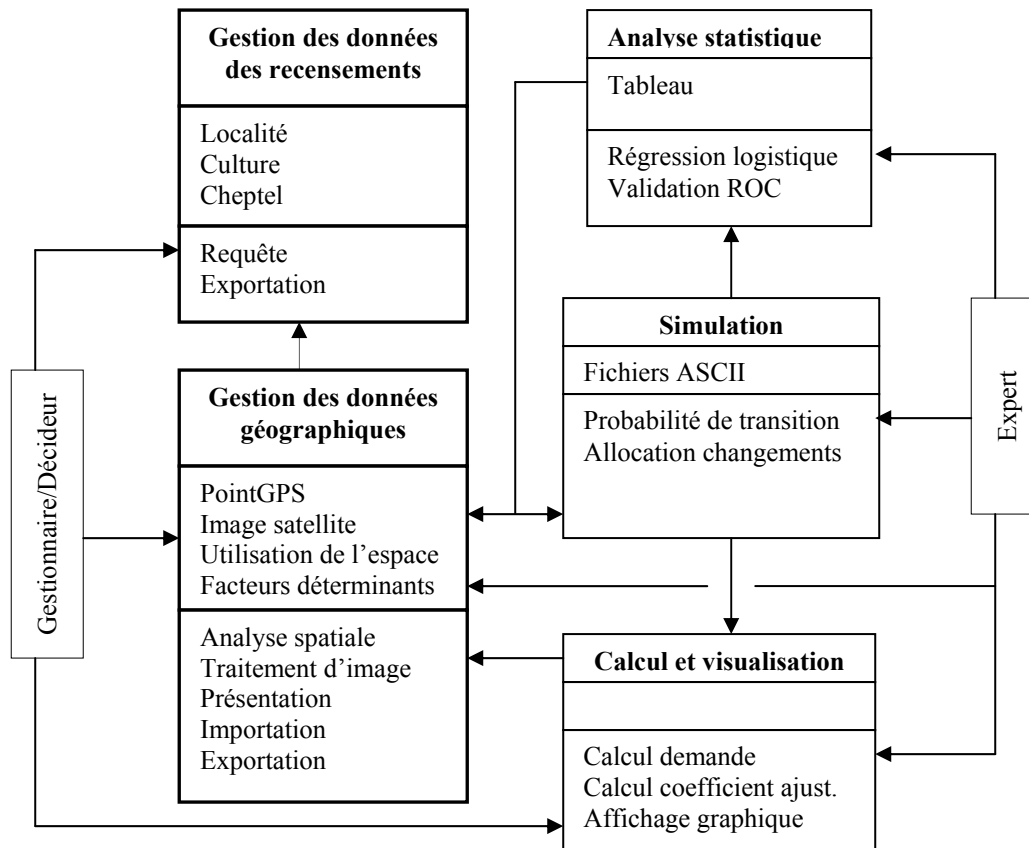


Figure 6.13 : Diagramme du système informatique de SMALL Savannah. Les flèches permettent de montrer le sens d'émission de la requête du sous système client vers le sous système serveur des données.

a) Sous-système de gestion des données des recensements

Ce sous-système assure la gestion des données de recensement de la population et du cheptel, les statistiques agricoles (surfaces cultivées) par unité administrative. Le SGBD ACCESS et le tableur EXCEL sont utilisés respectivement pour structurer ces données et implémenter des requêtes permettant d'estimer la population de chaque village. Une base de données géographique sur les villages de la région a été utilisée pour effectuer un géocodage des données de population.

b) Sous-système de gestion des données géographiques

Ce sous-système assure les fonctions d'acquisition, de traitement et d'intégration des données géographiques de source et de nature diverses. Les images satellites ont été analysées sous le logiciel ILWIS. Les points GPS des vérités terrain ont été importés sous le logiciel de SIG MapInfo. Les images et les cartes d'occupation du sol au format vecteur dérivées des traitements d'images sont également géoréférencées sous MapInfo avec l'ensemble des cartes des données biophysiques, socio-démographiques et d'infrastructure. Les opérations d'analyses spatiales au format raster sont élaborées sous le logiciel de SIG Arcview.

c) Sous-système d'analyse statistique

Ce sous-système assure une fonction d'exploration des relations quantitatives entre les changements d'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants. Les données spatiales au format raster sont converties sous forme d'un tableau où chaque ligne correspond aux données d'une cellule et chaque colonne aux données d'une variable (utilisation de l'espace ou facteur déterminant). Le logiciel SPSS est utilisé pour construire des modèles de régression multiple entre chaque classe d'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants appropriés.

d) Sous-système de calcul et visualisation des paramètres

Ce sous système fait appel aux possibilités d'un tableur pour calculer certains paramètres nécessaires à la simulation ou pour visualiser graphiquement certains résultats de la simulation. Le logiciel Excel permet par exemple d'effectuer les tâches suivantes :

- l'estimation de la demande annuelle pour chaque type d'utilisation de l'espace pour la période de simulation,
- le calcul des coefficients d'ajustement pour la validation des structures d'utilisation de l'espace issues du modèle de simulation,
- la visualisation de la courbe des coefficients d'ajustements entre les scènes comparées,
- la visualisation graphique de l'évolution des superficies de chaque type d'utilisation pendant la période de simulation.

e) Sous-système de simulation des dynamiques spatiales

Ce sous-système implémenté sous la plateforme de modélisation CLUE-S, permet d'effectuer les projections des changements de l'utilisation de l'espace en s'appuyant sur différents scénarios d'évolution possible dans un avenir proche (Verburg et al., 2002). Les données cartographiques et les paramètres nécessaires à la simulation sont fournis à ce sous-système sous forme de fichier ASCII.

f) Principaux utilisateurs du système

Dans sa version actuelle, le système peut être utilisé dans le cadre d'un observatoire des dynamiques agraires et du développement rural pour mieux comprendre les dynamiques et explorer les scénarios d'évolutions possibles. Les utilisateurs potentiels sont les acteurs impliqués dans la planification et la gestion de l'espace. Le système peut également être utilisé par des scientifiques pour tester des scénarios d'évolution possible de la trajectoire des changements d'utilisation de l'espace. Deux principaux types d'utilisateur peuvent interagir avec le système : le gestionnaire ou décideur et l'expert (figure 6.13). Le gestionnaire ou décideur peut consulter les bases de données ou les résultats des simulations sous forme graphique ou de cartes. Les interventions de l'expert dans le système restent très déterminantes pour l'interprétation des résultats intermédiaires et le déclenchement des traitements successifs (analyse d'image et exploration statistiques des facteurs déterminants). Il intervient également pour la mise en forme des données nécessaires au calcul de certains paramètres, à la réalisation des graphiques, et à l'exécution des scénarios de simulation.

6.5. Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons proposé des éléments de définition et de spécification des SIE en les illustrant sur le cas de SMALL Savannah. L'architecture du système décrit s'appuie sur trois modèles conceptuels qui fournissent trois points de vue complémentaires du système : le modèle objet, le modèle fonctionnel et le modèle du système informatique. Le modèle fonctionnel montre que le SIE SMALL Savannah fournit quatre principales fonctionnalités : l'observation et l'analyse spatiale, le diagnostic et la caractérisation du système agraire, l'explication et la prédiction, la modélisation dynamique et la simulation. Le modèle objet met en exergue plusieurs exemples de données complexes qui nécessitent une extension des formalismes existants (modèle entité association et modèle objet) pour leur représentation. Il s'agit par exemple des objets spatiaux, les méta-données et les différentes versions d'un même objet. Le modèle du système informatique est composé de cinq sous-systèmes qui correspondent à différents outils logiciels qui doivent échanger des informations. Sur le plan conceptuel, le développement du SIE SMALL Savannah est une contribution à la proposition de méthodes de développement adaptées pour les SIE. La structure du SIE proposée est un exemple qui peut être utilisé dans le cadre de travaux ultérieurs pour une spécification plus formelle. Les éléments de démarche proposés constituent des axes pour guider l'adaptation et l'enrichissement des méthodes de conception existantes afin de prendre en compte les contraintes de cette nouvelle génération de SI. Une attention particulière devrait également être portée vers les aspects organisationnels du SIE qui n'ont pas été abordés explicitement dans ce travail.

Les chapitres suivants sont consacrés à des exemples d'applications qui illustrent les résultats de la mise en œuvre de chaque module de SMALL Savannah qui a été présenté dans ce chapitre. Les chapitres 7 et 8, portent principalement sur le diagnostic et la caractérisation du système agraire et de ses changements à différentes échelles. Les données intégrées sous le SIG (occupation du sol, recensement, statistiques agricoles, cartes) et l'analyse spatiale sont utilisées à cet effet. Le chapitre 9, décrit comment l'analyse spatiale permet d'explorer les relations entre l'utilisation de l'espace et les potentiels facteurs déterminants les changements. Le chapitre 10 est une application du modèle de simulation développé pour explorer les trajectoires des changements d'utilisation de l'espace dans un avenir proche. Sur le plan technique, on constate que l'utilisation cloisonnée des outils logiciels dans les SIE ne permet pas de fournir une vision d'ensemble des données et des traitements, conduisant ainsi au développement d'applications lourdes ou inadaptées. Les développements ultérieurs de ce Système d'Information doivent s'orienter vers une intégration plus avancée de ces différents sous-systèmes au sein d'un même système informatique afin de tirer profit des fonctionnalités offertes par les composants logiciels existants. Les techniques d'échange d'information ou de réutilisation d'applications devraient être explorées dans cette perspective. Toutefois, un problème important reste conceptuel dans la mesure où il faut identifier les besoins prioritaires de communication et spécifier les structures de données à échanger, ainsi que les composants logiciels qui devront assurer le contrôle des données et leur stockage. En conclusion, cette expérience illustre les principaux enjeux liés aux méthodes de conception et de mise en œuvre des SIE et ouvre des perspectives de recherche dans ce domaine. Il s'agit par exemple de la spécification formelle des SIE, l'adaptation des méthodes existantes pour prendre en compte les propriétés propres à ces systèmes.

Partie 3

Mise en oeuvre du Système d'Information sur l'Environnement SMALL Savannah

Chapitre 7. Analyse spatiale de l'extension récente du sorgho de contre saison en zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun.

Chapitre 8. Analyse spatiale des changements d'occupation du sol dans la région autour de Maroua.

Chapitre 9. Analyse spatiale et quantitative des facteurs déterminant l'utilisation de l'espace dans la région autour de Maroua.

Chapitre 10. Un modèle intégré pour explorer les trajectoires des changements d'utilisation de l'espace dans la région autour de Maroua.



Photo 7. Une famille dans le village de Mowo entrain de sarcler une parcelle de sorgho de contre saison sur un site en microtopographie.

Chapitre 7. Analyse spatiale de l'extension récente du sorgho de contre saison en zone de savanes de l'Extrême nord du Cameroun

Résumé

Le sorgho de contre saison est une culture vivrière qui joue un rôle important dans le maintien de la sécurité alimentaire en zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. Au cours des deux dernières décennies, on a observé un intérêt croissant des producteurs pour cette culture qui a conduit à la mise en place d'un système extensif avec des conséquences remarquables sur la gestion durable du système d'utilisation de l'espace. Le Système d'Information SMALL Savannah est utilisé comme cadre conceptuel et outil pour analyser les causes et les conséquences de cette dynamique. La culture a renforcé sa place dans les zones de production traditionnelles et a connu une extension vers de nouvelles zones où la culture n'était pas pratiquée autrefois. Cette extension a été possible grâce aux conditions favorables du milieu physique et une forte demande impulsée par un contexte où la sécurité alimentaire demeure incertaine. Les défrichements importants et la réduction de la jachère ont conduit à une destruction importante du potentiel ligneux, une dégradation des sols, et une réduction de la disponibilité des pâturages. Il s'est développé autour de la production et de la commercialisation du sorgho repiqué une généralisation de la rente foncière et de la spéculation. Les stratégies des acteurs face à ces mutations diffèrent en fonction du contexte local, mais la réponse la plus observée reste principalement dominée par des pratiques extensives et une logique de satisfaction des besoins alimentaires. Toutefois, les signes d'intensification et de passage à une culture de rente sont perceptibles et se traduisent par une complémentarité avec le système d'élevage et l'implication des acteurs urbains. Le contexte agricole régionale porte à croire que le rôle de cette culture dans l'agro système va se renforcer au cours du temps. Prédire les impacts liés à la future expansion de cette culture est d'une importance essentielle pour le développement de cette région. Ceci nécessite une compréhension plus fine des règles d'accès à la terre, des stratégies de mise en valeur de l'espace et des interactions entre les différents acteurs impliqués.

Mots clés : sorgho de contre saison, système agraire, analyse diachronique et multi-échelle, facteurs déterminants, intensification

Abstract

Dry season sorghum is a food crop, which plays an important role in maintaining food security in the savannah area in the far North of Cameroon. During the last two decades, there has been an increasing interest of producers for this food crop which led to extensive land use practices with remarkable consequences on the sustainable management of different land uses. SMALL Savannah is used as a conceptual framework and a tool for analysing the causes and consequences of this dynamic. The crop has reinforced its position in traditional production areas and has expanded into new areas where it was not produced in the past. This recent extension has mainly been driven by an environment, which offers favourable growing conditions and generates a high demand for food in a context where food security remains uncertain. The large scale land clearing and the reduction of fallows has led to an important destruction of woody vegetation, soil degradation and a reduction of pasture availability. The crop's expansion has also encouraged land renting and speculation, in the production and commercialisation process. Actor's strategies to face the ongoing changes vary according to local context but the most observed response is mainly dominated by extensive land use practices and food subsistence as the main production motivation. However, there are emerging signs of intensification characterised by a beneficial integration with livestock and the increased involvement of urban actors. The regional agricultural context favours a more important role of dry season sorghum in the land use system. Predicting the impacts associated with its future expansion is a key to the development of the region. This requires a detail understanding of land tenure rules, land use strategies and interactions between all the actors involved.

Key words: dry season sorghum, agrarian system, diachronic and multiscale analysis, driving factors, intensification

7.1. Introduction

Les céréales jouent un rôle important dans le système de production agricole des zones de savane du Cameroun et du Tchad (Raimond, 1999). En particulier, la place que le sorgho de contre saison ou sorgho repiqué occupe dans le calendrier agricole dans la région de l'Extrême Nord du Cameroun, fait de celle-ci une culture importante dans la stratégie de maintien de la sécurité alimentaire (Seignobos, 1998, Fotsing et Mainam, 2003 ; Mathieu et al., 2003). Au cours des deux dernières décennies, on a observé un intérêt croissant des producteurs ruraux et urbains pour cette culture. Le contexte régional caractérisé par un accroissement rapide de la population qui a pour corollaire l'augmentation des besoins vivriers et la diversification des besoins économiques a fait de cette culture une composante essentielle de l'agro système des plaines du Diamaré, de Kaélé et de Mora dans l'Extrême Nord du Cameroun. Des quantités de sorgho repiqué de plus en plus importantes sont utilisées en régions non musulmanes pour la fabrication de la bière de mil, appelée « bilbil » en langue locale. En effet, la production de sorgho repiqué s'insère de plus en plus dans les grands circuits de commercialisation régionaux et permet de compléter le revenu des ménages. Plusieurs marchés de commercialisation se développent et prennent de l'ampleur dans les zones de production traditionnelle comme Maroua, Bogo, Salak, Moutouroua, etc. Dans la plaine du Mayo Danaï par exemple, l'appauvrissement des sols et l'indisponibilité des terres adaptées à cette culture sont à l'origine des moments de famine. Des groupes de producteurs se constituent, de plus en plus encouragés par des organismes de développement pour effectuer des stocks et garantir ainsi leur autosuffisance alimentaire et/ou l'approvisionnement des marchés en direction des zones déficitaires. Les risques liés à la production encouragent les grands producteurs ou acheteurs à constituer des stocks importants pour les revendre en période de soudure. Il s'est ainsi développé autour de la production et de la commercialisation du sorgho repiqué une généralisation de la spéculation et de la rente foncière.

La principale stratégie des populations pour répondre à la demande croissante en sorgho repiqué a consisté principalement à une augmentation des superficies, conduisant à la mise en place d'un système extensif. Les pratiques culturales caractérisées par des défrichements complets avant la mise en culture et la rareté des jachères (10 à 15 ans de culture continue) ont des conséquences remarquables sur la gestion durable des espaces agropastoraux, en particulier sur les ressources ligneuses (Fotsing et al., 2006). Le développement de la culture du sorgho de contre saison impose donc de nouvelles contraintes socio-économiques, agronomiques et environnementales dont la compréhension est déterminante pour garantir la sécurité alimentaire et assurer une gestion intégrée de l'espace dans la région. Dans ce chapitre, le Système d'Information SMALL Savannah est utilisé comme cadre conceptuel et outil pour analyser les causes et les conséquences de cette dynamique à différentes échelles spatiales. Le contenu du chapitre est structuré comme suit : la section suivante rappelle le contexte de l'étude, les objectifs et la méthodologie d'analyse suivie ; 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 l'application de chaque module de SMALL Savannah à cette étude de cas. La section 3 fournit des connaissances sur les spécificités des systèmes agraires à base de sorgho repiqué issue de l'activité de diagnostic et de caractérisation. La section 4 décrit d'abord le processus d'extension de la culture à l'échelle régionale en s'appuyant sur la diversité des sources données offertes par la base de données de SMALL Savannah (Observation et analyse spatiale). Cette section décrit ensuite les conséquences et les stratégies des acteurs

dans les différents contextes (Explication). La section 5 est consacrée aux hypothèses formulées sur les facteurs et les trajectoires d'évolution de ce processus de changement d'utilisation de l'espace. La section 6 fait une synthèse des leçons substantielles et méthodologiques issues de cette application.

7.2. Contexte et cadre méthodologique de l'étude

Cette section donne quelques informations générales sur le sorgho de contre saison, rappelle la problématique de recherche et le cadre méthodologique de cette étude.

7.2.1. Généralités sur le sorgho de contre saison et problématique

Le sorgho de contre saison est une céréale qui est repiquée en début de saison sèche sur des terres très argileuses appelées vertisols ou karals en langue locale. La plante utilise l'eau stockée dans le profil de ces sols argileux pour assurer sa croissance. On distingue deux principales familles : le Baburi et le Muskuwaari. Le Baburi est la famille des sorghos repiqués à la fin de la saison des pluies sur des terres argileuses plus ou moins engorgées. C'est une famille de sorghos intermédiaires entre les sorghos de saison de pluies et les sorghos de saison sèche. Le Baburi nécessite un cycle plus long (environ 200 jours) que celui du Muskuwaari qui n'exige qu'environ 105 jours. Il est semé en pépinière en mi-juillet et repiqué en août. La récolte se fait en pleine saison sèche (janvier/février) tout comme le Muskuwaari. Le Baburi, venu du sud ou du sud ouest, est cultivé presque uniquement dans les plaines de Kaélé et Yagoua où les superficies sont restées jusqu'alors très marginales. Celles-ci sont estimées à environ 11 900 ha sur toute la zone cotonnière de la province (SODECOTON, 2001). Dans la suite de ce chapitre l'appellation Muskuwaari peut être étendue à sorgho de contre saison car cette famille représente un peu plus de 95% des sorghos de contre saison de la zone d'étude.

Le sorgho repiqué est donc une culture céréalière qui permet de valoriser les sols peu propices à l'agriculture pluviale et dont la production avait toujours été utilisée en grande partie jusqu'à un passé très récent pour l'autoconsommation. La recherche agronomique n'a consacré que très peu de travaux aux sorghos de contre saison depuis les années d'indépendance. Les dynamiques observées au cours des deux dernières décennies ont toutefois suscité l'attention de quelques chercheurs. En effet, les premiers travaux consacrés au Muskuwaari, entrepris par l'Institut de Recherche Agronomique et Technique (IRAT), se situent entre les années 60 et 70. Ceux-ci ont d'abord porté sur l'amélioration des espèces à travers une étude biologique des sorghos repiqués (Eckebil, 1968). Barrault et al. (1972) ont fait le point sur les essais de l'IRAT concernant les sorghos repiqués au Nord Cameroun. Il ressort que l'amélioration génétique du Muskuwaari est l'un des derniers maillons de l'amélioration de la culture. L'expression du potentiel de la plante dépendant d'abord du milieu (bilan hydrique des parcelles, concurrence des adventices, etc.) et des techniques culturales. Les avis sont convergents sur le fait que les pratiques et techniques culturales locales sont le plus souvent les mieux adaptées (Raimond, 1999). C'est ce qui aurait justifié l'intervention assez limitée de la recherche sur ce sujet. Entre 1982 et 1987 les rapports du Projet Centre Nord, un projet d'appui institutionnel à l'agriculture qui avait pour objectif de planifier et coordonner le développement rural tout en assurant un suivi-évaluation des projets, ont mis en exergue l'importance et le rôle régulateur du Muskuwaari qui ont toujours été sous estimés. Plusieurs publications de Seignobos ont été consacrées à la culture du Muskuwaari. Il a d'abord retracé le contexte historique de la diffusion des Muskuwaari dans la région du Nord Cameroun (Seignobos, 2000). Il a également décrit les caractéristiques des terres

adaptées à la culture et leurs perceptions par les populations locales (Seignobos, 1993). D'autres publications ont été consacrées à montrer la place du Muskuwaari dans l'agrosystème des terroirs des plaines du Diamaré et de Kaélé (Seignobos et al., 1995 ; Seignobos, 1998). Timmermans (1998) a fait une investigation sur l'évolution conjointe des superficies de coton et du Muskuwaari dans quelques villages de la plaine du Diamaré et a analysé les motivations des paysans dans un contexte où la terre devient de plus en plus rare. Mathieu (2000) a travaillé sur l'analyse des pratiques culturelles et l'accompagnement technique des producteurs de Muskuwaari. Il a analysé le fonctionnement des exploitations dans un terroir à dominante Muskuwaari. Il montre qu'à ce stade de développement de la culture, les cultivateurs expriment déjà un besoin d'intensification de la culture et sollicitent un appui technique notamment en ce qui concerne l'enherbement. Ses investigations débouchent sur des éléments de base pour l'amélioration du système de culture. La généralisation de cette expérience à l'ensemble de la région nécessite une meilleure connaissance de la diversité des situations agraires afin d'adapter les propositions techniques.

Parmi les travaux réalisés, aucun ne fournit des connaissances sur l'évolution spatiale du processus d'expansion des sorghos de contre saison. Les informations sur la contribution spécifique de chacun des facteurs qui influencent cette dynamique restent également limitées dans la littérature actuelle. Une étude récente effectuée par Raimond (1999) sur la gestion des terres inondables a permis d'explorer quelques raisons de l'extension et de la diffusion du sorgho de contre saison et d'analyser l'évolution des systèmes agraires liés à son adoption à l'échelle de la région du Bassin du lac Tchad. Ce travail recommande et justifie l'intérêt d'une étude par télédétection pour caractériser les paysages agropastoraux à base de sorgho repiqué. L'auteur soulève toutefois les problèmes posés par l'identification de cette culture sur des images SPOT. Certains de ces problèmes avaient été relevés par Triboulet (1995) dans une étude sur la transformation des paysages du Diamaré. Un des objectifs principaux de cette thèse est d'explorer et proposer une approche d'analyse d'image et de cartographie de l'occupation du sol permettant de mettre en exergue les dynamiques liées à l'extension récente des sorghos de contre saison en zone de savane de l'Extrême Nord du Cameroun. Boutrais et al. (1984) ont annoncé l'achèvement imminent des possibilités de défrichement sur les karals. Si dans certaines zones l'impossibilité d'effectuer les nouveaux défrichements est un fait évident, il reste difficile de situer le rythme d'évolution du processus dans l'ensemble de la région. Les questions spécifiques de recherche dont les réponses pourraient contribuer à une meilleure connaissance de la diversité des situations sont les suivantes :

- Quel est l'état d'évolution actuelle du processus d'extension dans chacune des aires de production ?
- Quels sont les facteurs qui influencent cette dynamique et comment se traduit elle sur le plan socio-économique, sur le système d'utilisation de l'espace et environnemental ?
- Quelles sont les stratégies que les producteurs mettent en place pour s'adapter et faire face à ces mutations dans les différentes situations agraires ?

7.2.2. Cadre méthodologique de l'étude

Le Système d'Information SMALL Savannah présenté au chapitre précédent est utilisé comme cadre conceptuel et outil pour analyser les causes et les conséquences de l'extension récente du sorgho de contre saison. Ce chapitre constitue en ce sens un premier exemple d'application de SMALL Savannah qui illustre les résultats de trois principaux modules de ce SIE à savoir le module d'observation et d'analyse

spatiale, le module de diagnostic et de caractérisation, et le module d'explication et de prédiction. En outre, les connaissances dérivées de cette application constituent des données d'entrée du module de modélisation dynamique et simulation (figure 7.1). Cette application illustre également la mise en œuvre de l'architecture multi-échelle du SIE SMALL Savannah qui a été présentée au chapitre 4. L'analyse du processus est articulée entre trois principaux niveaux d'échelle : la région de l'Extrême nord du Cameroun, les zones agroécologiques et les terroirs. Chaque niveau d'analyse utilise des données spécifiques et nécessite des méthodes et des outils appropriés.

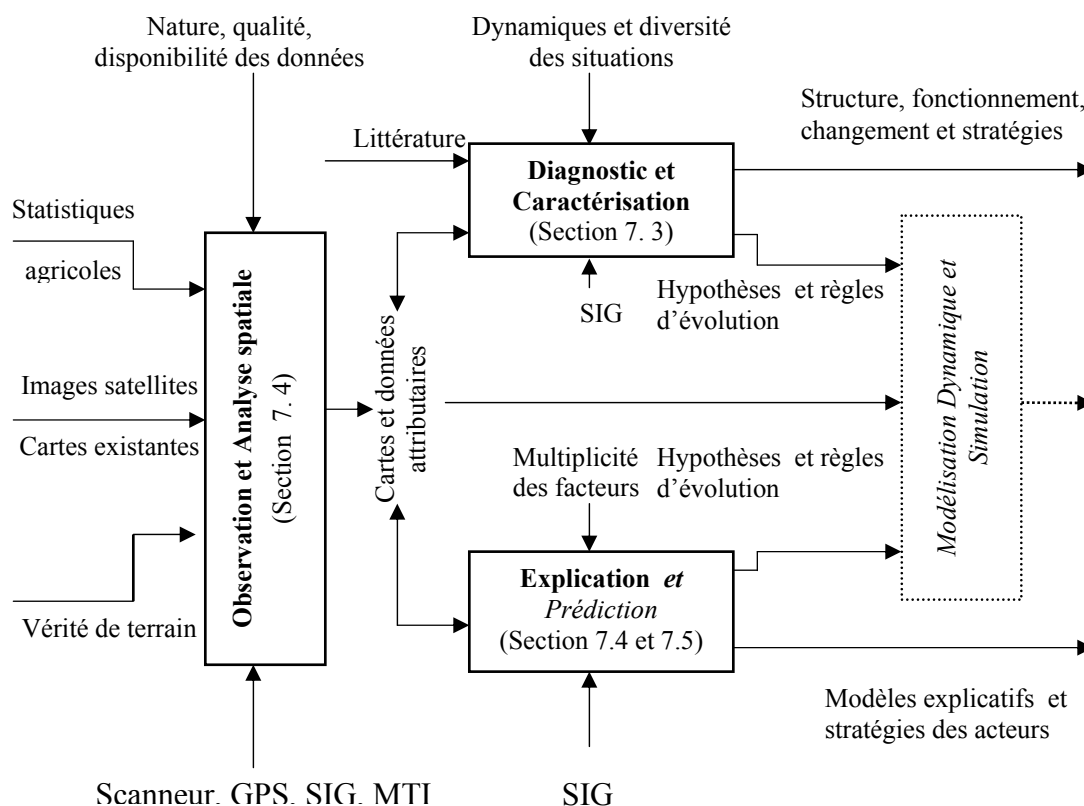


Figure 7.1 : Cadre conceptuel et outils de SMALL Savannah utilisés pour l'analyse de l'extension du sorgho de contre saison. Le rectangle en pointillé et le texte en italique représentent les modules non utilisés dans cette application.

Observation et analyse spatiale

La partie de la base de données utilisée comprend les cartes existantes (carte de sols), les images satellites de saison sèche et les cartes d'occupation du sol dérivées, les données de statistique agricoles. Les statistiques agricoles et les données de télédétection à moyenne résolution sont utilisées pour dégager les tendances actuelles d'évolution de la culture dans chaque zone géographique et les conséquences de cette dynamique sur le système agraire. Les observations de terrain et les informations issues des entretiens ont permis d'élaborer une carte d'aptitude des sols à la culture et une carte des zones d'extension de la culture sur la zone couverte par les images. Le SIG a été utilisé pour croiser les cartes d'extension et d'aptitude des sols à la culture.

Diagnostic et caractérisation

De nombreux éléments de compréhension de la dynamique d'extension récente du sorgho de contre saison peuvent être trouvés dans les caractéristiques mêmes des systèmes agraires à base de sorgho de contre saison. La section 3 fournit quelques éléments de caractérisation de ces systèmes en prélude à l'analyse du processus d'extension et des différents facteurs qui ont potentiellement influencé cette dynamique au cours des dernières décennies. En exploitant la littérature existante, un aperçu historique est utile pour mieux situer les origines et les facteurs qui ont contribué à la diffusion de la culture dans les différents foyers de peuplement (section 4).

Explication et prédiction

A l'échelle des territoires villageois, les enquêtes auprès des producteurs et des acteurs, couplées à une cartographie de l'utilisation de l'espace servent à expliciter les stratégies paysannes face aux différentes mutations en cours (section 4). Dans cette application, les aspects liés à la prédiction ne sont pas abordés explicitement. Toutefois, les résultats des modules de diagnostic et d'explication fournissent des connaissances sur les évolutions récentes et de formuler quelques hypothèses sur les facteurs déterminant la dynamique (section 7.5) en vue de la prédiction et de l'exploration des trajectoires d'évolution des changements (chapitres 9 et 10).

7.3. Caractérisation des systèmes agraires à base de sorgho de contre saison

Les éléments de caractérisation du système agricole données dans cette section concernent la description des paysages et des logiques d'organisation de l'espace, du système de production et des facteurs déterminant l'organisation spatiale de la culture.

7.3.1. Paysages agraires à dominante sorgho de contre saison

A l'échelle régionale, les paysages de plaine principalement concernés par la culture du sorgho de contre saison sont dominés par des steppes à épineux et des prairies périodiquement inondées (Letouzey, 1985). La strate arborée initiale est dominée d'*Acacia seyal*, mais comprend également d'autres espèces telles que *Ziziphus* et *Combretum spp* (Donfack et Seignobos, 1996). Le tapis herbacé est dominé par des graminées annuelles telle que *Loudetia togoensis*, *Setaria spp* et *Echinochloa spp*. Toutefois, la mise en culture favorise l'apparition d'espèces arbustives comme *Piliostigma reticulatum* (Mathieu, 2000). On peut distinguer quatre principales facettes caractéristiques des paysages à dominante sorgho repiqué :

Les plaines alluviales à sols hydromorphes

Les plaines alluviales à sols hydromorphes représentent les paysages typiques de sorgho de contre saison. On peut distinguer trois variantes en fonction du niveau des pentes, de la nature, et de l'état de la végétation : 1) les zones de culture sur terrains presque plats où la végétation ligneuse est quasi absente et seules les souches d'arbre montrent que la végétation originelle était composée d'*Acacia*. En fin novembre, la surface du sol est défrichée et apparaît brûlée. Le Muskuwaari y est pratiqué en monoculture et de façon extensive ; 2) Les zones de culture sur terrains présentant une très faible pente, où la végétation ligneuse est parsemée de *Balanites egyptiaca* et de *Tamarindus indica*. La pente favorise un meilleur drainage du sol, ce qui explique qu'en dehors du Muskuwaari, il est possible d'y pratiquer les cultures

pluviales ; 3) les zones de paysages mixtes de jachères et culture de Muskuwaari où la végétation est dominée par les jeunes *acacias* indicateurs des sols lourds et ayant une forte tendance hydromorphe.

Les plaines sur verstsols dégradés

Les paysages de plaine sur verstsols dégradés où le sol encore qualifié de type hardé a été récupéré pour la mise en culture du Muskuwaari. On observe en général deux types d'aménagement, le labour et la mise en place de réseaux serrés de diguettes. La végétation ligneuse est absente sur des longues distances qui peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres.

Les plaines sur terres argileuses inondées

Les paysages formés par les karals (terres argileuses) situés au nord de la région de Waza qui présentent de très faibles pentes de l'ordre de 1%. Les terres très collantes à l'état humide sont dominées par une végétation herbacée de grande taille. Ces paysages s'étendent jusqu'à la limite des terres alluviales bien drainées situées au sud du Lac tchad. Le Muskuwaari y est pratiqué comme culture de décrue. Mais compte tenu des stress hydriques enregistrés au cours de ces deux dernières décennies, ces espaces sont de plus en plus utilisés comme pâturage de saison sèche.

Les plaines sableuses sur sol jaune

Les plaines sableuses sur sol jaune qui s'étendent du sud de Mindif au bec de canard (limite sud est de la région) forment un paysage caractérisé par une très forte densité d'occupation humaine. La terre assez bien drainée et protégée par un parc à *Faidherbia albida* se prête plus à la mise en valeur par les cultures pluviales (coton, sorgho, haricot). Le sorgho repiqué principalement de type Baburi occupe les zones humides et les bas fonds de ces espaces.

A l'échelle du territoire villageois, l'organisation spatiale des paysages agraires à dominante sorgho repiqué obéit plus ou moins à une structure en auréoles autour des zones d'habitation où les champs de cultures pluviales constituent la première auréole. Les vastes blocs de karals mis en valeur sont situés à une distance considérable des zones d'habitation et définissent un front de défriche des brousses interstitielles entre terroirs villageois (figure 7.2). Ces grands blocs de Muskuwaari, le plus souvent exploités par plusieurs communautés villageoises voisines appartiennent à une seule personne. Dans presque tous les terroirs des zones agro écologiques étudiés, le coton a longtemps occupé une place importante et a connu un essor considérable qui peut justifier en partie l'extension récente de la culture du Muskuwaari (Mathieu et al., 2003). Les paysages à dominante sorgho repiqué correspondent pour la plupart à d'excellentes zones de pâturage. Ces milieux en général humides sont très importants dans la stratégie des éleveurs transhumants en saison sèche (Timmermans, 1998 ; Raimond, 1999). Avec l'extension récente de la culture du Muskuwaari, les vastes karals qui étaient auparavant de meilleures zones de pâturage, parce que non adaptés aux cultures pluviales sont fermés aux troupeaux dès la fin du mois de juillet car leur présence limiterait la recharge en eau du sol qui est primordiale pour la réussite du Muskuwaari. Cette nouvelle utilisation à dominance agricole de l'espace initialement pastorale est en réalité une utilisation agropastorale puisque, le bétail occupe ces espaces en début de saison des pluies et profite des premières repousses herbeuses. Après les récoltes, l'espace est ensuite utilisé par le bétail qui exploite les résidus de culture (figure 7.2). De plus en plus, les tiges sont entassées et stockées après la récolte et constituent ainsi une importante ressource fourragère qui est bien appréciée par le bétail. Les

éleveurs peuls sédentarisés pratiquent presque tous actuellement la culture du Muskuwaari qu'ils considèrent comme une source de capitalisation dans l'élevage. En plus de l'utilisation des résidus de culture par le bétail, les revenus de la vente des produits de récoltes sont parfois utilisés pour agrandir le cheptel.

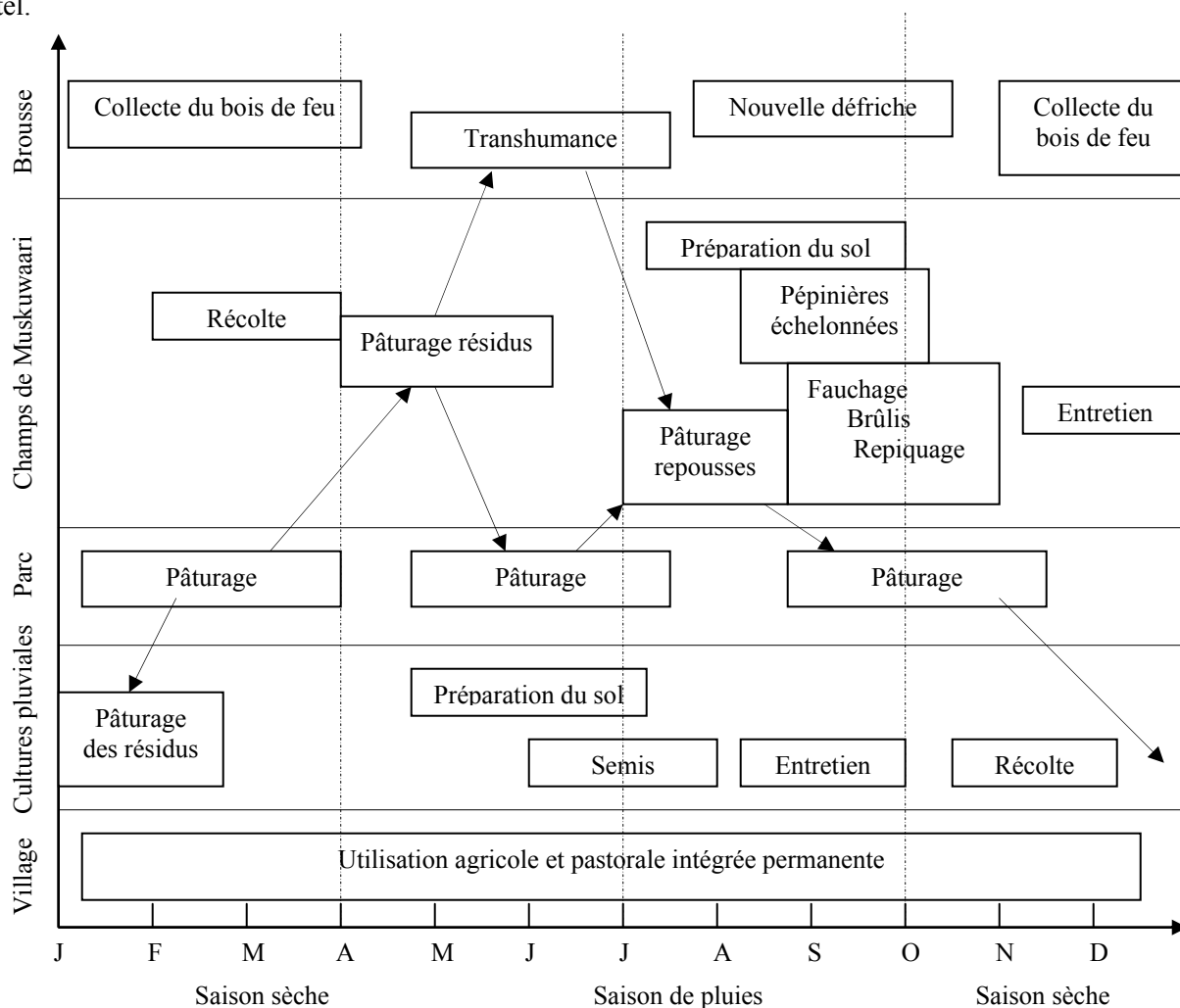


Figure 7.2 : Organisation spatio-temporelle de l'utilisation de l'espace dans un terroir villageois.

7.3.2. Système de production et de gestion de l'espace

La culture du Muskuwaari est pratiquée en saison sèche mais, ne nécessite pas d'irrigation. En effet, les champs sont inondés pendant la saison des pluies et l'importante réserve d'eau peut être utilisée de la fin de la saison des pluies jusqu'au début de la saison sèche. La culture du Muskuwaari était pratiquée initialement sur des terrains plats. L'idée de mettre en place les diguettes est venue de la volonté de pratiquer cette culture sur des sites présentant une microtopographie. Ce type d'aménagement a commencé à se faire au début de l'introduction de la culture dans les zones de Mora et vers le nord de la région de l'Extrême Nord. C'est après les séries de sécheresse des années 1973 que cette pratique s'est diffusée entre Maroua et Mindif (Seignobos, 2000). La culture du Muskuwaari était pratiquée dans le Bornou sous des conditions climatiques de 600 mm de pluie. Son adaptation à des conditions de 800 à 1100 mm tient à la

particularité des sols : ce sont des vertisols qui présentent un taux d'argile en général supérieur à 40%. Cette adaptation s'expliquerait aussi par le fait que la culture ne soit pas très sensible aux variations du total des quantités de pluies annuelles. La mise en culture se fait avec un équipement agricole essentiellement traditionnel. Le labour sur les vertisols dégradés est effectué à la houe ou à l'aide d'une charrue. Lors du repiquage, la trouaison se fait à l'aide d'un plantoir en bois. Le fauchage se fait suivant le cas, avec un couperet ou à l'aide d'une charrue. Le processus de production du Muskuwaari s'étale globalement sur environ six mois entre août et février mais, la période qui exige le plus de travail et de main d'œuvre ne dure qu'un mois et demi (septembre à mi-octobre). On distingue successivement les étapes suivantes : aménagement des diguettes, défrichage et brûlis, mise en place des pépinières, repiquage, sarclage et récolte.

Etape 1 : aménagement des diguettes et mise en défens.

En juillet, les producteurs dont les sols ne sont pas propices commencent l'aménagement des diguettes. Il s'agit des sols qui ne conservent pas assez d'humidité ou des sols situés sur des sites présentant une microtopographie. En début de saison des pluies, les champs sont utilisés comme pâturages (parcours sur les repousses herbeuses). Ces espaces sont ensuite mis en défens pour permettre l'infiltration de l'eau et développement de la végétation de graminées qui sera brûlée.

Etape 2 : défrichage et brûlis

La fin de la saison des pluies est une période très chargée dans le calendrier cultural. On commence par le défrichage des mauvaises herbes sur les parcelles. Lorsqu'il y a une strate herbacée moins importante, on laboure directement à la charrue alors que lorsque les mauvaises herbes abondent, elles sont au préalable enlevées à la houe et brûlées. La pratique du brûlis est courante. Elle est la méthode la plus utilisée dans les plaines du Diamaré et de Kaélé (Timmermans, 1998).

Etape 3 : mise en place des pépinières

Entre mi-août et mi-septembre, les pépinières sont mises en place de préférence sur les termitières effondrées ou sous des *Acacia Albida* (*Faidherbia*). Les paysans n'ayant pas un sol suffisamment humide commencent à mettre en place les pépinières au début du mois d'août car il n'est pas conseillé de mettre les plants tardivement sur un sol sec.

Etape 4 : repiquage

La transplantation ou repiquage des jeunes plants se fait entre fin septembre et début octobre. Une grande pluie pendant cette phase détruirait les jeunes plants. Dans chaque trou, on place deux plantules qui reçoivent un verre d'eau. Les plants sont repiqués avec un écartement compris entre 0,75 et 1m.

Etape 5 : sarclage

Le nettoyage des mauvaises herbes lors de la croissance est parfois nécessaire. Mais, on effectue le plus souvent un seul sarclage et dans certains cas, il est optionnel.

Etape 6 : récolte

L'épiaison a lieu en fin décembre et la maturité intervient entre janvier et février. Le mois de février et le début du mois de mars déterminent en général la période de récolte. Celle-ci consiste à couper, laisser

sécher sur les parcelles et les faire battre. Après cette phase, les karals redeviennent des espaces de pâturage où le bétail se nourrit des résidus de récolte.

7.3.3. Facteurs biophysiques déterminant l'organisation spatiale de la culture

Les conditions du milieu sont évoquées comme des facteurs clés déterminant la dynamique d'extension de la culture. Le Muskuwaari, culture de contre saison présente une grande exigence sur le plan de la conservation des eaux. L'alimentation en eau de la plante dépend de la pluie et de l'inondation. La réserve en eau du sol semble être le facteur du milieu le plus déterminant de la production du Muskuwaari. Roupsard (1987) soutient qu'en dehors de la pluviométrie (abondance et répartition), les autres facteurs écologiques seraient insignifiants. Toutefois il faudrait relativiser cette affirmation en relevant les rôles que jouent la qualité des sols et la nature du relief. En effet, l'eau qui est stockée dans le sol est restituée à la plante en fonction de la teneur en argile du sol et des conditions de son inondation. Sur les sols dégradés ne présentant pas des caractéristiques idéales de vertisols (sols hardé), les diguettes sont le plus souvent construites afin d'obliger l'eau à s'infiltrer. Cette pratique qui contribue à la réhabilitation de ces sols est également un moyen d'enrayer la dégradation du karal.

Pluviométrie

L'importance et la bonne répartition des pluies déterminent la quantité de réserve en eau pour la plante. La diminution des superficies cultivées d'une année à l'autre est liée au déficit pluviométrique surtout en fin de saison des pluies (en septembre et octobre) car ce sont ces dernières pluies qui contribuent significativement à la recharge en eau du sol. Les déficits pluviométriques du début de la saison des pluies qui sont néfastes aux semis des cultures pluviales n'ont pas d'impacts significatifs sur la production des sorghos repiqués. Raimond (1999) a essayé de mettre en relation l'extension du sorgho repiqué avec l'évolution globale de la pluviométrie à l'échelle du bassin tchadien. Elle conclut qu'il est très difficile de lier directement les superficies cultivées et les pluviométries annuelles. Elle montre toutefois qu'entre les deux périodes 50-68 et 69-90, on est passé à une distribution de pluies qui rend la culture des céréales pluviales de plus en plus aléatoire. Cette observation peut en partie expliquer l'intérêt croissant pour la culture du sorgho repiqué qui dans ces conditions peut garantir la sécurité alimentaire. Cette nouvelle distribution de la pluviométrie est caractérisée par une diminution très marquée des pluies annuelles et des valeurs maximales en août et septembre. Un déplacement du maximum d'abondance de pluies d'août à juillet est observé bien que la durée des pluies reste inchangée.

Proximité des cours d'eau

En effet, dans les parcelles en basse topographie et aux abords des lacs ou des grands cours d'eau où les terres sont suffisamment argileuses, il se met en place un système d'alimentation en nappe indépendant de la nappe générale. Dans le cas des karals situés à proximité des cours d'eau, il se forme de larges dépressions dont la taille dépend du périmètre de déversement des rivières. Dans l'aire de crue ainsi définie, le repiquage n'est réalisé que sur les zones dégagées par les eaux avant la fin du mois d'octobre. Les zones qui restent inondées plus longtemps seront utilisées comme des pâturages de saison sèche ou pour la pêche (lac de Fianga ou de Maga). Dans les zones qui ne sont pas atteintes par les crues, le système d'alimentation de la plante dépend de l'inondation des sols argileux à partir des petits cours d'eau temporaires et des précipitations dont l'écoulement est réduit par une pente très faible. Dans ce cas les

dernières pluies sont déterminantes pour la recharge en eau du sol qui est nécessaire à la plante. La crue des lacs et des grands cours d'eau provoque également une remontée de la nappe qui entretient l'inondation dans ces secteurs éloignés qui ne sont pas atteints par la crue. Il existe plusieurs types de karal qui sont liés à la proximité de cours d'eau. Les karals suivant les axes de drainage ou d'écoulement souterrain (*gaaraajiwat*, fils) ont une structure très linéaire. Ce sont des zones de dépôt d'alluvions sur horizon argileux. Ces zones étaient au début du siècle, occupées par des rizières mais sont destinées actuellement à la culture du Muskuwaari ou de la patate douce avec le recul des pluies observé depuis une trentaine d'années. On distingue les karals de mayo ou *maaroga* qui présentent en général une couche superficielle sableuse (limoneuse) avant le niveau argileux, les karals *rufirdeewat* qui correspondent à des lieux envahis très diversement par l'eau et qui laisse un dépôt sous forme de croûte craquelée sombre. Ces deux karals peuvent également être utilisés pour cultiver d'autres sorghos ou pour une double culture. Ce qui justifie le fait que leurs valeurs de location restent les plus élevées (15 000 à 20 000 FCFA). On note également les karals *weendu* qui sont liés à la présence d'une mare et les karals *yaarewall* qui correspondent aux karals couvrant des vastes étendues inondées. Le Muskuwaari dans ces dernières zones devient une culture de décrue (Fadaré, Balda, Bogo, Dargala). Les herbes sont fauchées pendant le retrait des eaux (Seignobos, 1993). L'étude des bilans hydriques et l'observation des secteurs mis en culture dans le bassin tchadien montre qu'il n'y a pas de lien direct entre les superficies de sorgho repiqué et le niveau de la nappe générale. Elle n'aurait pas un grand rôle à jouer dans le système d'alimentation en eau du sorgho repiqué. Un lien plus direct existe par contre entre les superficies cultivées et la durée ainsi que l'importance de l'inondation (Raimond, 1999).

Disponibilité des terres et aptitude des sols

La culture présente de fortes exigences en eau et les sols recommandés sont des vertisols qui sont des sols argileux, présentant des fentes de retrait et qui collent en saison de pluies. Ces sols étaient utilisés par le passé pour la culture du coton pérenne ou le riz en association avec le Muskuwaari mais, ils sont aujourd'hui presque exclusivement réservés à la culture du Muskuwaari (Seignobos, 1998). Toutefois, la culture peut être pratiquée sur d'autres sols en fonction de sa structure et du taux d'argile (Tableau 7.1). En s'appuyant sur ces caractéristiques, une carte d'aptitude des sols à la culture a été réalisée (figure 7.3). Les meilleures terres (très bonne et bonne aptitude) sont constituées des vertisols modaux ou faiblement associés ne nécessitant en général pas d'aménagement spécifique. Les sols d'assez bonne aptitude sont des planosols à caractère vertique (hydromorphe) qui nécessitent un repiquage tardif dans la mesure où on attend le retrait des eaux qui peuvent être néfastes à la plante. Les sols d'aptitude passable, constitués des associations de planosols et de vertisols à pédoclimat sec sont utilisés en cas de manque des meilleures terres et leur utilisation exige le plus souvent des aménagements de diguettes pour retenir l'eau dont la plante aura besoin. Les sols de faible aptitude sont des sols d'apport alluvial à texture fine, utilisés pour une grande variété de culture. Dans certaines zones, ces sols sont utilisés pour le sorgho pluvial et le sorgho de contre saison au cours de la même année ou d'une année à l'autre.

Le croisement de ces informations sur le niveau d'aptitude de la culture avec les cartes d'occupation du sol permettrait de voir si l'extension de la culture s'est effectuée principalement par des défrichements sur les meilleurs vertisols (section 7.4). Les populations locales distinguent une très grande variété de type de karals en fonction de leur capacité de rétention de l'eau, la présence des fentes de retrait, de leur localisation géographique et de leur forme d'utilisation. Les sols les plus sollicités sont les vertisols

topomorphes et lithomorphes qui ont une couleur très foncée, un taux d'argile de près de 40% et ont une importante capacité de rétention en eau (Seignobos, 1993). La croissance démographique qui a pour corollaire la diminution de la disponibilité des terres conduit à une pression plus importante sur les karals et la réduction de la jachère. Les karals ne sont pas généralement laissés en jachère sauf après de très longues années de culture. Les paysans pensent effectivement que le karal peut être cultivé pendant plus d'une décennie sans perdre sa fertilité. Sous l'intensité d'utilisation, ces sols évoluent vers des faciès dégradés en superficie mais conservent des propriétés vertisolliques en profondeur. Compte tenu de la pression foncière, ces sols dégradés sont également de plus en plus sollicités mais nécessitent un aménagement avant la mise en culture (labour, installation des diguettes). Les vertisols dégradés qui ont une faible teneur en argile ou ceux situés sur des sites présentant une microtopographie peuvent être abandonnés certaines années dans la mesure où ils s'assèchent très rapidement et ne disposent pas assez d'eau pour alimenter la plante pendant tout son cycle. De même certains des meilleurs vertisols situés dans les zones fortement inondées peuvent être abandonnés certaines années en fonction des quantités de pluies et de la durée plus ou moins longue de l'inondation. Une cartographie détaillée de la diversité des vertisols pourrait également permettre de mieux comprendre les dynamiques spatiales de mise en culture des sorgho de contre saison.

Classes d'aptitude	Types de sols	Caractéristiques
1 Très Bonne	Vertisols modaux des plaines argileuses	Larges fentes > 4 cm, au moins 100 cm en profondeur, structure prismatique grossière, taux d'argile > 35% de type montmorillonite
2 Bonne	Association de vertisols à pédoclimat sec, sols argileux à faciès vertiques	Fentes moyennes entre 3 et 4 cm, entre 80 et 100 cm en profondeur, structure prismatique moyenne, taux d'argile entre 25 et 35% de type montmorillonite
3 Assez Bonne	Planosols à caractère vertique (hydromorphes)	Petites fentes entre 2 et 3 cm, profondeur < 50 cm, structure prismatique à colonnaire moyenne à fine, taux d'argile entre 25 et 35%, présence de sodium
4 Passable	Association de planosols lessivés, fersiallitiques, vertisols à pédoclimat sec	fentes très petites (1-2cm), profondeur < 50 cm, structure polyédrique, taux d'argile entre 20 et 25%, présence de sodium
5 Faible	Sols d'apport alluvial à texture fine	Structure massive, rares fentes, taux d'argile < 20%
6 Non Apte	Sols ferrugineux, sableux rouges ou jaunes, régosoliques de montagne	Structure massive, taux d'argile < 20%

Tableau 7.1 : Description des caractéristiques des classes d'aptitudes de sol à la culture du sorgho repiqué.

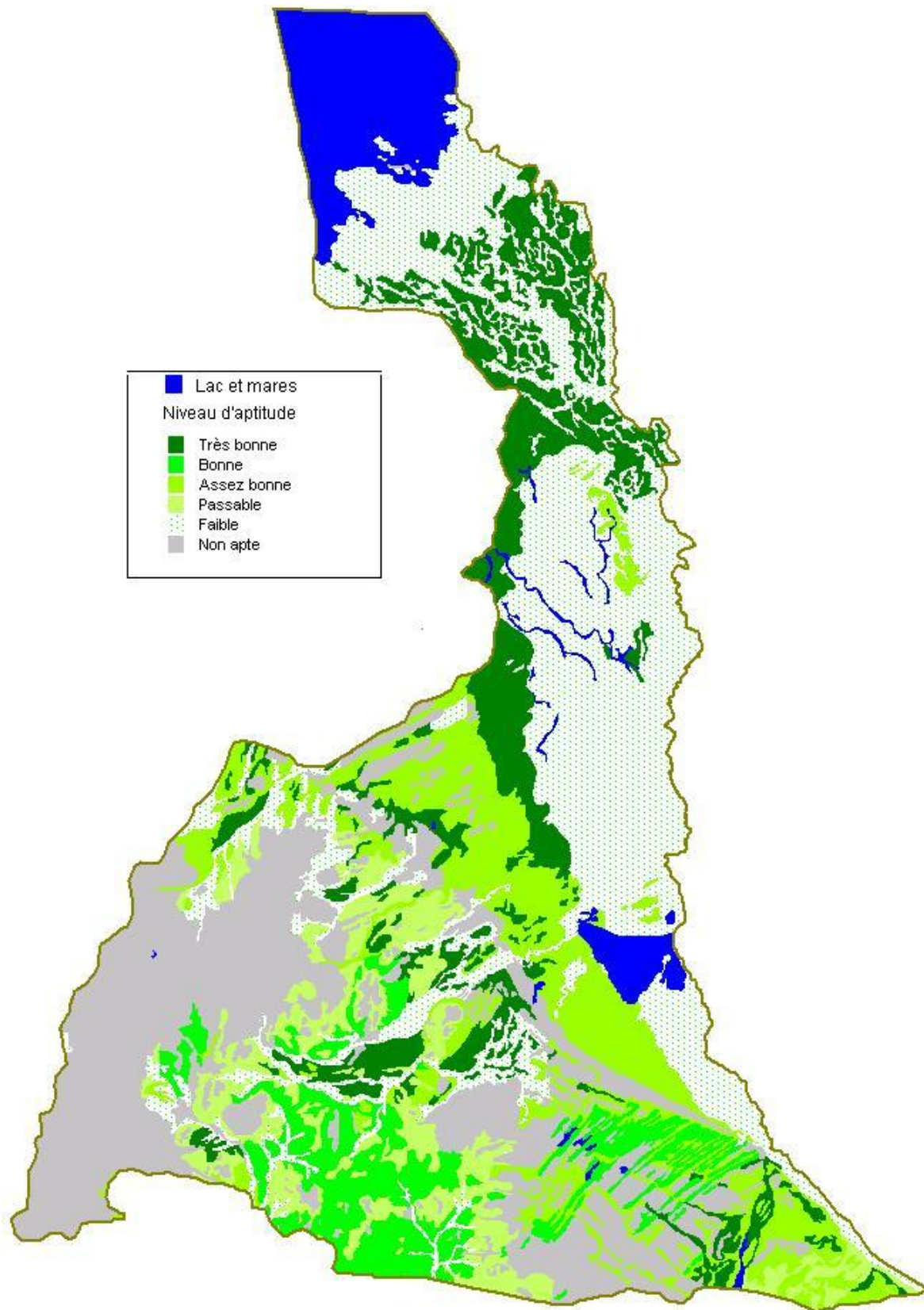


Figure 7.3 : Niveau d'aptitude des sols à la culture du sorgho de contre saison.

7.4. Analyse de l'extension du sorgho de contre saison

Cette section est consacrée à l'analyse du processus d'extension. Un aperçu historique donne les principales étapes de la diffusion de la culture et le contexte d'adoption dans chacun des principaux foyers de peuplement. L'analyse régionale met en exergue les dynamiques spatiales et décrit les conséquences socioéconomiques et environnementales. L'analyse locale montre comment cette dynamique régionale se traduit à l'échelle locale et décrit les stratégies que les producteurs mettent en place dans chacune des situations étudiées.

7.4.1 Origines et étapes de la diffusion de la culture

Introduction de la culture dans la région

L'introduction du Muskuwaari au Nord Cameroun n'est pas récente. Elle remonte en effet au 19^{ème} siècle. Cette culture a ensuite été diffusée dans plusieurs foyers de peuplement au fil du temps. Son extension a seulement pris des proportions importantes au cours des deux dernières décennies grâce à une combinaison de facteurs favorables. Malgré les petites controverses qui persistent quant aux foyers de diffusion et à la situation chronologique, les interprétations des différentes sources historiques indiquent que la culture du Muskuwaari s'est d'abord développée dans le royaume du Bornou d'où elle a été ensuite diffusée dans le Nord Cameroun au moment de la conquête peule à partir de la fin du 19^{ème} siècle (Boutrais et al., 1984 ; Beauvilain, 1989). Ces peuls étant essentiellement des éleveurs, ont adopté cette culture qui serait plus compatible que les autres cultures (pluviales) avec l'activité pastorale. Cet intérêt est aussi justifié par le fait que le Muskuwaari demande peu d'entretien et donne ainsi assez de temps pour la conduite des troupeaux. De plus, les résidus de culture et surtout les tiges constituent un excellent fourrage de saison sèche (Raimond, 1999). De toute évidence, on doit la diffusion du Muskuwaari dans le Nord du Cameroun aux populations *Fulbé*. Mais son introduction serait plus ancienne que la conquête des populations peules, car certaines sources la situent avant leur arrivée dans la région. C'est d'abord les populations Zumaya qui occupaient le cœur du Diamaré avant la conquête peule qui prétendent avoir pratiqué la culture avant l'arrivée des Peuls dans la deuxième partie du 19^{ème} siècle. Ils l'auraient hérité des Bornouans en transit chez eux lors de leurs razzias méridionales. Les populations autochtones de Bogo, conquis par les peuls affirment avoir reçu les semences de Muskuwaari à travers leur fille qu'ils avaient donnée en mariage dans le Bornou. Les récits racontent que les Bornouans avaient toujours refusé de leur en offrir malgré les nombreuses sollicitations, mais cette fille avait pu cacher quelques graines dans sa chevelure pour ses siens (Seignobos, 2000). Madi (1994) soutient que la culture du Muskuwaari aurait été introduite par les Kanouris (Bornouas) venus du nord du Nigéria. Cette version ne contredit pas totalement les précédentes dans la mesure où Abakachi (2000) a remarqué dans ses enquêtes historiques que les premières souches peules de la région, installées au Nord Est de Maroua (Pété, Bogo) étaient d'origine kanouri. Les premiers Muskuwaari auraient donc ainsi été repiqués vers Djiddéré-Saoudjo dans la partie sud de la région de Bogo un peu avant le début 19^{ème} siècle. Toutefois, ce n'est qu'au milieu du 19^{ème} siècle que le processus de diffusion s'est amorcé sous l'impulsion des populations bornouanes installées auprès des peuls.

Processus de diffusion dans les foyers de peuplement

La première diffusion d'envergure dans le Diamaré date de la fin du 19^{ème} siècle, vers 1890. En effet, avec l'éclatement d'une colonie Bornouane située au cœur du Diamaré suite aux guerres tribales, leurs populations se sont dispersées dans la région (sur les rives du Mayo Boula) où ils ont diffusé la culture auprès des *Fulbé* (Seignobos, 2000). La diffusion des variétés a été principalement due aux éleveurs et aux commerçants *Fulbé*, mais l'œuvre de l'administration coloniale a été également très déterminante malgré les échecs des premières tentatives. A partir de 1924, l'administration tentera de vulgariser le sorgho de contre saison dans le Diamaré et le premier karal fut défriché à Hina Marbak. Les populations situées dans l'aire de peuplement peule ont très tôt adopté massivement la culture. C'est ainsi que les *Fulbé* et les *Guiziga* de Maroua commencent vers 1928, les *Guiziga* de Lulu et les *Mofu* de Zidim les suivent en 1930. Cette diffusion a été toute fois considérablement perturbée par les invasions acridiennes des années 1937 à 1939 (Beauvilain, 1989). Ainsi, ce n'est qu'en 1950 que la mise en valeur des karals a repris de l'importance après une vague d'abandons. Les sorghos de contre saison ont été mis en place significativement dans les zones de Godola, Gawar et Mokyo entre 1964 et 1965 (Seignobos, 2000). Au sud du lac Tchad, les Arabes Showa furent les initiateurs de la culture du sorgho de contre saison. Ils ont très tôt adopté et ont diffusé le long des rives du fleuve Chari, des variétés venant du Bornou et du Tchad, appuyés par les *Fulbés* venant du Diamaré (Bogo, Pétté et Djoulgouf) et les *Tupuri*.

Les autres foyers de peuplement comme les *Moudangs*, les *Massa* et les montagnards adoptent le Muskuwaari très tardivement parce qu'à ces moments, cette culture n'était pas encore dans les mœurs de ces populations. En effet, la plus grande diffusion en dehors des premiers foyers d'introduction de la culture se situent à partir du milieu du 20^{ème} siècle. Dans la région de Kaélé peuplée de *Mundang*, les semences sont obtenues des peuls de Mindif. En 1937 on y localisait encore seulement deux zones : la principale est celle du secteur de Lara, Gaban, Kaélé et Djidoma où la culture couvrait d'importantes surfaces, mais ne constituait qu'une denrée d'appoint. La deuxième zone est celle de Goubara et Gareï où la culture a ensuite été un peu délaissée. C'est à partir de 1941 que l'expansion dans cette zone a été impulsée par les administrateurs qui avaient prescrit aux chefs de créer des pépinières et de fournir des semences. Cette incitation administrative a connu un relâchement en 1948 où on constate qu'il y avait très peu de Muskuwaari dans les zones de Midjivin et de Moutouroua (Rapport du chef de division). Le développement a été favorisé par les chefs traditionnels qui y trouvaient un intérêt. Ces derniers avaient le contrôle des karals du territoire dont ils assuraient la redistribution et sur lesquels ils percevaient une dîme alors que ce n'était pas le cas pour les cultures de traite comme l'arachide et le coton. Les superficies ont ainsi augmenté considérablement et dépassaient déjà celle des mils et sorgho de saison des pluies dans l'arrondissement de Kaélé en 1964 alors que dix ans plutôt, le sorgho à grain rouge occupait les plus grandes superficies (Seignobos, 1998). La culture du Muskuwaari est devenue ainsi une composante importante de l'agrosystème de la zone *Mundang* avec le sorgho pluvial et le coton. En ce qui concerne les populations *Massa*, elles étaient principalement tournées vers la pêche et ont refusé pendant très longtemps le Muskuwaari pour des raisons d'habitude alimentaire, malgré les pressions de l'administration au cours des années 60. Ce sont non seulement les sécheresses successives des années 69-70 et 73 qui ont bouleversé les activités de pêche mais, ce sont également les pressions des autorités administratives concernant la riziculture qui ont amené les *Massa* à gagner de l'intérêt pour la culture.

En somme, la diffusion du Muskuwaari dans le Nord Cameroun s'est d'abord effectuée suivant un gradient nord-sud avant de s'orienter ensuite respectivement vers les foyers de peuplement situés sur les limites

orientale et occidentale de l'aire de peuplement peule. La limite méridionale a considérablement évolué et se situe actuellement au niveau de la cuvette de Garoua. L'aire de diffusion actuelle du Muskuwaari au Cameroun s'étend du sud du Lac Tchad jusqu'à la vallée supérieure de la Bénoué dans la province du Nord. Dans la province de l'Extrême Nord, on distingue deux principales aires de cultures : celle s'étendant sur la vaste plaine du Diamaré et les zones environnantes notamment Kaélé et Yagoua et celle allant de la plaine de Mora au nord du Parc National de Waza, avec des extensions vers le lac Tchad où cette culture reste très aléatoire depuis les années 1973 à cause des inondations très prolongées.

7.4.2. Analyse régionale de l'extension récente du sorgho de contre saison

Depuis son introduction dans la région, le sorgho de contre saison était considéré comme une culture secondaire et pratiquée seulement en année difficile, lorsque les cultures pluviales avaient échoué. Au cours des deux dernières décennies son extension a été incontestable dans toute la région sahélienne et soudano-sahélienne du bassin tchadien (Raimond, 1999). L'analyse empirique de la structure et de la dynamique du système agraire effectué au chapitre 5 a montré que les surfaces agricoles ont considérablement évolué au détriment des formations naturelles et des zones de pâturage. Les mesures précises sur l'importance actuelle des terres agricoles à l'échelle de l'ensemble de la région ne sont pas disponibles. Toutefois, l'analyse diachronique effectuée à partir des images de télédétection sur une zone de référence a confirmé cette tendance (chapitre 3). Une analyse plus fine des dynamiques spatiales d'occupation du sol indique que l'essentiel des défrichements observés en vue de l'extension agricole et qui contribuent à une profonde modification du paysage agraire est imputable à la culture du sorgho repiqué ou sorgho de contre saison qui s'est progressivement imposée dans le système de production agricole de la région. Elle revêt aujourd'hui une autre importance aussi bien pour les populations rurales qu'urbaines dans les zones de savanes du Tchad et du Cameroun. L'importance des superficies actuellement cultivées et sa contribution à la production céréalière des zones de savane en témoignent. Le Muskuwaari représente la quasi-totalité de la production céréalière des arabes sédentarisés au sud du Lac Tchad. Dans l'ensemble de la région de l'Extrême Nord du Cameroun, cette culture représente près de 40% de la production céréalière régionale (MINAGRI, 1999). Le phénomène d'extension agricole observé dans la région concerne l'ensemble des cultures mais, les pratiques paysannes relatives au système de mise en valeur des karals par la culture du sorgho repiqué entraînent de nombreux défrichements qui contribuent à une véritable transformation des paysages. Dans ce système d'utilisation de l'espace, ce sont de très vastes superficies de terres argileuses qui sont systématiquement défrichées à blanc alors que dans le système de cultures pluviales, ces sont des parcs arborés avec des espèces ligneuses bien sélectionnées qui se mettent en place sur les terres exondées.

Les superficies cultivées en sorgho de contre saison fluctuent considérablement d'une année à l'autre, sous l'influence combinée des conditions climatiques (rythme des pluies) et de disponibilité de la main d'oeuvre agricole. Toutefois, les évolutions observées au cours des deux dernières décennies montrent globalement que la culture du sorgho repiqué a connu une extension plus importante et plus rapide au cours de la décennie 90 que les autres cultures. Dans la seule zone cotonnière, les superficies mise en cultures qui oscillaient autour de 80 000 ha par an au cours de la décennie précédente ont atteint plus de 180 000 ha par an. Le calcul du taux d'accroissement annuel des superficies cultivées effectué sur la base de ces données donne 6,5 % pour le sorgho de contre saison, 5,3 % pour le coton et seulement 2,7 % pour le sorgho pluvial (figure 7.4). La répartition spatiale et temporelle des superficies cultivées en Muskuwaari

à l'échelle de la région de l'Extrême Nord indique que cette culture a renforcé sa place dans les zones traditionnelles de production et a connu une extension vers de nouvelles zones de production où la culture n'était pas pratiquée par le passé. Cette extension se justifie à la fois par les facteurs biophysiques et par des raisons propres à l'histoire des sociétés concernées.

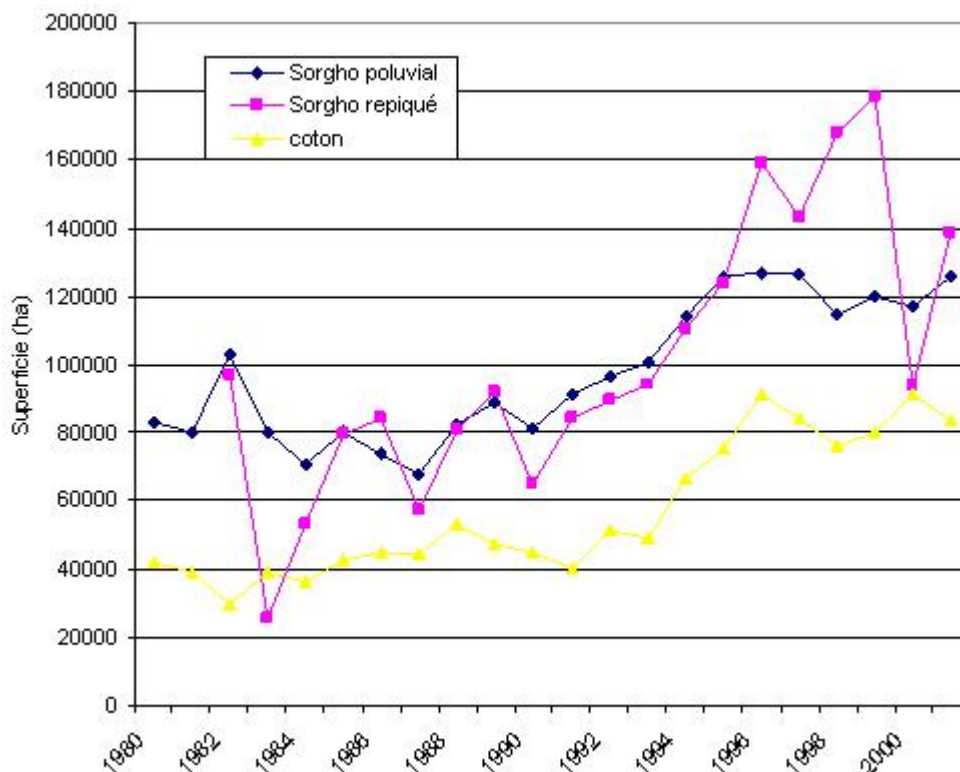


Figure 7.4: Evolution des superficies des principales cultures dans la zone cotonnière de l'Extrême Nord du Cameroun (Source : SODECOTON 2001).

Dans les zones des plaines du Diamaré et de Kaélé qui contribuent à la plus grande partie de la production des sorghos repiqués de la province (à peu près 60%), une tendance à un accroissement constant des superficies mises en culture a été observée au cours des deux dernières décennies. L'accroissement est plus marqué dans les plaines de Kaélé où l'adoption de la culture est plus récente et où il existait encore récemment des karals non défrichés. Dans le Diamaré où l'adoption a été plus ancienne, la plupart des karals étaient déjà défrichés et appropriés au début de la décennie 90. Les extensions récentes s'effectuent généralement sur des sols peu aptes à la culture ou sur des sols qui avaient été abandonnées suite à leur dégradation (sol hardé). Dans la partie sud de la plaine d'inondation du Logone, les surfaces mises en culture étaient plus importantes que dans les plaines du Diamaré et de Kaélé au début de la décennie 80. Mais une tendance à la réduction des superficies cultivées a été observée au cours de la période d'observation. Cette situation est en grande partie la conséquence des aménagements hydrologiques qui ont conduit à la mise en place du Lac de Maga. La comparaison des images Landsat MSS de 1975 et Landsat TM de 1984 montre qu'avant la construction de la digue, les espaces occupés actuellement par le lac et les casiers rizicoles étaient utilisés pour la production du Muskuwaari. De plus même les zones

avoisinentes du lac ne sont plus adaptées à la culture à cause de la durée de l'inondation qui ne favorise pas le retrait des eaux à temps. Les zones montagneuses et la partie nord de la plaine d'inondation du Logone ne présentent pas dans l'ensemble des conditions de milieu assez favorables à la culture. Toutefois, les superficies cultivées bien que très faibles dans ces zones ont doublé entre les deux décennies 80 et 90. L'extension des sorghos repiqués s'est effectuée principalement dans la partie des piémonts où on a des sols intermédiaires entre les vertisols et les sols fersiallitiques, de qualité moyenne. Dans la partie nord de la plaine d'inondation, l'augmentation des superficies cultivées malgré la contrainte de la durée de l'inondation traduit une importante demande alimentaire et des stratégies paysannes qui visent à adapter leur système de production aux conditions défavorables du milieu.

L'état des connaissances actuelles ne permet pas de donner précisément l'étendue des superficies cultivées dans chacune des aires de production. Toutefois il est important de situer les limites de ce processus dans le temps et l'espace, de manière à mesurer les impacts et à prévoir les développements futurs du système agricole. Le processus est en cours d'achèvement et les connaissances actuelles montrent que la qualité des sols serait le principal facteur qui a déterminé les dynamiques de défrichements et de mises en culture observées. La carte d'aptitude des sols à la culture du sorgho repiqué montre qu'environ 674 000 ha de terres dans la région ont au moins une bonne aptitude (figure 7.3). Ce sont des vertisols hydromorphes ou des vertisols à pédoclimat sec qui selon le cas peuvent être associés aux sols fersiallitiques ou régosoliques. La différence avec les superficies mises en culture chaque année qui ne devrait pas dépasser 250 000 ha d'après les statistiques agricoles, pourrait laisser penser que les possibilités d'extension de la culture à l'échelle de la province sont assez importantes (SODECOTON, 2001 ; MINAGRI, 1999). En effet, les surfaces mises en culture dépendent des saisons et de plus, certains de ces vertisols posent des contraintes de mise en valeur. C'est le cas des vertisols localisés dans la plaine d'inondation qui restent inondées pendant très longtemps. La mise en culture de ces terres exigerait de mettre en place un système de suivi des inondations et de drainage des eaux. Si à l'échelle régionale, on estime qu'il y a autant de possibilité d'extension de la culture comment peut-on expliquer les situations de saturation foncière et la rareté des terres cultivables qui sont pourtant observées dans plusieurs terroirs (Seignobos et al., 1995, Timmermans, 1998). Il serait donc plus intéressant de connaître quelle proportion des terres est déjà défrichée et mieux, de savoir le niveau d'appropriation de ces terres par les populations locales. Ces questions dénotent l'intérêt d'une analyse spatiale explicite des dynamiques agricoles liées à l'extension du sorgho repiqué à l'échelle régionale. Une analyse diachronique de l'occupation du sol à partir d'un couple d'image SPOT a été entreprise au niveau d'une zone de référence autour de Maroua afin de répondre à ces questions de recherche. Les résultats fournissent des informations sur le rythme d'évolution du processus, sur les conséquences socio-économiques et environnementales et les stratégies des acteurs (Fotsing et Mainam, 2003).

7.4.3. Mutations du système agricole liées à l'extension récente du sorgho de contre saison

La dynamique d'extension du sorgho repiqué débouche sur des mutations sociales, territoriales et environnementales importantes notamment, un accès différencié aux terres propices à cette culture, une gestion plus complexe des espaces agrosylvopastoraux notamment avec la réduction des pâturages et le déplacement des bassins d'approvisionnement en bois de feu qu'elle induit. En effet, c'est non seulement les paysages agricoles qui évoluent mais c'est le système de production et les modes de gestion des espaces qui sont affectés.

Conséquences socio-économiques

Sur le plan social, l'extension de la culture du sorgho repiqué a influencé les conditions d'accès à la terre et modifié les rapports entre les acteurs sociaux impliqués dans la production. Elle a conduit à la rente foncière et a fait apparaître des comportements spéculatifs depuis l'acquisition de la terre jusqu'à la commercialisation des produits céréaliers, en passant par l'utilisation de la main d'œuvre agricole. On assiste de plus en plus à des échanges temporaires ou vente de parcelles par des propriétaires. Les acteurs impliqués dans ces différentes transactions sont nombreux et incluent d'une part les autorités traditionnelles qui ont le contrôle des meilleures terres et les grands propriétaires en général des commerçants qui ont les moyens d'investir sur les karals (Raimond, 1999). On distingue d'un autre côté les très petits exploitants qui louent la terre compte tenu du coût d'achat plus élevé des karals par rapport aux terres de cultures pluviales. Cette classe représente une part très faible des ressources foncières en Muskuwaari. Au niveau du territoire villageois de Balaza cette classe ne possède que 25% des terres à Muskuwaari sur l'échantillon enquêté par Mathieu (2000). La classe constituée de grands propriétaires emploie des ouvriers agricoles venant de l'extérieur du village et parfois de l'extérieur du pays (Tchad). Les mutations foncières et les rapports sociaux qui se mettent en place autour de la production du sorgho repiqué profitent essentiellement aux grands propriétaires ou commerçants qui accumulent les richesses issues aussi bien des bénéfices de la commercialisation des produits céréaliers que des transactions foncières. Cette dynamique foncière ne s'observe pas dans le cas des terres de cultures pluviales.

Sur le plan économique, on assiste à l'émergence d'une filière de commercialisation organisée en faveur des producteurs de sorgho repiqué. Les déficits céréaliers récurrents et l'importante spéculation entretenue par les grands commerçants autour de la production et de la commercialisation du sorgho repiqué sont des mutations économiques assez remarquables sous-jacentes à l'extension récente de la culture. Compte tenu des conséquences de cette dynamique socio-économique qui est en cours, l'objectif à terme serait une réorganisation de la filière de production et de commercialisation au profit des producteurs. Ceci passerait nécessairement par la stabilisation du marché et un rééquilibrage de l'offre et de la demande au cours du temps, une limitation de la spéculation à travers la généralisation du stockage au village. Actuellement, les stratégies de stockage et de commercialisation varient selon les types d'exploitation. Les exploitants à faible revenu qui ont une balance déficitaire ont une stratégie de maintien de la sécurité alimentaire et adoptent facilement le stockage en grenier collectif. Les céréales sont bloquées et retirées seulement en période opportune. Par contre, les exploitants qui dégagent des surplus ont une stratégie de rente et n'affichent pas d'intérêt pour le stockage collectif et préfèrent stocker individuellement pour favoriser la spéculation. Ils vendent à ceux qui ont des déficits ou aux grands commerçants qui stockent dans des grands magasins. L'Etat à travers les autorités administratives et les chefs traditionnels a amorcé des actions répressives contre les grands commerçants qui entretiennent la spéculation sur le marché céréalier (marchés noirs et stocks clandestins) mais elles restent sans grand succès. Cette situation montre la nécessité de mettre en place un système d'encadrement et de suivi de la filière depuis les producteurs qui serait plus efficace pour réduire la spéculation et orienter le marché à leur profit. C'est en effet ce besoin de redistribution sociale et de réduction des tendances spéculatives qui ont favorisé l'émergence d'initiatives d'encadrement comme celle de l'APROSTOC (Association des Producteurs et Stockeurs de Céréales), du SAILD (Service d'Appui aux Initiatives Locale de Développement), du CDD (Comité Diocésain de Développement) qui encouragent les paysans dans le stockage collectif au niveau des villages. Ces associations contribuent à la régulation de l'approvisionnement en céréales des marchés

régionaux de manière à permettre aux producteurs d'éviter les ventes précoces et de lutter contre les pénuries. Elles financent la construction de magasins et le stockage des céréales est organisé dans les greniers communs avec une stratégie de redistribution qui dépend des besoins des exploitations (Mathieu, 2000 ; Abakachi, 2000).

Conséquences sur la gestion durable de l'espace et des ressources naturelles

En ce qui concerne l'évolution des ressources naturelles et des systèmes d'utilisation de l'espace, la dynamique d'extension du Muskuwaari soulève un réel problème de gestion durable. En effet, les défrichements systématiques des karals contribuent à la disparition brutale des ressources ligneuses qui sont indispensables à l'approvisionnement en bois des populations locales. En plus des défrichements systématiques sur les parcelles, des défrichements sont réalisés en général sur une bande protectrice assez large autour des zones cultivées pour protéger les cultures contre les oiseaux granivores. La cartographie multidate des aires de Muskuwaari sur la zone de référence autour de Maroua montre que les aires d'extension de la culture se superposent aux zones d'approvisionnement en bois. Le processus d'extension de la culture implique ainsi non pas seulement une régression du potentiel ligneux dans les zones concernées, mais une disparition de certaines poches d'approvisionnement en bois de feu. D'autre part, les jachères qui n'interviennent pas avant plusieurs années (15 à 20 ans sans rotation), se combinent aux défrichements et exposent les sols à la dégradation. La dynamique d'extension des sorghos repiqués a également des conséquences en terme de réduction de la disponibilité des pâturages. Ce sont principalement les pâturages de saison sèche qui disparaissent au profit de l'agriculture de contre saison, ce qui contribue à l'éloignement des zones de pâturages par rapport aux zones d'habitation. Dans certaines zones, on assiste à une fragmentation de l'espace pastoral qui ne permet plus une meilleure circulation entre les zones de pâturage. Ce qui entraîne inévitablement des conflits agropastoraux.

On peut se demander quelles stratégies les paysans mettent en place ou les choix, les adaptations que ceux ci opèrent (priorités) pour faire évoluer durablement leur agrosystème dans ces conditions ? En effet, les conséquences ne sont pas seulement négatives pour l'élevage mais c'est plutôt un nouveau système de production qui se met en place avec une forte complémentarité entre l'agriculture et l'élevage. Dans une certaine mesure, les deux activités évoluent en équilibre surtout en cas de faible pression et de relative disponibilité de ressources. Les pertes en ressources pastorales dues à la réduction des aires de pâturages utilisées actuellement pour le sorgho sont compensées par l'utilisation des résidus de culture. Les tiges de Muskuwaari seraient comparables aux meilleurs pâturages de saison sèche (Raimond, 1999) toutefois, une étude plus spécifique serait nécessaire pour apprécier la viabilité de cette forme d'intégration entre l'agriculture et l'élevage. Si l'on considère que la sédentarisation des éleveurs est une solution au problème de gestion de l'espace rural, tant il est vrai que certaines thèses soutiennent plutôt le fait que l'élevage transhumant soit plus durable, cette forme d'alimentation du bétail à partir des résidus de récolte qui prend de l'importance avec l'extension de la culture est un moyen pour sédentariser les éleveurs. Finalement, ce sont les éleveurs transhumants qui perçoivent de plus en plus l'intérêt économique du sorgho repiqué et contribuent à l'extension de la culture le long des axes de transhumance et autour des mares. Cette tendance a favorisé la sédentarisation de certains éleveurs et agro-éleveurs, le travail de la terre étant pour eux un moyen pour agrandir le troupeau (Raimond, 1999). Les élites *Fulbé* ont par le passé utilisé la mise en valeur des vastes karals par la production du Muskuwaari, comme source de revenu complémentaire à celle procurée par l'élevage. Cette stratégie a aujourd'hui tendance à se généraliser

(Timmermans, 1998). L'attaque des cultures par les oiseaux granivores est apparue comme l'un des problèmes majeurs qui affectent la production. C'est la principale raison qui amène les paysans à effectuer les défrichements à blanc dans les champs. Avec la réduction du couvert arboré, le vent et le ruissellement ont plus d'impacts négatifs sur la productivité des sols. Plusieurs stratégies de lutte contre les oiseaux qui menacent le Muskuwaari à la maturité ont été développées par les populations : ces sont d'abord les miradors qui ont commencé à être utilisés mais les oiseaux finissent par s'y habituer. Une autre stratégie a donc consisté à effectuer tout autour des blocs de champs, des défrichements de sécurité qui peuvent s'étendre sur près de 200 mètres, afin de supprimer les arbres qui peuvent servir de perchoir aux oiseaux. Sur des karals les plus vastes, les variétés les moins appréciées par les oiseaux comme le Burguri, sont placées en culture pure à la périphérie. Cette dernière stratégie n'est pas valable sur les karals s'étendant en continu sur plusieurs kilomètres carrés (Seignobos, 2000).

7.4.4. Analyse locale de l'extension récente et stratégie des acteurs

L'analyse comparée des situations des trois zones agroécologiques révèle que l'accroissement des superficies n'est pas très perceptible dans les piémonts. Les évolutions les plus significatives sont localisées dans la plaine du Diamaré et la plaine de Kaélé où on a enregistré les taux d'accroissement annuel de superficies respectifs de 4% et 3,1%. Dans le Diamaré les évolutions se font sur des anciennes jachères et par récupération des terres dégradées alors que dans la pédiplaine de Kaélé, ce sont des nouveaux défrichements qui s'effectuent sur des terres très aptes à la culture. Des investigations ont été menées au niveau de trois territoires villageois de référence afin de montrer comment se traduisent les dynamiques spatiales liées à la mise en culture des sorghos repiqués au niveau local et surtout pour identifier quelles sont les stratégies développées par les paysans pour faire face à ces évolutions dans les différents contextes agraires.

Cas du terroir de Balaza dans la plaine du Diamaré

Balaza est un village peul dans le Diamaré, situé dans une zone de production traditionnelle de Muskuwaari depuis l'introduction de la culture dans la région au début du 19^{ème} siècle. Les meilleurs karals y ont déjà été complètement défrichés et appropriés depuis plus d'une dizaine d'années. Entre 1987 et 1999, les superficies mises en culture dans la petite région autour de Balaza ont augmenté de plus de 200 %. Toutefois, la pluviométrie de la campagne 86/87 était défavorable par rapport à celle de 1998/99 où les pluies étaient importantes et mieux réparties au cours de l'année. Le croisement des deux couches d'information correspondant aux superficies cultivées en 1987 et 1999 révèle également qu'il n'y a presque pas eu d'abandon de terre entre les deux dates et que l'extension s'est effectuée sur de nouvelles terres au sud du village (figure 7.5a). Les vérifications sur le terrain ont révélé que ces terres ont été défrichées depuis plus d'une décennie et que l'on était presque dans une situation de récupération de terres hardées jadis cultivées. Ces terres nécessitent des aménagements tels que le labour et l'installation des diguettes avant la mise en culture. Les données d'enquêtes sur les exploitations montrent que les superficies moyennes de coton et de Muskuwaari par exploitation ont considérablement évoluées entre 1983 et 1995 passant respectivement de 0,4 à 0,7 et de 0,8 à 1,3 ha alors que les superficies moyennes de cultures pluviales sont restées pratiquement stables (0,6 ha). Cette tendance qui s'est maintenue jusqu'en 2000 traduit la stratégie paysanne qui ici, consiste à valoriser la complémentarité sorgho pluvial et sorgho

de contre saison pour assurer l'autosuffisance alimentaire et capitaliser les revenus du coton dans l'élevage (Seignobos et al., 1995 ; Abakachi, 2000).

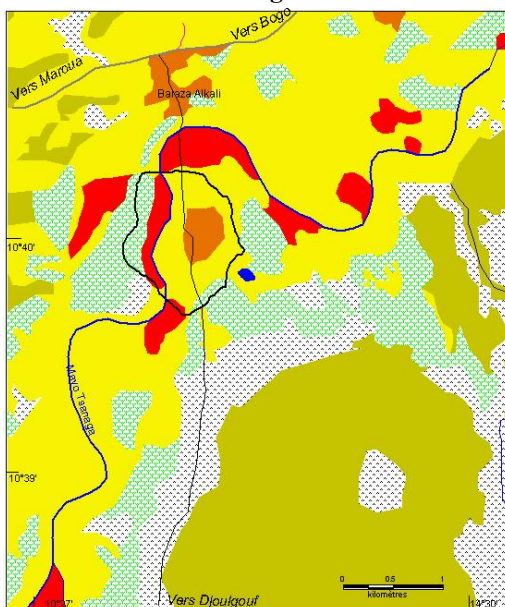
Cas du terroir de Mowo dans la zone des piémonts

Mowo est un village *Mofou* de la zone des piémonts des monts Mandara où l'adoption du sorgho repiqué est plus récente. L'extension des superficies dans la petite région autour de Mowo n'est pas très significative (1%) mais on a remarqué un taux de renouvellement assez important des terres car plus de 40% des terres repiquées en 1987 ne l'était plus en 1999. Ces abandons ne correspondent pas à des jachères, étant donné le contexte de saturation foncière et les stratégies paysannes d'accumulation et de contrôle de l'espace en cours dans la région (Seignobos et al., 1995 ; Seignobos et Teyssier, 1997). Cette situation s'explique mieux par les potentialités de terres de la région qui sont principalement des sols vertiques plus ou moins dégradées dont le caractère intermédiaire laisse au paysan le choix de la spéculation à mettre en place. Ce choix va dépendre des données climatiques de l'année ou des objectifs du paysan et des ressources dont il dispose. Dans le cas d'un bon début de saison par exemple, il serait plus économique et plus sûr pour un paysan de mettre en place une culture pluviale au lieu d'investir dans l'aménagement et la préparation du karal et courir ensuite le risque d'une mauvaise pluviométrie en fin de campagne. Dans le cas de Mowo, la conquête de terres de Muskuwaari se fait en dehors du terroir (figure 7.5b). La stratégie adoptée ici correspond à celle des zones à très forte densité de population qui consiste d'abord à assurer l'autosuffisance alimentaire.

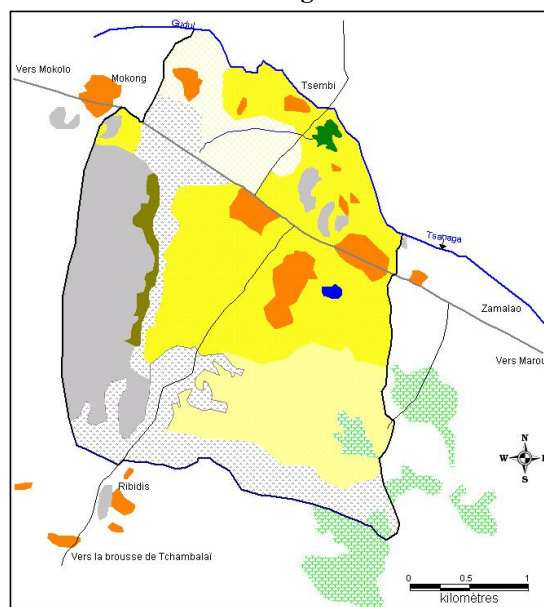
Cas du terroir de Gadas dans la plaine de Kaélé

Gadas est un village *Mundang* situé en zone de pédiplaine qui a connu l'introduction un peu plus tardive des Muskuwaari vers les années 1945. Les karals de ces zones, hors mis dans la partie sud (Moumour) ne sont pas aussi bonnes que ceux du Diamaré. Ici, les zones propices à la culture ne sont pas encore entièrement défrichées et mises en culture mais, le nombre limité de vertisols modaux et leur alimentation précaire en eau font que la culture n'occupe pas la même place dans l'agrosystème que dans les plaines du Diamaré (Seignobos, 1998). La couverture incomplète du terroir par les images satellites n'a pas permis de faire une analyse diachronique explicite comme à Balaza et Mowo. La cartographie de l'utilisation actuelle de l'espace met en exergue la structure type d'un terroir à forte dominance sorgho repiqué telle que présentée à la section précédente. On distingue successivement les champs de case, les zones de pâturage, des réserves foncières du village qui sont des brousses où s'effectue une extension agricole assez récente. Les champs de Muskuwaari à la limite du terroir sont installés sur un très vaste karal partagé avec les villages voisins (figure 7.5c). Les dynamiques de défrichements, d'appropriation des terres y sont plus importantes. L'importante réserve foncière est ainsi progressivement appropriée et mise en valeur par la culture du Muskuwaari avec le retour des populations migrantes. Toutefois, quelques vertisols restent encore en friche et constituent une importante réserve en bois de feu qui subit la pression des communautés voisines. La mise en jachère des terres agricoles est encore assez courante pour les cultures pluviales alors qu'elle devient rare pour le sorgho repiqué.

a. Territoire villageois de Balaza



b. Territoire villageois de Mowo



c. Territoire villageois de Gadas

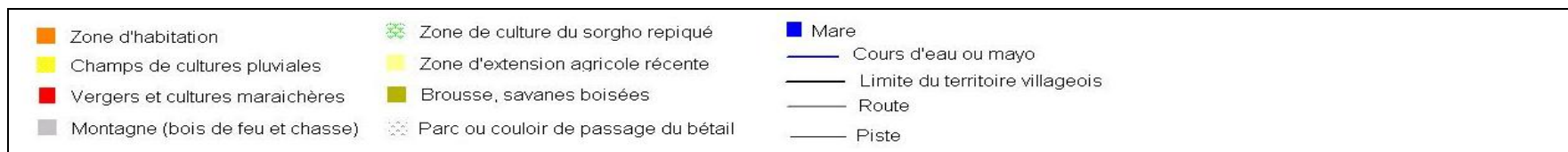
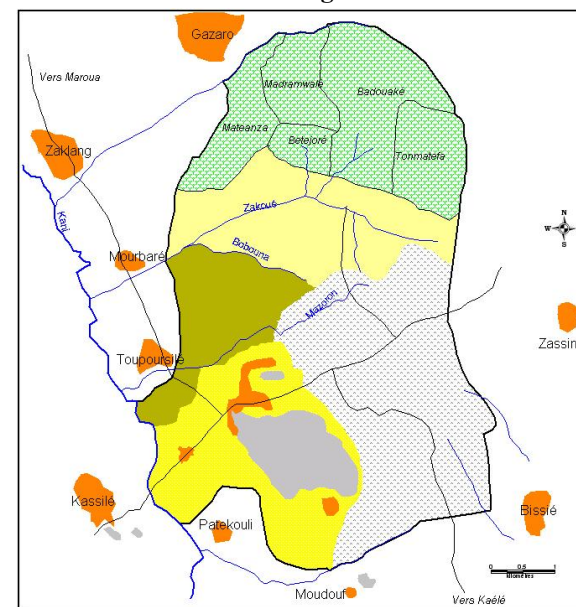


Figure 7.5 : Carte d'utilisation de l'espace à l'échelle des territoires villageois et localisation des zones de culture du sorgho de contre saison.

Dans les trois cas, les différentes formes d'utilisation de l'espace sont organisées de façon plus ou moins auréolaires autour des zones d'habitation. Lorsque les conditions du milieu le permettent, les zones de culture du sorgho de contre saison sont localisées dans l'auréole la plus externe, définissant un front de défriche avec les savanes boisées qui occupent les zones interstitielles entre territoire villageois voisins. Toutefois chaque terroir présente ses spécificités : (a) Balaza est un terroir de plaine avec les meilleurs vertisols ou la culture est très ancienne. (b) Mowo est un terroir de piémont où les vertisols sont en microtopographie. (c) Gadas est un terroir de la pédiplaine, avec des vertisols d'assez bonne qualité où la culture a été adoptée plus tardivement.

A Gadas, le développement du Muskuwaari est fortement limité par un déficit de la main d'œuvre et la qualité des vertisols qui exige une mise en terre précoce des plants. Contrairement aux producteurs de Muskuwaari des terroirs *Fulbé* du Diamaré, les *Mundangs* utilisent la main d'œuvre familiale et ont développé une longue tradition d'entraide pour les travaux agricoles. Cette solution ne permet pas de résorber tout le besoin en main d'œuvre requis. Vers le début des années 90, ils ont essayé d'adopter le modèle Peul où une main d'œuvre extérieure est utilisée. Ils ont très vite abandonné ce choix à cause des problèmes de trésorerie dont leur élevage assez limité n'est pas capable de résoudre, contrairement aux Peuls (Seignobos, 1998). A Gadas, la production est destinée prioritairement à l'autoconsommation mais on note chez plusieurs exploitants une stratégie qui consiste de plus en plus à rechercher un surplus pour la vente. Les jeunes producteurs sans personnes à charge font rarement le Muskuwaari à leur propre compte et lorsque c'est le cas, les superficies cultivées sont assez faibles. C'est plutôt le coton qui leur permet de subvenir à leurs besoins. Les producteurs les plus âgés développent une stratégie d'autosuffisance alimentaire et d'accumulation du capital foncier pour l'augmentation des superficies de Muskuwaari. Le coton commence à perdre de plus en plus d'importance et les revenus qui en découlent, lorsqu'ils sont importants, sont utilisés pour payer la main d'œuvre nécessaire à l'augmentation des superficies cultivées de Muskuwaari.

7.5. Hypothèses sur le processus d'expansion de la culture et les facteurs déterminants

7.5.1. Le processus d'expansion du sorgho de contre saison

Le diagnostic et l'analyse faite dans les deux sections précédentes montrent que l'extension récente de la culture du sorgho de contre saison a été possible grâce à un milieu physique offrant des conditions favorables et une forte demande impulsée par un contexte où la sécurité alimentaire demeure incertaine.

Dans la zone analysée à partir des images satellites, il ressort globalement qu'entre 1987 et 1999, la superficie des espaces utilisés pour la culture du sorgho repiqué est passée d'environ 65 147 ha à 94 197 ha, correspondant à un taux d'accroissement de 3,5% par an (Fotsing et al., 2006). La culture du sorgho repiqué a été identifiée comme la principale motivation des défrichements des savanes observées dans la région. Environ 50 % des zones qui ont été défrichées ont été converties uniquement en champs de Muskuwaari alors que l'autre moitié est convertie en cultures pluviales et en d'autres types d'occupations du sol. Le croisement de la carte des zones d'extension de la culture et la carte d'aptitude des terres à la culture sous un SIG permet de se rendre compte qu'une importante partie, (soit 61% en 1987 et 76% en 1999) des meilleures terres qui représentent 34% de la superficie de la zone d'étude ont déjà été défrichées et mis en valeur principalement par la culture du sorgho repiqué. Ces zones coïncident avec les zones d'approvisionnement en bois de feu et l'analyse visuelle des images satellites de 1990 et 1995 sur certains de ces sites montre que ces terres étaient encore en friches très récemment. 67% des nouvelles mises en culture se font de cette manière. 20% des mises en culture se fait par récupération des sols dénudés. La méthode d'analyse d'image ne permet de d'apprécier le niveau de dégradation de ces sols mais les vérités de terrain indiquent qu'il s'agit dans plusieurs cas de sols dégradés qui ont été récemment mis en valeur en y effectuant des aménagements (labour ou diguettes). Ces résultats sur le sorgho repiqué confirment les hypothèses du modèle explicatif des changements d'utilisation de l'espace que nous avons formulé au

chapitre 5 (figure 5.9). En effet, le processus d'extension du sorgho a suivi la croissance démographique et l'augmentation des besoins en céréales. On est passé d'un système extensif avec une relative disponibilité des terres pour aboutir à une situation de saturation foncière caractérisée par la réduction des jachères et la mise en valeur des terres marginales. Toutefois, les signes d'intensification et de passage à une culture de rente sont perceptibles et se traduisent par une complémentarité avec le système d'élevage et l'implication des acteurs urbains. Le contexte régional porte à croire que le rôle déjà important de cette culture dans l'agrosystème va se renforcer au cours du temps. Avec l'augmentation des besoins alimentaires et les difficultés de la filière cotonnière, on devrait s'attendre à voir cette culture jouer plusieurs rôles : un élément stratégique pour assurer la sécurité alimentaire, une nouvelle source de revenu complémentaire pour les paysans et une opportunité d'affaire pour les commerçants urbains.

7.5.2. Le sorgho de contre saison : une alternative à l'insécurité alimentaire

L'accroissement démographique est le facteur qui induit le plus, une importante demande alimentaire et favorise ainsi l'extension des zones cultivées. Les discussions avec les paysans montrent qu'ils perçoivent presque tous à l'échelle de leur ménage, l'augmentation de la population et des besoins alimentaires qui en découlent. Avant d'évoquer le besoin d'augmentation des revenus, la première raison évoquée par les paysans quant à la motivation pour l'augmentation des superficies cultivées en Muskuwaari est la nécessité de subvenir au besoin alimentaire de la famille. Dans les zones très peuplées, la pression foncière se présente comme la principale cause de l'adoption du sorgho. C'est le cas dans les pays *Massa* ou les pays *Tupuri* où le manque de terres exondées propices aux cultures pluviales a favorisé la diffusion des sorghos repiqués dans les bas fonds. D'un autre côté, le Muskuwaari occuperait une place importante dans la ration alimentaire des paysans des zones rurales. Ce constat se traduit bien dans une déclaration assez courante des paysans : « C'est le Muskuwaari qui nourrit la chair du paysan. On peut facilement l'apprécier sur le corps et les performances au travail d'une personne selon qu'elle se nourrit seulement de Muskuwaari ou de riz ». Dans les zones *Massa* et *Musgum* où les meilleurs karals sont longuement inondés, les paysans pratiquent la culture du riz qui est vendue afin d'acheter le Muskuwaari pour la famille. Du fait de son cycle végétatif qui est décalé dans le temps, le Muskuwaari procure au paysan une réserve alimentaire au moment où les récoltes des cultures pluviales sont achevées. La possibilité d'effectuer une deuxième récolte en pleine saison sèche contribue à réduire les risques de famine car la première récolte de cultures pluviales réalisée en septembre-octobre ne permet pas toujours d'assurer les besoins alimentaires pendant toute l'année, surtout en année de faible pluviométrie.

Le fait que les travaux de mise en culture du sorgho repiqué s'effectuent à une période de relative disponibilité de la main d'œuvre agricole est un facteur qui aurait renforcé la complémentarité entre le sorgho pluvial et le sorgho repiqué pour assurer la sécurité alimentaire en contribuant ainsi au développement du coton. De ce point de vue, ce sont les importants défrichements de karals qui ont permis le développement du coton en résolvant le problème de surcharge de travail qu'impose la culture du coton en saison de pluies. Réciproquement, les paysans qui augmentent les superficies de coton réduisent les possibilités de mise en culture des cultures pluviales pour deux raisons possibles : soit parce que la main d'œuvre est limitée, soit parce que le coton entre en compétition avec ces cultures sur les mêmes espaces. Dans certains cas, ce sont les aléas climatiques de début de saison qui limitent la réussite des cultures pluviales. Les paysans, pour faire face au déficit en cultures vivrières ont la possibilité de s'orienter vers la mise en culture du Muskuwaari qui est considéré comme une seconde chance pour eux.

7.5.3. Une nouvelle source de revenu pour les producteurs ruraux

La production de Muskuwaari a toujours été prioritairement destinée à l'autoconsommation, mais on a observé au cours de la dernière décennie que de nombreux exploitants des zones rurales recherchent de plus en plus des surplus de production pour la vente. Les besoins en sorgho de contre saison que la production régionale devra satisfaire incluent ceux de la population urbaine et des pays voisins tel que le Tchad et le Nigéria, compte tenu de l'importance régionale de cette culture.

L'expansion de la culture pourrait donc être déterminée par l'évolution de la filière cotonnière et en particulier le prix du coton. Un prix élevé du coton conduirait à une faible attention au sorgho pluvial et par conséquent une quantité plus importante de sorgho de contre saison serait nécessaire pour garantir les besoins alimentaires des populations. D'un autre côté, un faible prix du coton pourrait également résulter en une forte expansion de la culture du sorgho repiqué dans la mesure où les paysans ont des besoins économiques importants et seront amenés à produire le sorgho de contre saison pour la vente. La diffusion spatiale de la culture pourra dans ce cas être déterminée conjointement par l'aptitude des sols (productivité) et l'accessibilité au marché (proximité aux routes et la distance au marché). Bien que la culture du sorgho repiqué se fasse à un moment du calendrier agricole assez libre, il faut noter que la période pendant laquelle il est possible de repiquer dans des bonnes conditions est assez courte. La préparation des champs et le repiquage sont quasi-simultanés et exigent une importante main d'œuvre dans un temps extrêmement réduit (figure 7.2). Les travaux de repiquage du Muskuwaari coïncident avec les traitements phytosanitaires du coton, ce qui peut poser un problème de compétition pour la main d'œuvre. Ainsi, les superficies cultivées dépendront fortement et directement de la disponibilité de cette main d'œuvre. Les peuls règlent le problème de main d'œuvre avec les moyens générés par l'élevage alors que les *Mundangs* ont une stratégie qui consiste à utiliser la main d'œuvre familiale ou l'entraide qui reste insuffisante.

7.5.4. Une opportunité d'affaire pour les acteurs urbains.

La forte variation du prix du sac de Muskuwaari d'une période à l'autre encourage la spéculation. Au mois de mars le prix d'un sac d'environ 100 kg qui est en moyenne de 7000 FCFA peut atteindre 30 000 FCFA au mois d'août, période de disette, lorsque la plupart des réserves alimentaires sont épuisées. Cette situation favorise le développement du marché et l'implication de grands propriétaires terriens et de grands commerçants urbains dans la filière de production et de commercialisation. La dynamique d'expansion du sorgho repiqué est fortement influencée par les éléments du système de production comme l'organisation du calendrier agricole, le niveau d'équipement et la disponibilité de la main d'œuvre. L'expansion de la culture va certainement dépendre d'une part de l'évolution de la culture cotonnière et d'autre part des investissements que les populations vont consentir pour mobiliser la main d'œuvre nécessaire à la production destinée aux grands marchés régionaux.

7.5.5. Les signes d'intensification et de passage à une culture de rente

Si l'on admet que l'extension récente de la culture du Muskuwaari a été fortement liée à l'essor de la culture cotonnière, avec la crise que traverse cette filière au cours de ces dernières années, on est en voie de se demander quel avenir serait réservé au développement du Muskuwaari. Compte tenu du caractère

marchand qu'elle a commencé à revêtir, les paysans auront de plus en plus tendance à dégager des surplus de production pour assurer les besoins économiques qui était autrefois assurés par le coton. On a vu par exemple au Tchad que le retrait de la société cotonnière dans certaines régions (Mayo Kébbi et Salamat) suite à la situation de crise des années 70 a favorisé l'extension des superficies cultivées en sorgho repiqué dans une perspective de diversification de production et de commercialisation (Raimond, 1999). Dans l'hypothèse d'une évolution similaire dans la région du Nord Cameroun, la demande serait plus forte et le système de production exigera une main d'œuvre plus importante et des pratiques plus intensives. Pour le moment, la main d'œuvre reste encore relativement disponible et vient des zones où la culture n'est pas pratiquée (montagnes, zone inondée, Tchad). De plus, des signes d'intensification sont également visibles et se traduisent actuellement par la densification des carroyages de diguettes pour une meilleure conservation de l'eau et l'artificialisation du couvert graminéen notamment par la récolte des graines de *Setaria pumila* et *Setaria sphacelata* pour ensemencement dans les champs (Seignobos, 2000). D'autres formes d'intensification sont recherchées par les cultivateurs mais restent localisées et nécessitent un appui technique pour lever certaines contraintes, notamment d'enherbement (Mathieu, 2000).

7.6. Conclusion et perspectives

Ce chapitre met en exergue les résultats substantiels liés à l'application du SIE SMALL Savannah à l'analyse de l'extension récente du sorgho de contre saison dans la zone d'étude. Quelques leçons d'ordre méthodologique peuvent également être dégagées de cette expérience.

Sur le plan méthodologique, les leçons apprises portent sur les fonctionnalités des différents modules mis en œuvre dans cette application. La principale contrainte du module d'observation est l'indisponibilité des données permettant de représenter les phénomènes étudiés. La pertinence des résultats de cartographie par exemple dépend de plusieurs critères tels que le choix de la résolution spatiale et temporelle du jeu de données utilisées, la combinaison judicieuse des traitements numériques d'image avec la photo-interprétation qui devrait s'appuyer sur une meilleure connaissance du paysage et du système agraire. L'approche recommandée suggère de procéder à une cartographie participative sur des sites bien identifiés à partir des résultats du traitement numérique des images. L'avantage d'une telle approche c'est qu'elle fournit des éléments qui permettront de lier les dynamiques spatiales avec les processus et les facteurs qui les déterminent. Cette application illustre comment le module de diagnostic et de caractérisation exploite une diversité de données comprenant les informations issues de la revue de la littérature, les cartes existantes et la cartographie participative à l'échelle des terroirs. Le SIE doit prévoir des structures de données qui permettent d'intégrer l'ensemble de ces informations et des procédures pour extraire les connaissances utiles pour la modélisation et l'aide à la décision.

Sur le plan substantiel, cette application du SIE SMALL Savannah a permis de caractériser les systèmes agraires à base de sorgho repiqué et de mettre en évidence la diversité des situations liées à l'extension récente de la culture du sorgho de contre saison à différentes échelles. Au cours des deux dernières décennies, l'extension spatiale du Muskuwaari s'est effectuée au détriment des brousses, lorsque le sol était approprié. Avec ces stratégies extensives, les terres disponibles pour le Muskuwaari subissent une importante compétition, compte tenu de la forte demande et les attitudes spéculatives des acteurs urbains et ruraux. L'analyse des dynamiques spatiales sur une zone de référence a montré les conséquences des défrichements effectués pour la mise en valeur des karals. La réduction des espaces de brousse qui conduit

à une compétition pour l'espace entre les activités agricoles, pastorales et sylvicoles nécessitera également d'adapter les politiques de gestion de l'espace et des ressources naturelles. Des recherches et des actions concrètes sont nécessaires pour contribuer à une intégration de l'arbre à la culture du sorgho de contre saison.

Les résultats des analyses montrent également que la phase d'extension est en cours d'achèvement et soulève de nombreux enjeux liés à la durabilité du système. Le contexte agricole régionale porte à croire que le rôle de cette culture dans l'agrosystème va se renforcer au cours du temps. Cette hypothèse amène à s'interroger sur la nature des développements futurs et les actions qui peuvent être prises pour accompagner les dynamiques agraires et assurer un développement durable. Prédire les impacts liés à la future expansion de cette culture est d'une importance essentielle pour le développement de cette région. Les hypothèses formulées sur les facteurs et les processus dans ce chapitre utilisés pour analyser quantitativement les facteurs déterminants et construire les modèles explicatifs et prédictifs de la distribution spatiale de la culture (chapitre 9). Ces hypothèses sont également utilisées pour calibrer le modèle dynamique développé pour simuler les principales trajectoires d'évolution des changements sur une petite région de la zone d'étude (chapitre 10). L'utilisation effective de ce modèle nécessite une compréhension plus fine des règles d'accès à la terre, des stratégies de mise en valeur de l'espace et des interactions entre les différents acteurs impliqués.



Photo 8. Un défrichage récent pour l'installation d'un champ de sorgho de contre saison sur la route de Foulou à Zouzoui, dans la zone des plaines de Kaélé, Extrême Nord du Cameroun.

Chapitre 8. Analyse spatiale des changements d'occupation du sol dans la région autour de Maroua

Résumé

La localisation et les mesures précises des changements d'occupation du sol sont très importantes pour évaluer les dynamiques agraires et comprendre les processus qui les gouvernent. Toutefois, ces informations sont très difficiles à obtenir ou à suivre sur de vastes régions avec les méthodes d'enquête traditionnelles. Dans ce chapitre, le Système d'Information SMALL Savannah est utilisé comme outil pour l'observation et l'analyse spatiale des changements d'occupation du sol dans la région autour de Maroua dans l'Extrême Nord du Cameroun. Une analyse diachronique et multi-niveau a été effectuée en utilisant un couple d'images satellites de 1987 et 1999. L'approche d'analyse d'image combine les traitements automatiques et la photo-interprétation pour dériver des structures d'occupation du sol pertinentes. La validation est effectuée sur la carte la plus récente en utilisant les données GPS comme référence. Les informations sur les erreurs de réalisation permettent d'améliorer la précision des cartes obtenues. Le croisement des cartes sous le SIG indique que les savanes boisées ont considérablement diminué (-31%) au profit de l'extension des zones cultivées qui concerne principalement la culture du sorgho de contre saison (+44%) et les zones de cultures pluviales (+36%). Plus récemment, on a également observé une tendance à la récupération des sols nus le plus souvent dégradés pour les activités agricoles (-39%). Les jachères sont de plus en plus rares et les superficies des zones où on observe la reprise de la végétation ligneuse sont assez faibles (4%). L'analyse au niveau local permet d'avoir des connaissances plus pertinentes sur la diversité des situations et de mieux expliciter les stratégies des acteurs face aux différentes mutations. Des propositions d'aménagement et de gestion de l'espace adaptées peuvent ainsi être dérivées.

Mots clés : changement d'occupation du sol, analyse diachronique, cartographie participative, analyse spatiale multi-niveau, gestion de l'espace.

Abstract

The location and accurate measurements of changes in land cover are very important for evaluating land use dynamics and a better understanding the underlying processes. However, these informations on land cover are often very difficult to obtain with traditional survey methods for relatively large areas and extended periods of time. In this chapter, the Environmental Information System SMALL Savanna is used as a tool for the observation and spatial analysis of land cover change in the region around Maroua, Far North of Cameroon. A diachronic and multilevel analysis is carried out, using a couple of satellite images from 1987 and 1999. Land cover patterns were derived following an approach that combines automatic image analysis with photo-interpretation. The most recent map was validated using GPS data gathered from field visits; corrections were made based on identified errors. Change analysis with GIS indicates an important decrease of the woody savannas area (-31%) which is replaced by cultivated area consisting largely of dry season agriculture (+44%) and rainfall agriculture fields (+36%). Recently, bare and often degraded land appears to be reclaimed for agricultural activities (-39%). There is an increasing scarcity of fallows and the total area where woody vegetation has recovered is extremely limited (4%). Local analysis helps to get more insight in the diversity of land use change and to explicit actor's strategies to face ongoing changes. Appropriate suggestions for land use management and planning can be derived from the results of our analyses.

Key words: land cover change, diachronic analysis, participatory mapping, multi-level spatial analysis, land management.

8.1. Introduction

Le système agraire des zones de savane de l'Extrême Nord du Cameroun présente une diversité de situations et de nombreuses interactions dont dépend sa dynamique (Dugué et al., 1994). On a observé au cours des deux dernières décennies d'importantes mutations dans les systèmes de mise en valeur de l'espace (Boutrais, et al., 1984; Beauvilain, 1989 ; Triboulet, 1995). L'analyse empirique de la structure et des changements d'utilisation de l'espace effectuée au chapitre 5 a permis de décrire les principales dynamiques qui opèrent dans chacune des grandes zones agroécologiques sans les localiser ni les quantifier. La localisation et les mesures précises de ces changements sont pourtant très importantes car elles permettent d'apprécier le rythme des évolutions et leurs conséquences éventuelles. En intégrant ces informations dans un SIG avec les données sur les facteurs biophysique et humain, on arriverait à mieux caractériser les dynamiques agraires et expliquer les processus qui les gouvernent. Toutefois, les données spatiales nécessaires à une telle application ne sont pas toujours disponibles pour plusieurs raisons : les difficultés d'acquisition des images spatiales, l'irrégularité des prises de vue, la qualité approximative des images et l'hétérogénéité des vastes étendues à analyser (Mullon, 1994).

Au chapitre précédent, une analyse spatiale a été effectuée pour comprendre les causes et les conséquences de l'extension récente du sorgho de contre saison dans la zone d'étude (Fotsing et Mainan, 2003). Sur le plan méthodologique, la principale contrainte relevée est l'indisponibilité des données permettant de représenter les phénomènes étudiés. La pertinence des résultats de cartographie par exemple dépend de plusieurs critères tels que le choix de la résolution spatiale et temporelle du jeu de données utilisées, la combinaison judicieuse des traitements numériques d'image avec la photo-interprétation qui devrait s'appuyer sur une meilleure connaissance du paysage et du système agraire. Compte tenu de ces contraintes, l'application développée dans ce chapitre s'est focalisée sur une petite région représentative de la zone d'étude où les données plus précises sont disponibles. Sur le plan substantiel, les résultats du chapitre précédent ont montré que la dynamique d'extension du sorgho de contre saison a conduit à une réduction des espaces de brousse et une compétition plus importante pour l'espace entre les activités agricoles, pastorales et sylvicoles. L'analyse et la compréhension de ces interactions entre les différentes formes d'utilisation de l'espace constituent une étape importante pour la construction des modèles prédictifs et de simulation des changements.

Dans ce chapitre, le Système d'Information SMALL Savannah est utilisé comme outil pour l'observation et l'analyse spatiale de ces changements d'occupation du sol dans la région autour de Maroua (Fotsing et al., 2006). L'application a un triple objectif : la caractérisation de la structure et de l'occupation du sol, l'évaluation quantitative des différentes conversions de l'utilisation de l'espace au cours du temps et l'identification des stratégies des acteurs face aux mutations en cours. Le contenu du chapitre est structuré comme suit : la section suivante rappelle le contexte de l'étude, les objectifs et la méthodologie d'analyse suivie ; 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 l'application de chaque module de SMALL Savannah à cette étude de cas. La section 3 décrit les caractéristiques des principales classes d'occupation du sol identifiées et leurs logiques d'organisation spatiale (Diagnostic et Caractérisation). La section 4 porte sur l'analyse des changements d'occupation du sol observés à l'échelle régionale (Observation et Analyse spatiale). La section 5 est consacrée à une analyse locale de ces

dynamiques en vue d'expliciter les pratiques et stratégies d'utilisation et de gestion de l'espace par les acteurs (Explication et Prédiction). La section 6 fait une synthèse des leçons méthodologiques et substantielles de cette application.

8.2. Contexte et cadre méthodologique

8.2.1. Zone d'étude et problématique

La zone d'étude pour cette application est une région autour de la ville de Maroua, le principal centre urbain de la région de l'Extrême Nord du Cameroun. L'étendue de cette zone qui correspond à celle d'une scène d'image du satellite SPOT, couvre une superficie d'environ 3600 km² (figure 8.1). Cette région peut être considérée comme une unité géographique représentative de la zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun du fait qu'elle renferme la diversité des situations agroécologiques identifiée à l'échelle régionale. Ainsi, elle est partagée entre la plaine du Diamaré, la pédiplaine de Kaélé et les piémonts des monts Mandara. C'est une zone de forte densité de population avec d'importants flux migratoires. Le système agraire est caractérisé par une importante activité pastorale et un secteur agricole en pleine expansion. Le coton est la principale culture de rente et on y pratique une grande diversité des cultures vivrières parmi lesquelles le sorgho pluvial, le sorgho de contre saison, le maïs et l'arachide. De nombreux auteurs ont signalé des profondes transformations du paysage agraire et de l'utilisation du sol au cours des dernières décennies (Boutrais et al., 1984; Beauvilain, 1989; Triboulet, 1995). A l'origine de ces transformations sont la très forte pression démographique, les courants migratoires qui ont marqué l'histoire de cette région (Berghausser, 1996), le déplacement des troupeaux venant des zones sahéliennes à la recherche de nouveaux pâturages (Lighthart, 1993; Moritz, 1994), le problème que pose l'accès au bois de feu par les ménages (Assan, 1991; Van Well, 1998; Madi, 2002) et son impact sur les zones d'approvisionnement. Le foisonnement de tous ces processus au sein d'un même territoire est de nature à déboucher sur des conflits d'activités, la dégradation de la productivité du milieu et la perte de sa biodiversité. A titre d'exemple, les résultats du chapitre précédent ont montré que la dynamique d'extension du sorgho de contre saison conduit à une réduction des espaces de brousse et une compétition plus importante pour l'espace entre les activités agricoles, pastorales et sylvicoles. L'analyse et la compréhension de ces interactions constituent une étape importante pour la construction des modèles prédictifs et de simulation des changements. Ce chapitre porte sur une analyse spatiale et quantitative qui devrait permettre de caractériser les formes d'occupation du sol, d'évaluer les différentes conversions et d'identifier les stratégies des acteurs face aux mutations en cours.

8.2.2. Cadre méthodologique de l'étude

Aperçu global de la démarche

Pour atteindre les objectifs ci-dessus, le Système d'Information SMALL Savannah présenté au chapitre 6 est utilisé comme outil pour l'observation et l'analyse spatiale des changements d'occupation du sol. La figure 8.2 illustre les principaux modules du SIE qui sont mis en œuvre. Le diagnostic du système d'utilisation de l'espace qui a été effectué au chapitre 5 n'est plus traité ici. La caractérisation porte sur les classes d'occupation du sol identifiées par télédétection. Cette application illustre également la mise en

œuvre du dispositif multi-échelle qui a été présenté au chapitre 4 et sur lequel repose le SIE SMALL Savannah.

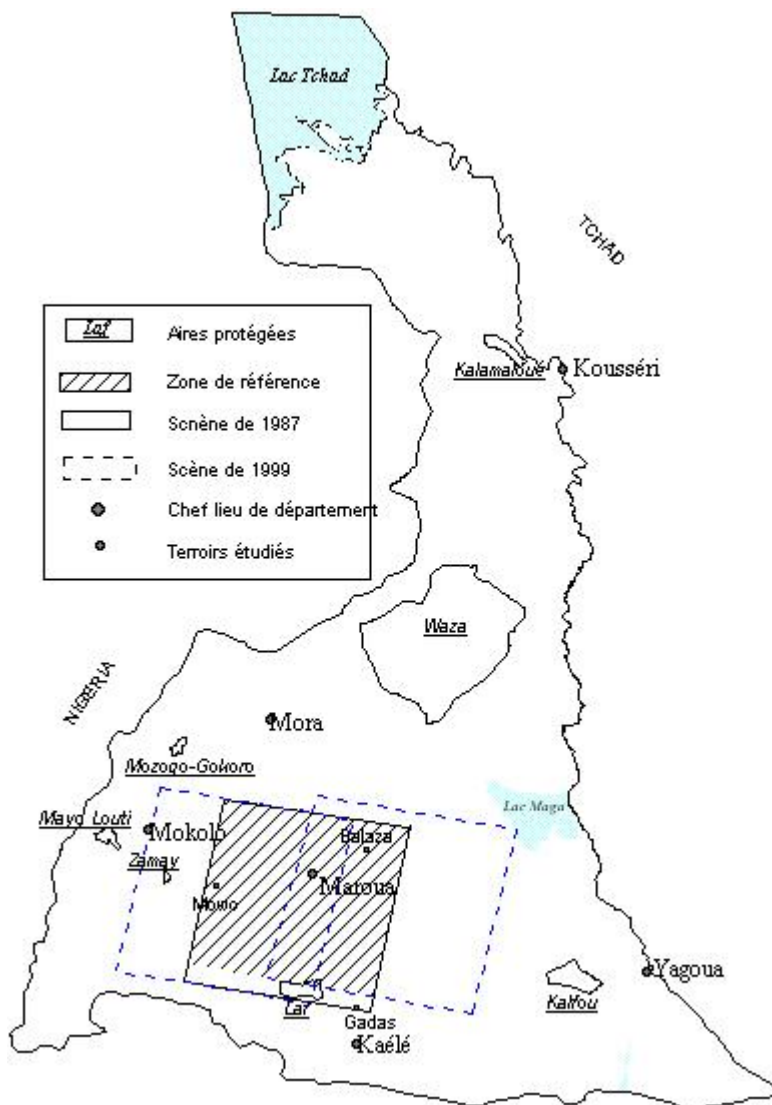


Figure 8.1: Localisation de la zone d'étude, des scènes d'images du satellite SPOT utilisées et des terroirs étudiés.

En effet, l'analyse des changements d'occupation du sol s'articule entre trois principaux niveaux d'échelle : la région autour de Maroua, les zones agroécologiques et les territoires villageois. A chaque niveau, l'analyse apporte des éléments de compréhension complémentaires et nécessite l'utilisation des données spécifiques et des méthodes ou outils appropriés. Le niveau régional fournit les tendances d'évolution des dynamiques en cours et leurs conséquences. Le niveau local permet d'illustrer comment les dynamiques se traduisent dans les systèmes de mise en valeur de l'espace et expliciter les stratégies des acteurs. Les données spatiales et quantitatives produites par cette application constituent des données de base pour la prédiction (chapitre 9) et la modélisation dynamique des changements futurs (chapitre 10). Les paragraphes suivants décrivent tour à tour les étapes de sélection des données, de traitement des images et d'analyse spatiale des changements.

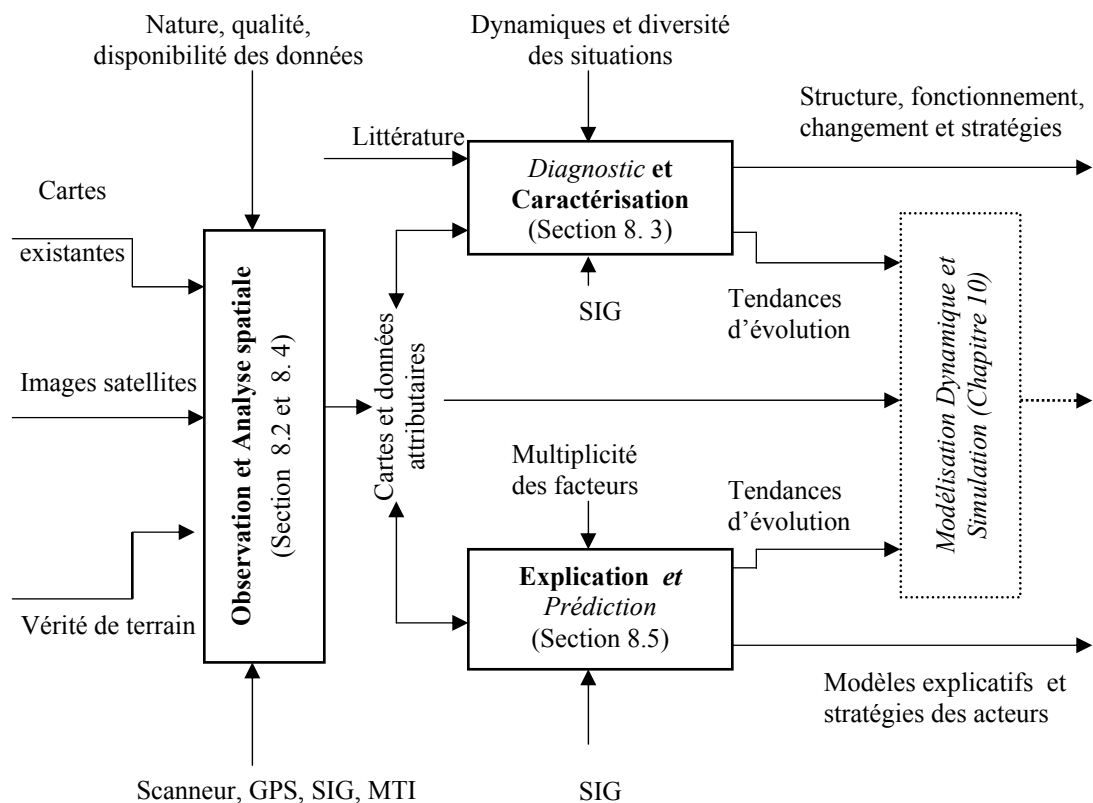


Figure 8.2. Cadre conceptuel et outils de SMALL Savannah utilisés pour l'analyse des changements d'occupation du sol. Le rectangle en pointillé et les textes en italique représentent les modules non utilisés dans cette application.

Sélection des données de télédétection

Les trois sources de données de télédétection les plus utilisées pour l'étude de la végétation et des espaces agricoles sont les photographies aériennes, les images des satellites d'observation de la terre et les satellites météorologiques. En effet, le choix des données appropriées est déterminé par les contraintes de chaque technologie et les objectifs ou la nature des phénomènes que l'on veut mettre en exergue. Les photographies aériennes sont préférables aux images satellites si on veut identifier de petits objets, localiser des points d'échantillonnage, inventorier des cultures dans une région ayant de très petits parcellaires. Les images d'observation de la terre sont adaptées aux besoins de la cartographie des sols et du couvert végétal à l'échelle d'une région. La résolution spatiale et la largeur spectrale sont deux critères de choix importants qui sont déterminés respectivement par la nature et la qualité de l'information qu'on désire extraire. En exploitant les images SPOT et LANDSAT, on pourrait tirer profit en même temps de la très haute résolution spatiale de SPOT et de la grande largeur spectrale de LANDSAT. L'instrument HRVIR de SPOT 4 intègre une bande spectrale supplémentaire dans le moyen infrarouge (SWIR) qui offre une meilleure capacité de discrimination entre les différentes cultures, le reste du couvert végétal et se trouve donc indiqué pour la cartographie des paysages agraires.

Le choix des images dans cette étude a été guidé par le besoin d'une analyse de l'extension de la culture du sorgho de contre saison et ses conséquences sur les autres formes d'utilisation de l'espace, notamment les

défrichements de la savane boisée et la dégradation des pâturages (chapitre 7). Les images acquises entre le 15 janvier et le 15 février semblent être les plus appropriées pour atteindre cet objectif si on se réfère au calendrier agricole de la région. Le mois de janvier correspond aux dates de croissance maximale du sorgho de contre saison. La récolte qui commence pendant ce mois se poursuit jusqu'au début du mois de mars en fonction des zones de production. La période identifiée théoriquement pour mener cette étude était celle couvrant les deux dernières décennies, les processus étudiés ayant pris de l'importance au début des années 90. La base de données SMALL Savannah comprend un ensemble d'images des satellites SPOT et LANDSAT acquises à différentes dates sur l'étendue de la région de l'Extrême Nord du Cameroun : LANDSAT MSS de décembre 1975 – SPOT de janvier 1987 – LANDSAT TM de novembre 1990 – SPOT de janvier 1995 - SPOT de février 1999. Toutefois les contraintes liées aux missions d'observation et les possibilités offertes par les satellites d'observation comme la nature des capteurs, la répétitivité et la qualité des images ont limité le choix d'une séquence d'images appropriée pour suivre les dynamiques en cours. A titre d'exemple, l'image LANDSAT de 1975 a une faible précision (57m) et sa qualité est approximative à cause des conditions d'acquisition. De plus, toutes les images ne couvrent pas la même étendue géographique et les dates d'acquisition si situent à des périodes différentes de l'année. Les autres données utilisées pour cette application sont les points GPS associés aux vérités de terrain et la carte du zonage agroécologique (Dugué et al., 1994).

Analyse des images et cartographie de l'occupation du sol

Les deux scènes d'images SPOT récentes ayant les mêmes paramètres d'acquisition (KJ 87-328, SPOT XI 4 bandes, 28/02/1999, niveau de traitement 2A) ont été assemblées en une image pour couvrir la région autour de Maroua (figure 8.1). La scène d'image d'archive (KJ 87-329, SPOT XS 3 bandes, 15/01/1987) a été corrigé géométriquement pour être facilement superposée à l'image de 1999. Deux cartes d'occupation du sol ont été dérivées à partir de ce couple d'images en utilisant la procédure d'analyse d'image qui est décrite en détail au chapitre 3 (Fotsing et al., 2006). Cette procédure combine itérativement les traitements numériques et la photo-interprétation pour extraire des structures d'occupation du sol pertinentes. Les informations et connaissances utilisées pour la photo-interprétation finale proviennent des traitements numériques, des observations directes et des travaux de cartographie participative. Une procédure de généralisation cartographique reposant sur les opérations de morphologique mathématique est appliquée aux cartes issues de la classification multispectrale afin de faciliter l'interprétation des structures d'occupation du sol et leur intégration au SIG.

Analyse spatiale des changements d'occupation du sol

La succession des traitements appliqués pour détecter et analyser les changements d'occupation du sol est résumée dans la figure 8.3. Le croisement des deux cartes d'occupation du sol permet de quantifier et localiser l'ensemble des conversions de l'occupation du sol sur la zone d'étude. Deux types de traitements sont appliqués pour changer de niveau d'analyse : le croisement avec la carte des zones agroécologiques et l'extraction des cartes de conversion sur des petites régions autour d'un territoire jugé représentatif (Fotsing et al., 2003). La comparaison des tendances par zone agroécologique et les analyses au niveau local permettent de mettre en exergue la diversité des situations et de mieux expliquer les processus en cours. Le niveau local se trouve approprié pour expliciter les causes des changements d'occupation du sol et les stratégies des acteurs. Des

propositions pertinentes d'aménagement et de gestion de l'espace peuvent ensuite être dérivées de la synthèse de ces connaissances.

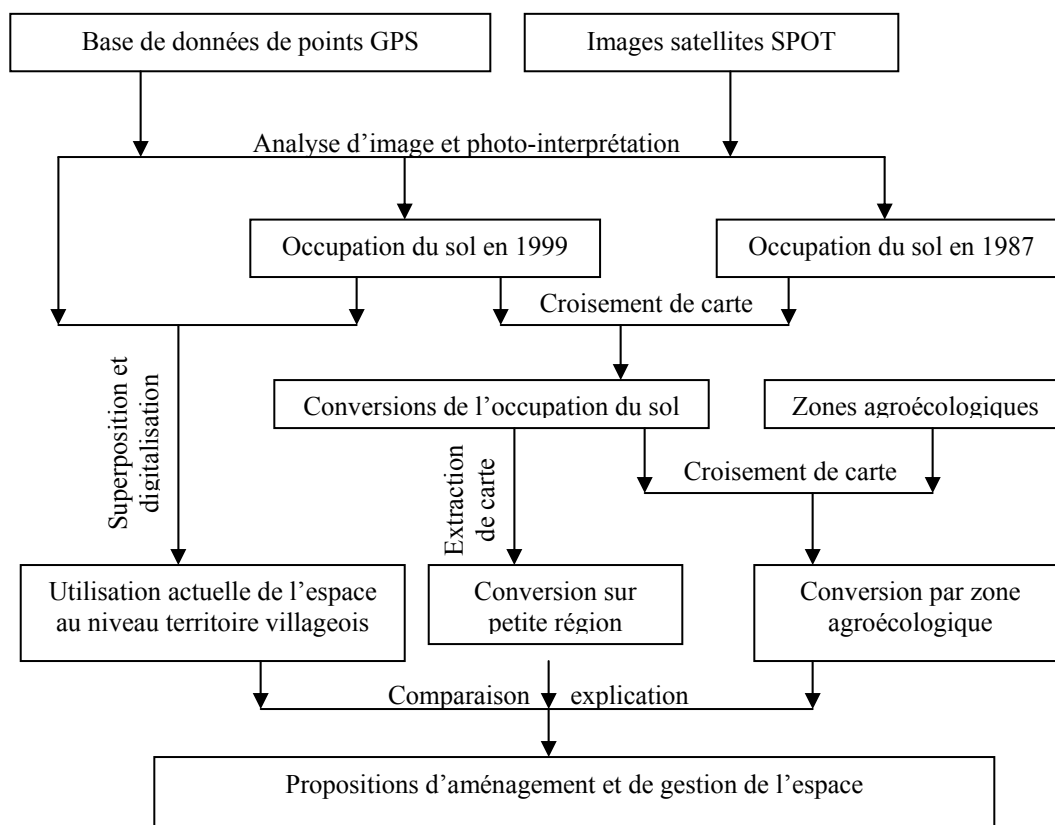


Figure 8.3 : Organigramme des traitements effectués pour l'identification et l'analyse des conversions de l'occupation du sol.

8.3. Caractéristiques des différentes classes d'occupation du sol identifiées

8.3.1. Nature des classes d'occupation du sol et règles d'identification

Les traitements effectués ont permis d'identifier les huit principales classes d'occupation suivantes : les zones d'habitation, les cultures maraîchères, les zones de cultures pluviales, les sols nus, le sorgho repiqué, les savanes boisées, les espaces parcourus par le feu et les zones montagneuses. Cette sous-section décrit tour à tour les caractéristiques de chaque type d'occupation du sol en fonction de leur apparence sur les images et leur physionomie sur le terrain.

Les zones d'habitation

Les zones d'habitation se présentent sous deux formes différentes. Les zones d'habitation urbaine se distinguent par les toits en tôles ayant une très forte réflectance alors que les habitations des zones rurales présentent deux caractéristiques qui ne facilitent par leur détection : leur toit en paille absorbant la lumière et la très faible étendue de l'ensemble qu'elles constituent. Dans les deux cas, les parcs arborés autour des cases est un indicateur d'une présence humaine mais posent des problèmes pour leur délimitation précise.

Les zones de cultures maraîchères et vergers

Les zones de cultures maraîchères sont le plus souvent en association avec des petits vergers et les cultures irriguées. Ces zones sont remarquables du fait de leur feuillage vert et luxuriant. Les cultures pratiquées sur ces petites superficies sont assez variées et comprennent la patate, l'ail, l'oignon, la salade, le chou, la carotte, le gombo, la tomate, le persils, le céleris, le poivron, etc. Cette classe est facile à identifier grâce à sa localisation et sa texture remarquable sur les compositions colorées. Le rouge vif témoignant l'importance de l'activité chlorophyllienne. Les cultures maraîchères sont pratiquées le long des cours d'eau, à une distance qui leur permet de profiter des réserves hydriques relativement importantes dans le voisinage des lits de ces cours d'eau. De plus, la distance entre les champs et les zones d'habitation est relativement faible.

Les zones de cultures pluviales

Les zones de cultures pluviales constituent l'unité la plus hétérogène. Elles regroupent principalement les champs de coton, de sorgho pluvial, de mil ou de maïs. Au moment de prise de vue des images utilisées, la récolte a déjà eu lieu en fin de saison de pluies. Ces zones présentent deux facettes de paysage remarquable sur les images de saison sèche : les zones de cultures pluviales qui s'apparentent aux sols dénudés parce que le couvert arboré n'est pas important. Au mois de janvier, on y aperçoit les résidus de récoltes qui témoignent de leur usage. Les zones de cultures pluviales sous parc arboré regroupent les surfaces destinées aux cultures pluviales qui présentent une très légère activité chlorophyllienne du fait de la couverture de certains arbres sélectionnés et entretenus par les paysans. Parmi ces arbres on peut citer : *l'Acacia albida*, *Azadirachta indica*, *Tamarindus indica*, le Baobab, le Rhonier et *Ficus ssp.*

Les zones de sols nus

Les zones de sols nus correspondent à des sols dénudés, le plus souvent dégradés encore appelés hardés. Ces zones sont des espaces dépourvus de végétation qui correspondent à des fonds sableux des cours d'eau temporaires ou encore à des zones cultivées qui sont complètement dénudées après la récolte. Les sols nus correspondent dans certaines zones à des espaces où la forte concentration de la population entraîne une surexploitation des terres qui conduit inévitablement à leur dégradation. Ailleurs, ces espaces correspondent à une végétation arbustive rabougrie ou dégradée en majorité dominée par des sols nus. Dans ce cas, ils sont utilisés le plus souvent comme parc à bétail ou zone de parcours pour les troupeaux.

Les zones de culture de sorgho de contre saison

Les zones de culture de sorgho de contre saison sont caractérisées par la végétation active et la nature des sols. Au mois de janvier, la plante de sorgho de contre saison est à un stade de croissance maximum et les espaces correspondant présentent une végétation dense en pleine activité chlorophyllienne. Toutefois, la réponse spectrale est influencée par la forte dominance des sols argileux sombres sur lesquels la culture est pratiquée. En dehors des espaces boisés urbain et des cultures maraîchères autour des cours d'eau qui sont facilement identifiées, les cultures de sorgho ont des valeurs les plus fortes de l'indice de végétation. La végétation dominante avant l'installation des champs est une savane arbustive *d'Acacia Seyal*.

Les espaces parcourus par les feux

Les espaces parcourus par les feux qui ont été identifiés sur les images sont principalement les espaces de savanes boisées. Les feux sont allumés chaque année dans les zones de jachère, les friches et les zones non cultivées comme les réserves forestières. A la fin de la saison des pluies (octobre-novembre), les agriculteurs allument également des feux sur les parcelles de sorgho repiqué afin de détruire la végétation herbeuse et ligneuse avant le repiquage. Les zones de feu visibles sur les images sont ceux effectués au moment où le sorgho repiqué arrive à épiaison (décembre-janvier). Ces feux sont effectués dans les zones de brousse environnant les champs de sorgho repiqué afin d'évacuer les oiseaux granivores. On note également des feux effectués entre décembre et janvier par les éleveurs sur des vastes superficies des zones de pâturage afin de provoquer la régénération de la strate herbacée nécessaire à l'alimentation du bétail.

Les zones de savanes boisées

La végétation des zones de savanes est composée de formations mixtes avec une strate graminéenne peu dense, et une strate ligneuse composée d'arbres plus ou moins hauts. Les savanes herbeuses avec de très faibles densités d'arbres ou sans ligneux du tout auront tendance à être classées en sols nus. Ces savanes boisées en général arbustives, sont constituées d'épineux et présentent plusieurs faciès en fonction de la zone. Dans la plaine du Diamaré au sud de Bogo, aux alentours de Mindif, dominent une savane arbustive à arborée dominée par *Anogeissus leiocarpus* et *Sclerocarya birrea*, une savane arbustive à arborée soudano-sahélienne dominée par *Amblygonocarpus andongensis* et *Detarium microcarpum* et une savane arbustive à sols compacts ou érodés dominée par les épineux. Dans la partie ouest de la plaine du Diamaré, dans la plaine de Mora, et surtout sur les piémonts des monts Mandara, dominent une savane arbustive dégradée à *Anogeissus leiocarpus*, à *Faidherbia albida*; une savane arbustive à arborée souvent dégradée et dominée par *Boswellia dalzielii* (Brabant et Gavaud, 1985).

Les zones montagneuses

Les montagnes correspondent d'une part aux massifs-îles isolés qui sont parsemés dans les plaines et d'autre part aux grands blocs rocheux qui dominent la zone des piémonts des monts Mandara. Ces unités se distinguent sur les images par un effet de relief et les vérifications sur le terrain sont faciles. L'importance du couvert arboré dans les zones montagneuses dépend de l'accessibilité et de la proximité aux zones d'habitation.

8.3.2. Validation de la qualité sémantique des classes d'occupation du sol

La validation de la qualité sémantique des classes d'occupation du sol identifiées a été effectuée sur la carte la plus récente (1999). Cette opération permet de contrôler la qualité de la carte obtenue, apprécier les risques de confusion possibles et les capacités à mieux différencier les unités d'occupation du sol (Girard et Girard, 1999). La source de référence utilisée pour la validation est un ensemble de données relevées au GPS sur des sites repérés à l'avance. Pour chaque site, la nature de l'occupation du sol sur un rayon de 100 m autour du point est identifiée et décrite. Un effectif total de 525 points a été utilisé et sa répartition entre les classes d'occupation du sol dépend de l'importance des superficies et des difficultés de détection de chaque classe (le tableau 8.1). Les classes feu et montagne par exemple, qui sont relativement faciles à identifier n'ont pas été prises en compte dans la validation. Une jointure spatiale a été

effectuée entre la carte des points GPS et la carte d'occupation du sol de 1999 pour produire la matrice de confusion présentée dans le tableau 8.1. En appliquant la formule de calcul de la précision donnée au chapitre 3 sur les données de ce tableau, on obtient un coefficient Kappa égal à 0.733. Les erreurs (excédent ou déficit) de chaque classe donne des indications détaillées sur les limites de réalisation ou d'utilisation de la carte obtenue.

Les classes « zone d'habitation » et « culture maraîchère/Verger » affichent de très bonnes précisions d'utilisation (resp. 92% et 94%). Ce qui signifie que pour un pixel pris au hasard dans ces classes sur la carte produite, la probabilité est presque certaine qu'il soit de cette classe dans la réalité. Les erreurs d'excédent c'est à dire les pixels affectés à ces classes par erreur sont faibles. Par contre les erreurs de déficit sur ces classes un peu plus importants (resp. 36 et 37%). Dans le cas des zones d'habitation ceci est du aux difficultés de détection des habitation sous couvert arboré ou les habitats dispersés qui sont presque toutes confondues aux zones de cultures pluviales. Les cultures pluviales affichent une très bonne précision de réalisation (92 %). Ceci qui signifie que pour toute zone de culture pluviale repérée au hasard sur le terrain, la probabilité pour que cette zone soit affectée à cette classe sur la carte obtenue est très élevée. Par contre, les erreurs d'excédents qui sont assez élevés (48 %) traduisent le fait cette classe sur la classe produite est en réalité un peu hétérogène. On constate que la majorité des excédents provient de la classe « savanes boisées ». En effet, les savanes anthropiques qui présentent une structure ouverte visible sur les images, avec une physionomie semblable à celle des zones de cultures pluviales sous parc arboré ont tendance à être affectées à cette classe. De la même façon, les savanes arbustives avec une très faible densité d'arbuste induisent des erreurs d'excédents à la classe « sol nu » (35 %). Les classes « culture de contre saison » et « savanes boisées » affichent une bonne précision d'utilisation (resp. 89 et 85 %). Deux sources d'erreurs de déficits ont été identifiées sur la classe culture de contre saison. Elles sont presque toutes dues aux changements d'occupation du sol entre la date de prise de vue des images et la période d'observation sur le terrain. Le premier type de confusion est avec les cultures pluviales et correspond aux zones où les deux cultures peuvent être pratiquées sur le même espace d'une année à l'autre. Le deuxième type de confusion est avec les savanes boisées et correspond aux zones où on a observé une forte dynamique de défrichement pour la mise en culture du sorgho de contre saison. Les données de terrain sur ces sites ont confirmé qu'il s'agissait des espaces qui avaient subi un défrichement entre la date de prise de vue des images (1999) et le moment des visites de terrain (2000 et 2001). Dans ces cas les souches d'arbres sont encore visibles dans les champs et peuvent y rester 2 à 3 ans après le défrichement (voir photo 8). Les informations sur les différentes erreurs de réalisation ont été localisées et les corrections ont été effectuées pour améliorer la précision des cartes obtenues.

8.3.3. Logiques d'organisation des utilisations de l'espace

En observant la carte de répartition spatiale de chaque thème de l'occupation du sol (voir figure 8.4), on peut émettre des hypothèses sur la structure de l'occupation du sol qui seront testées ultérieurement au chapitre 9 par analyse statistique. On constate que la structure des différents types d'occupation du sol dans l'ensemble est fortement déterminée par l'installation et les activités des populations dans l'espace. A

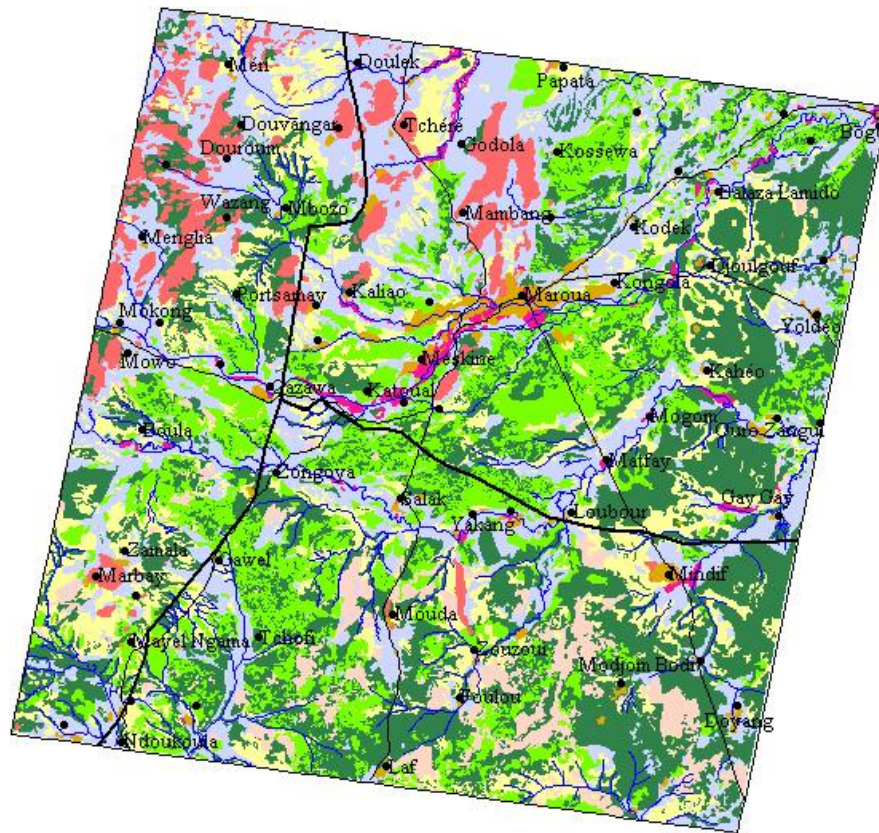
l'échelle régionale, la ville de Maroua au centre de la région, joue un rôle de polarisation pour certaines activités et ceci se traduit dans leur répartition spatiale et leur dynamique. Les défrichements des savanes pour le bois de feu se sont opérés suivant un gradient déterminé par la distance à la ville de Maroua. Le maraîchage s'est implanté autour des villes et où il y a de l'eau. Cette structure polaire peut également s'observer autour des petites agglomérations comme Méri, Godola, Bogo, Salak et Gazawa. La cartographie à l'échelle des terroirs villageois met en exergue une organisation de l'occupation du sol en auréoles plus ou moins concentriques autour des zones d'habitation (chapitre 7).

		Occupation du sol en 1999								
		Habitation	Maraîcher	Culture pluviale	Sol nu	Sorgho repiqué	Savane boisée	TOTAL	Précision réalisateur	Erreur de déficit
Vérité de terrain	Habitation	35	0	16	3	1	1	56	63	37
	Maraîcher	1	16	8	0	0	0	25	64	36
	Culture pluviale	1	0	92	5	1	1	100	92	8
	Sol nu	0	0	10	43	1	2	56	76	24
	Sorgho repiqué	1	0	16	5	119	10	151	78	22
	Savane boisée	0	1	34	10	12	80	137	58	42
TOTAL		38	17	176	66	134	94	525		
Précision pour l'utilisateur		92	94	52	65	89	85			
Erreur d'excédent		8	6	48	35	11	15			

Tableau 8.1 : Matrice de confusion entre carte d'occupation du sol et vérité de terrain. Les valeurs du tableau représentent les effectifs des points GPS. Les précisions et erreurs sont données en pourcentage.

Au fur et à mesure qu'on s'éloigne des zones d'habitation on rencontre successivement les champs de cultures pluviales le plus souvent sous parcs arborés, les zones de cultures maraîchères qui suivent le linéaire des cours d'eau, les zones de cultures pluviales plus ou moins dénudées, les champs de sorgho de contre saison qui sont cultivés préférentiellement sur les sols vertiques et les zones de brousses interstitielles entre les villages. L'organisation des champs de cultures pluviales dans l'espace n'affiche pas une organisation spatiale remarquable. Deux facteurs semblent à priori expliquer l'organisation spatiale des zones dénudées dans la zone étudiée : le réseau hydrographique et le relief qui contribuent à l'érosion de ces sols. Dans la plupart des cas ces espaces correspondent aux versants d'écoulement des eaux de rivières ou aux zones de piémonts qui subissent de façon plus importante les effets des écoulements d'eau qui viennent des montagnes. Dans les zones où ces bordures de mayo sont sur des terrains plats et l'érosion faible, ces espaces sont utilisés pour le maraîchage

a



b

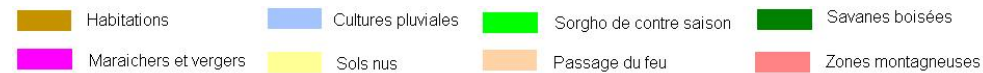
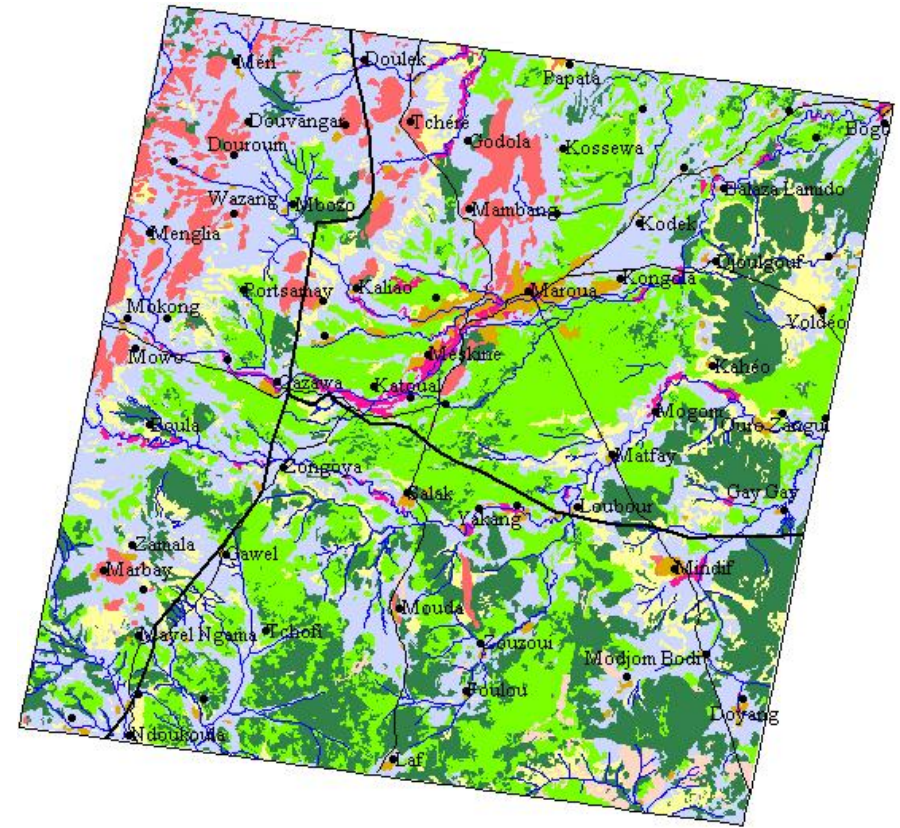


Figure 8.4 : Occupation du sol sur la région d'étude autour de la ville de Maroua en 1987 (a) et en 1999 (b). Les zones de cultures maraîchères suivent le linéament des cours d'eaux et se localisent principalement autour du centre urbain. Le changement le plus visible à l'échelle régionale est l'extension des zones cultivées en sorgho de contre saison au détriment des savanes boisées.

8.4. Analyse des changements d'occupation du sol au niveau régional

8.4.1. Evaluation de l'évolution des superficies

L'occupation du sol sur la zone autour de Maroua a subi d'importantes transformations et conversions entre 1987 et 1999. Le processus le plus remarquable est l'extension des surfaces agricoles qui concerne trois types d'occupation du sol : les cultures pluviales, le sorgho de contre saison et les cultures maraîchères. La figure 8.5 illustre l'évolution globale de ces superficies au cours de la période d'analyse. On constate que les zones de cultures pluviales qui occupent une plus grande proportion de tout l'espace ont connu une augmentation de superficies assez importante en passant de 94 551 ha à 129 507 ha soit une augmentation de l'ordre de 36%. Les zones occupées uniquement par la culture de contre saison ont subi une évolution plus importante en passant de 65 147 à 94 197 ha soit une augmentation de l'ordre de 44%. Les superficies de cultures maraîchères ont également augmenté mais restent relativement faibles car elles sont pratiquées sur de très petites superficies. Les superficies de savanes boisées ont par contre baissé considérablement de 103 633 ha à 71 488 ha soit une réduction de l'ordre de 31%. Les sols nus ont également diminué de 52 252 ha à 31 522 ha. L'importance des changements observés s'explique d'abord comme la conséquence des fortes pressions humaines qui induisent des besoins croissants en terre cultivables et des besoins en bois de feu des populations urbaines et rurales. L'extension et la densification du centre urbain sont visibles lorsqu'on compare ses emprises successives sur les images satellites des années 1975, 1987 et 1999. Toutefois, cette analyse régionale ne met pas en exergue les dynamiques d'installation et de déplacement des populations. La cartographie de l'utilisation de l'espace à l'échelle des terroirs villageois (chapitre 7) et les observations sur le terrain montrent clairement les signes de saturation foncière (réduction des espaces libres et utilisables pour les activités agropastorale ou la recherche du bois de feu).

Le processus d'extension de la culture du sorgho repiqué observé à l'échelle régionale s'effectue au détriment des ressources ligneuses qui sont également soumises à la pression des troupeaux des éleveurs transhumants, des populations rurales et urbaines dont les besoins en bois de feu sont de plus en plus importants. L'essentiel des extensions concerne la partie au sud de la ville de Maroua où on avait encore jusqu'à un passé récent, de très bonnes terres en friches. L'analyse de la répartition spatiale des zones boisées et de leur dynamique sur la région d'étude autour de Maroua montre que l'espace urbain est fortement arboré mais essentiellement constitué de plantations de reboisement urbain. Lorsqu'on s'éloigne de la ville, on observe que les réserves forestières (Ferngo et Mayo Ibbe) ont été entièrement défrichées pour des besoins en bois et transformées ensuite en champs. Dans un rayon de près de 25 km autour de la ville de Maroua, le bois provient essentiellement des champs et ne représente qu'une très faible proportion (15%) de la consommation de la ville (Madi, 2002). Les zones d'approvisionnement en bois de la ville de Maroua les plus proches se trouvent dans un rayon de 30 à plus de 50 km autour de Maroua.

8.4.2. Analyse des conversions de l'occupation du sol

Une matrice de transition a été construite pour analyser plus finement les différentes formes de conversion de l'occupation du sol entre les deux dates. Les analyses spatiales effectuées avec le SIG permettent de

localiser les conversions de l'occupation du sol les plus représentatives et les plus pertinentes. Les résultats de ces traitements sont résumés dans le graphe de transition de la figure 8.7 qui indique pour chaque type d'occupation du sol, l'augmentation ou la réduction nette de superficie ainsi que les proportions des conversions vers d'autres types d'occupations du sol.

Les figures 8.5 et 8.6 qui affichent respectivement l'importance spatiale de chaque type d'occupation du sol et des principales conversions montrent que l'extension des superficies cultivées qui s'est fait principalement au détriment des savanes boisées est la dynamique la plus marquante du paysage agraire de la région. On distingue deux principales formes d'extension des zones agricoles qui correspondent aux quatre premières barres de la figure 8.6 : l'une s'est effectuée au détriment des savanes boisées qui ont subi d'importants défrichements (7-5 ou 7-3) et l'autre est en cours sur les sols nus (4-3 ou 4 -5). Ces conversions sont également représentées sur le graphe de la figure 8.7 par les flèches en gras orientées vers les nœuds cultures pluviales et sorgho repiqué. La récupération des sols dégradés pour l'agriculture est un phénomène récent qui traduit les réponses des acteurs face aux situations de saturation foncière observées dans plusieurs terroirs. L'analyse des images SPOT de 1987 effectuée par Triboulet (1995) sur cette région a mis en exergue un développement important des sols dénudés. Contrairement à cette tendance, les sols nus ont considérablement diminué au cours de la dernière décennie.

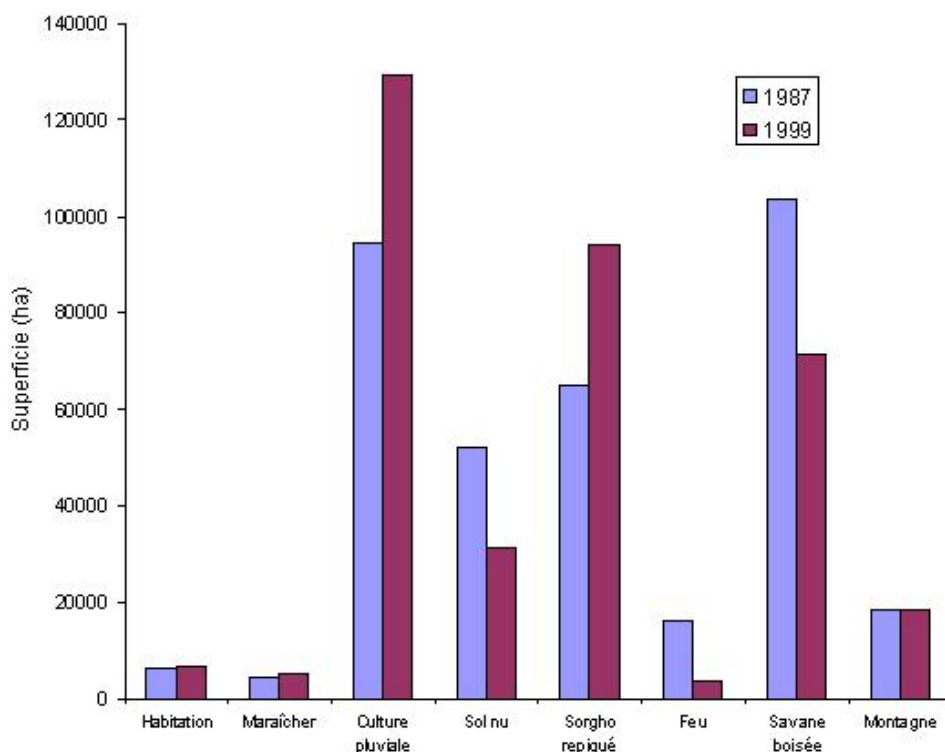


Figure 8.5 : Superficie de chaque classe d'occupation du sol en 1987 et 1999 sur la zone d'étude.

La différence assez significative entre les sols nus convertis en cultures pluviales et ceux convertis en sorgho de contre saison s'explique par les contraintes qui se posent à la mise en valeur d'un vertisol dégradé (hardé) ou un sol non apte à la culture du sorgho de contre saison. Dans tous les cas l'extension agricole se fait au détriment des espaces et des ressources utilisées pour l'élevage. Malgré les nombreux défrichements observés, une très faible proportion de savanes boisées est convertie en sols nus (2%). En

effet le défrichement des savanes boisées est suivi systématiquement de l'installation des champs. L'extension des champs de sorgho repiqué est la principale motivation de ces défrichements (voir photo 8). Une importante partie des savanes boisées est également convertie en zone de culture pluviale principalement pour les champs de coton. Dans la plupart des cas, les zones parcourues par les feux d'après les vérités de terrain sont des savanes boisées et suivent la même dynamique que la classe savane boisée. 41% des zones qui étaient parcourues par le feu en 1987 est converti en savanes boisées en 1999. Seulement 16% est resté en feu et le reste (43%) a été converti en cultures pluviales (19%) et sorgho de contre-saison (24%). La reprise de la végétation ligneuse se traduit dans l'espace sous trois formes différentes : les très longues jachères sur les champs de sorgho de contre saison (5-7), les reboisements et la densification des parcs arborés dans les zones de cultures pluviales (3-7) et la régénération naturelle sur les sols nus abandonnés (4-7). La culture du sorgho de contre saison s'effectue sur de très vastes étendues mais, l'organisation spatiale a montré que dans les zones où il y a encore assez de terres, il existe des jachères de très longue durée (10 à 20 ans) qui entrecoupent ces vastes étendues et forment un paysage binaire constitué d'une alternance dans l'espace entre les zones cultivées et les zones de brousse. D'une année à l'autre, on a observé que certains espaces sont alloués alternativement aux cultures pluviales et au sorgho repiqué (3-5 ou 5-3). Cette dynamique est rendue possible à cause du type de sol sur ces espaces. Ce sont les terres alluviales situées le plus souvent le long des lits majeurs des cours d'eaux ou les sols à tendance vertique plus ou moins dégradés dont le caractère intermédiaire laisse au paysan le choix de la spéculation à mettre en place. Le choix va dépendre en général des données climatiques de l'année, des objectifs du paysan et des ressources dont il dispose.

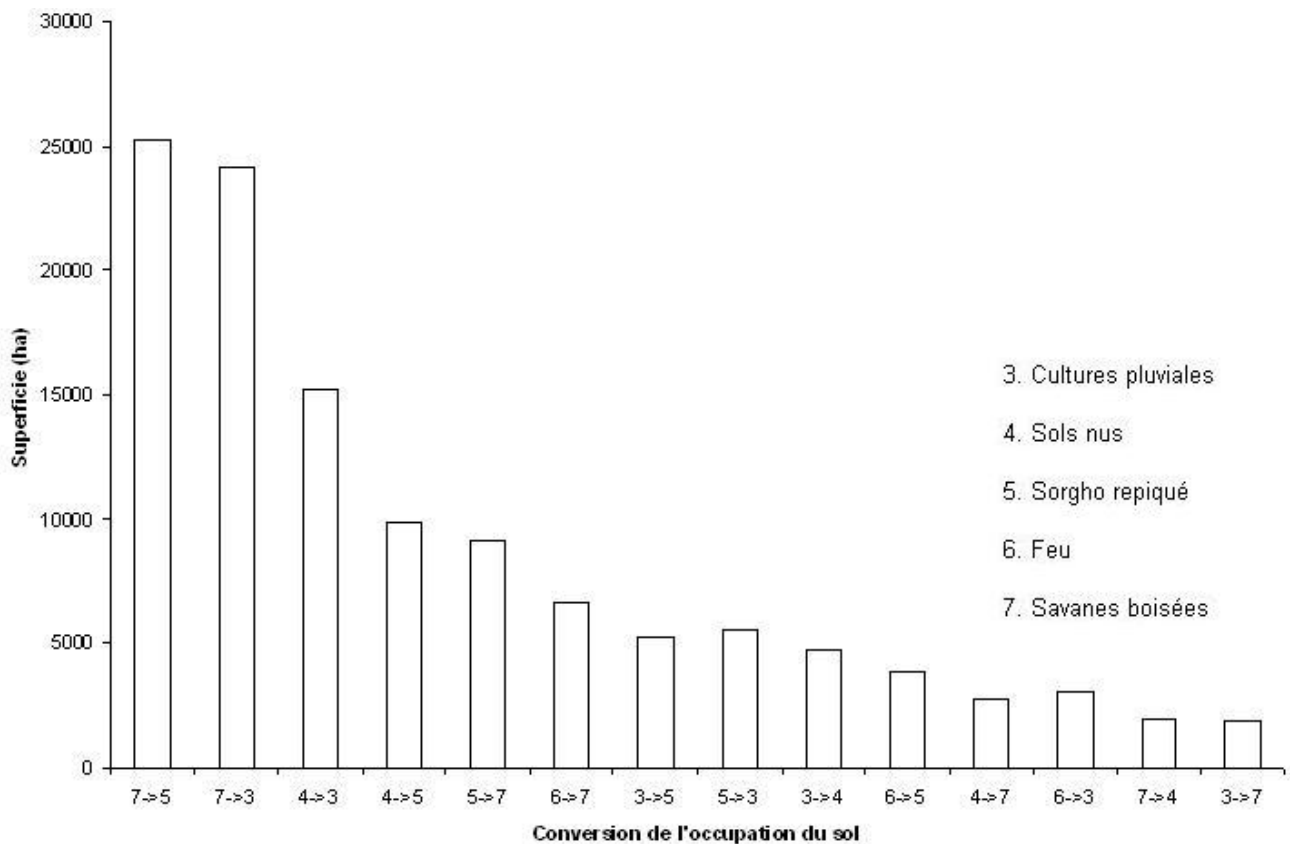


Figure 8.6 : Importance des principales conversions de l'occupation du sol entre 1987 et 1999.

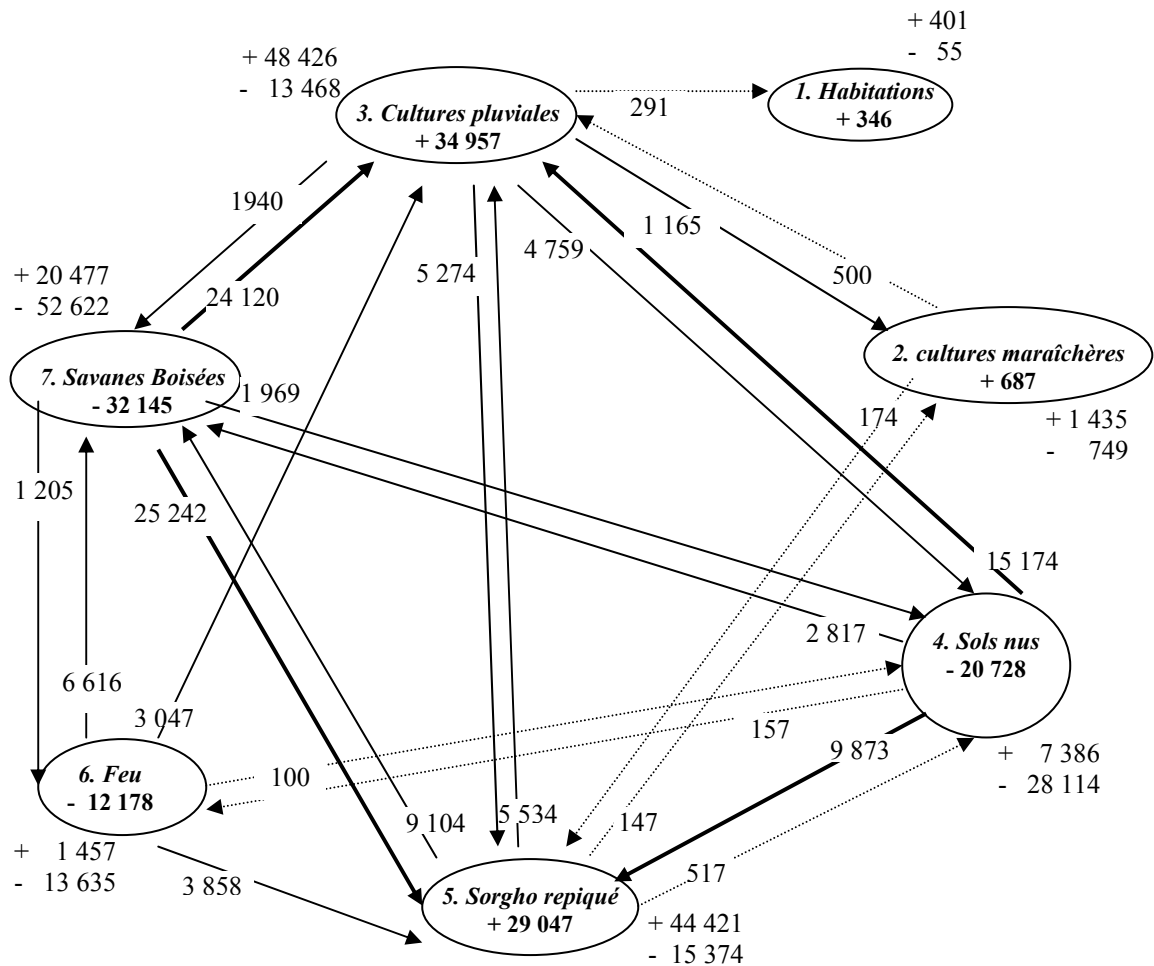


Figure 8.7 : Graphe des conversions d'occupation du sol entre 1987 et 1999 dans la zone d'étude. Les signes + et - indiquent respectivement une augmentation et une réduction des superficies exprimées en hectares. Les flèches en pointillé représentent les conversions dont la superficie est comprise entre 1000 et 100. Les conversions dont la superficie est inférieure à 100 ha ne sont pas représentées.

8.4.3. Analyse de la diversité des situations agroécologiques

La figure 8.8. montre que les grandes tendances de changements d'occupation du sol identifiés à l'échelle régionale s'observent également au niveau des zones agroécologiques (extension agricole, défrichements des savanes boisées et récupération des terres dégradées). Toutefois, chaque zone présente des spécificités qui déterminent les logiques de mise en valeur de l'espace, l'ampleur et le rythme d'évolution des différentes dynamiques

La zone du Diamaré est caractérisée par une forte densité de population dans sa partie centrale (Maroua) et au niveau des petites agglomérations situées à sa périphérie. Environ 70% des zones d'habitation qui ont été identifiées par télédétection s'y retrouve. Le développement spatial de la culture maraîchère semble suivre celle de l'emprise urbaine et des agglomérations environnantes. Cette zone à elle seule contient près de 80 % des superficies en culture maraîchère de la région étudiée. Toutefois l'analyse diachronique

montre que l'accroissement des superficies est plus important dans les deux autres zones au cours de la dernière décennie, avec une extension plus marquée dans la zone des piémonts (7 à 13%) où la culture d'oignon plus spécifiquement est très pratiquée. Dans la plaine du Diamaré, les cultures pluviales n'ont pas évolué de façon aussi importante que dans les piémonts et la pédiplaine de Kaélé. Cette différence serait liée au fait que les populations du Diamaré sont essentiellement de l'ethnie Fulbé (Peuls) et principalement des éleveurs, dont l'activité s'intègre plus facilement à la culture du sorgho repiqué. Les paysans utilisent de plus en plus les revenus de la vente des surplus de production du sorgho repiqué pour assurer leur besoins économique. La culture du sorgho de contre saison s'étend principalement dans les plaines sur de vastes superficies où les conditions du milieu sont favorables. Le croisement de la carte d'extension de la culture avec la carte d'aptitude des sols montre que les possibilités de défrichement pour la mise en culture du sorgho repiqué sont presque achevées. En réponse à cette situation, les paysans ont commencé à remettre en valeur les vertisols dégradés qui avaient été abandonnés (Fotsing et Mainam, 2003).

La zone des piémonts est également très densément peuplée mais les blocs d'habitations ne sont pas facilement détectables à cause de la forte dispersion de l'habitat, l'absence de grands blocs d'habitation urbaine, le paysage dominé par un relief accidenté et de nombreux rochers qui se confondent à l'habitat sur les images. La principale dynamique d'occupation du sol concerne l'évolution des superficies de cultures pluviales sur lesquelles repose l'agriculture des piémonts. Dans cette zone, on a observé des extensions de la culture du sorgho repiqué sur des sites en microtopographie mais les superficies cultivées dans l'ensemble de cette zone n'évoluent pratiquement pas (figure 8.8.b). Dans le chapitre 7, une analyse a été menée à l'échelle du terroir pour mieux comprendre les dynamiques spatiales et mettre en exergue les stratégies paysannes dans ce contexte. Les interviews des paysans dans cette zone indiquent pourtant que la demande en graine a considérablement augmenté. Les conditions du milieu non favorables et les investissements qu'imposent les aménagements comme les diguettes ou les labours constituent les principaux facteurs contraignants à l'extension. Dans ce contexte, les paysans s'orientent vers les cultures maraîchères qui sont en développement dans la zone des piémonts et permettent de combler leur besoin économique.

La plaine de Kaélé est par contre une zone moyennement peuplée qui comportait encore d'importantes superficies de savanes boisées. Cette zone subit l'influence conjointe de la ville de Maroua au nord et la ville de Kaélé au sud qui déterminent les principaux fronts de défrichement des savanes boisées. Les deux principales motivations sont la demande en bois de feu de ces centres urbains et les besoins plus importants en terre, plus spécifiquement pour la culture du sorgho de contre saison. Les espaces qui ont subi des défrichements importants dans cette zone coïncident avec les zones d'extension de la culture du sorgho de contre saison (figure 8.8.c). Toutefois, cette zone regorge encore quelques zones de brousse malgré les importants défrichements observés. Une étude a permis de faire des observations et des analyses locales autour de la réserve forestière située dans cette zone afin de faire un état des lieux sur l'utilisation de l'espace et dégager des perspectives de développement futur (Fotsing et al., 2003).

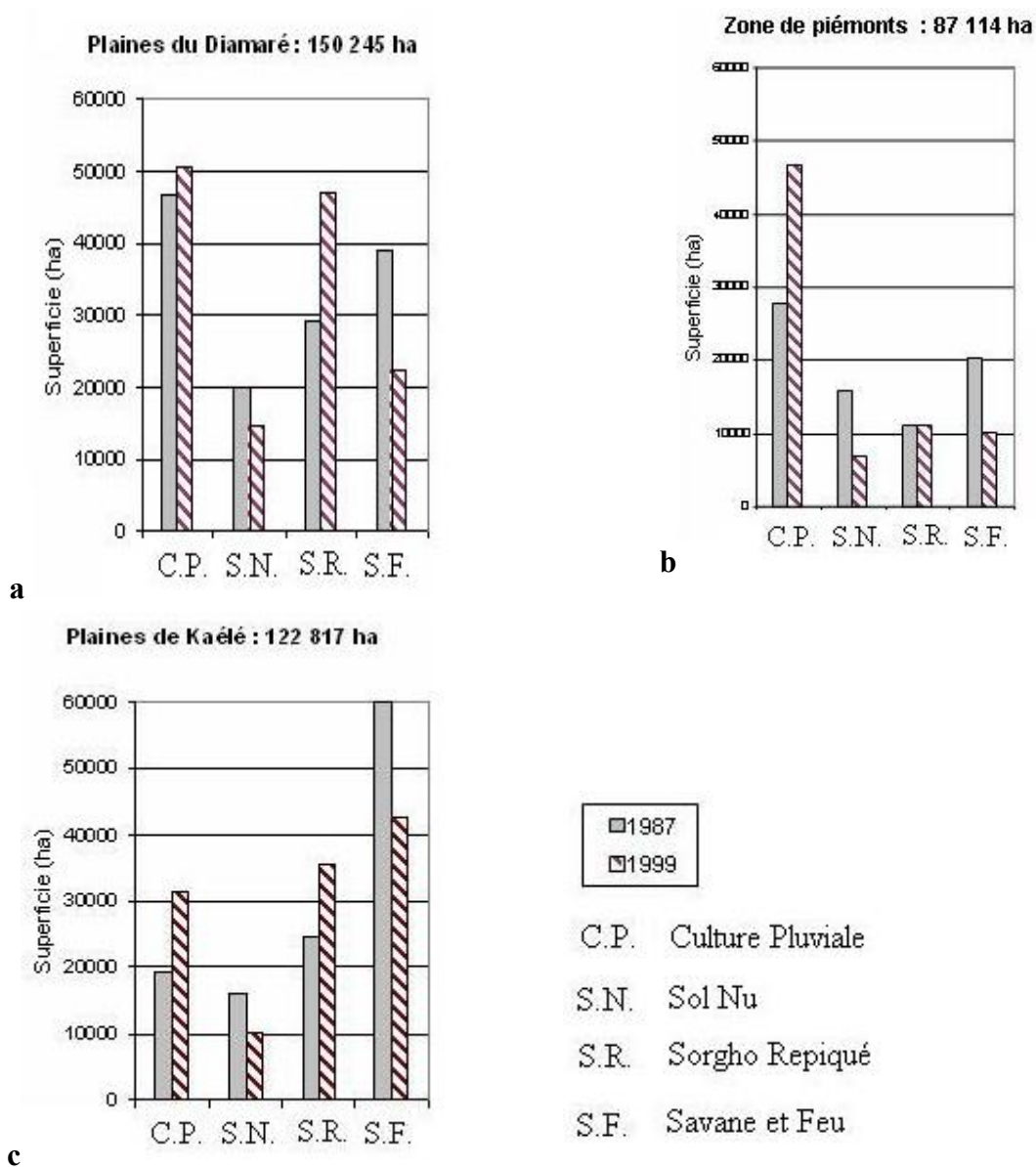


Figure 8.8 : Evolution des superficies des principales occupations du sol au niveau des zones agroécologiques.

8.5. Analyse locale des changements d'occupation du sol et stratégies des acteurs

L'analyse locale des changements d'occupation du sol permet d'avoir des connaissances sur la diversité des situations que regorgent les grandes dynamiques d'occupation du sol identifiées à l'échelle régionale. L'analyse des changements observés autour de la réserve forestière de Laf au sud de Maroua est un exemple qui illustre les conséquences de la saturation de l'espace observée dans plusieurs terroirs. La réserve forestière de Laf, a connu l'intrusion des populations riveraines et même lointaines : l'intérêt des uns étant la recherche de nouvelles terres propices à la culture du sorgho repiqué, celui des autres l'approvisionnement en bois et l'alimentation du bétail. La réserve forestière de Laf qui est de part la loi, un domaine privée de l'Etat est de part les faits un espace dont le contrôle est partagé entre l'état et plusieurs communautés villageoises. Dans ce contexte, les règles d'accès et les pratiques liées à la gestion des ressources constituent un enjeu important et passe nécessairement par une meilleure connaissance de ces ressources et des besoins des différents acteurs. Dans la partie septentrionale du Cameroun, plusieurs réserves forestières qui ont été créées à l'époque coloniale dans le but de protéger l'environnement ou de produire à long terme le bois de feu pour les populations connaissent aujourd'hui des problèmes similaires (Teicheugang, 2000 ; Boubaoua, 2001). La loi camerounaise en matière de forêt prévoit pourtant que chacune de ces réserves pourrait être dotée d'un plan d'aménagement définissant les objectifs, les règles de gestion et les conditions d'exercice des droits d'usage par les populations locales (MINEF, 1998). L'étude menée à l'intérieure de la réserve forestière de Laf et dans quelques villages riverains avait pour objectif de faire un état des lieux en vue de suggérer des orientations d'aménagement et de gestion de cet espace par les communautés villageoises et les autorités concernées.

8.5.1. Le peuplement de l'espace autour de la réserve forestière de Laf

L'image satellite de 1975 montre qu'avant les années 80 la petite région de Laf regorgeait encore d'importantes ressources ligneuses. L'extension des zones cultivées, la coupe bois de feu et l'alimentation du bétail ont conduit à une réduction importante de la végétation ligneuse. L'analyse de ces changements basée sur une reconstruction des faits historiques et la comparaison diachronique des images satellites permet de resituer l'extension des champs dans le temps et l'espace. Les habitants des villages riverains de Foulou et de Laf se sont installés avant l'arrivée des Allemands (vers 1902) et des Français (vers 1925) qui ont d'abord entrepris des travaux de reboisement et de formation en techniques forestières. La réserve forestière de Laf, d'une superficie de 5 000 ha environ a ensuite été créée en 1948 par arrêté N° 146 du 19 avril 1948 dans le but de préserver l'environnement et fournir à long terme le bois de chauffe et de services aux populations. Lors de la création de la plantation forestière de Laf, les populations *Toupouri* venant du nord-est de Kaélé et les populations *Mofou* des monts Mandara se sont installés à la recherche du travail. Les migrations importantes ont débuté dans les années 1970. La renommée et la disponibilité des bonnes terres de villages Mussurtuk, Foulou, Zouzouï explique vraisemblablement en grande partie l'afflux de la population dans cette zone. Les données de population sur les principaux villages des cantons de Moutourwa et de Midjiving entre 1976 et 2000 montrent que l'effectif total de la population a pratiquement triplé avec un accroissement plus rapide pour les dernières années : de 6821 habitants en

1976, on est passé à 10 990 habitants en 1987 et puis 18 915 habitants en 2000 pour les 8 villages concernés par les données disponibles (figure 8.9).

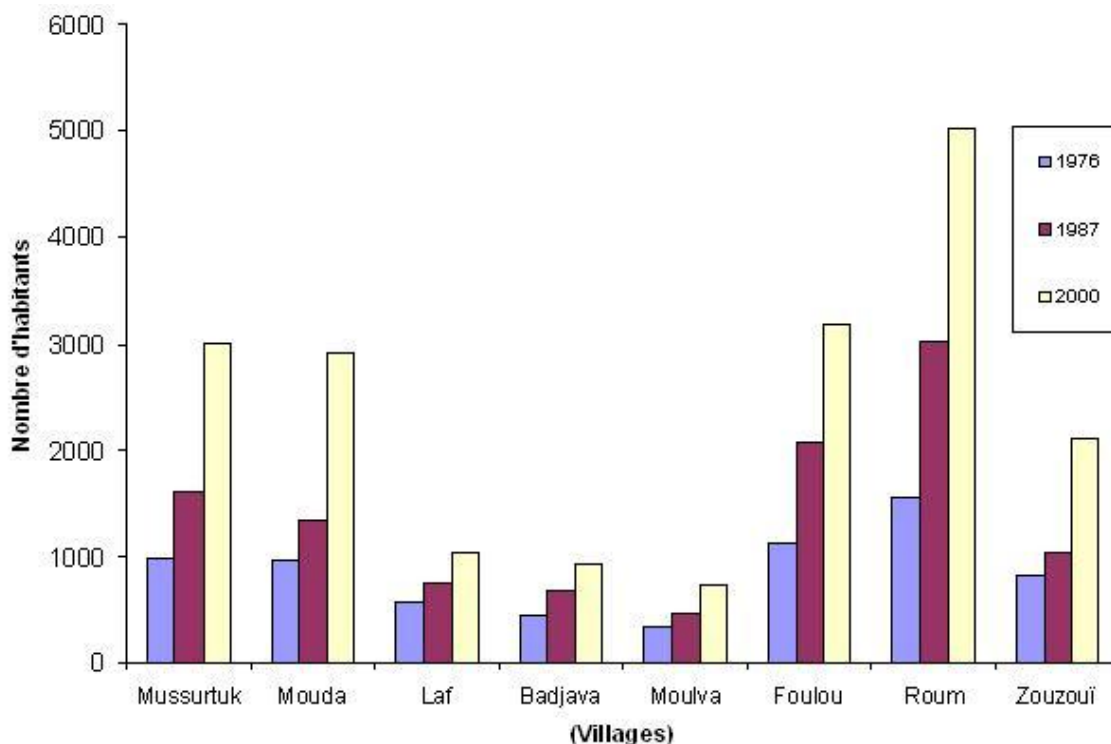


Figure 8.9 : Evolution de la population de quelques villages des cantons de Moutouroua et Midjiving (source : Délégation d'Agriculture de Moutourwa).

8.5.2. Les processus de changements d'utilisations de l'espace et leurs conséquences

En ce qui concerne la dynamique des savanes boisées et des activités sylvicoles, plusieurs actions de reboisement ont été menées entre 1975 et 1986 par le Fonds National Forestier et l'ONAREF (Office Nationale de Régénération des Forêts) qui ont planté environ 400 ha. Près de 200 ha ont été plantés à l'ouest de la réserve par l'opération « Sahel vert » menée par le Ministère de la Jeunesse et des Sports. Les espèces plantées sont : *Azadirachta indica*, *Acacia nilotica*, *Dalbergia melanoxylon*, *Khaya senegalensis*, *Eucalyptus camadulensis*, *Cassia singueana*. La fermeture de l'ONAREF survenue en 1989 à la suite d'un dysfonctionnement observé a contribué à la mise en chômage de nombreux gardiens de réserves. On a observé un envahissement de cette plantation par des espèces locales (disparition des structures linéaires d'alignement sur les images) et une intrusion des populations riveraines. Les savanes boisées de la réserve initialement composée de cette plantation de 400 ha et d'environ 4600 ha de forêt naturelle ont été converties principalement en champs. La savane naturelle ne couvre plus que 480 ha dans la partie centrale de la réserve et la plantation de 200 ha située à l'est a été réduite à 130 ha seulement (figure 8.10). L'inventaire des ressources ligneuses effectué dans la savane naturelle révèle une richesse de 65 espèces avec une forte dominance dans la classe des adultes, des espèces telles que : *Acacia gerrardii* (51 tiges/ha), *Balanites aegyptiaca* (45 tiges/ha) et *Anogéissus leiocarpus* (40 tiges/ha). L'indice de diversité relatif élevé (3,2), indique que les perturbations anthropiques n'ont pas encore une forte influence sur la diversité des espèces ligneuses (Boubaoua, 2001). Malgré un prélèvement élevé marqué par les

souches d'arbres, en moyenne 51 tiges/ha qui représente 15% des adultes, les relevés montrent que la plupart des espèces les plus utilisées ont une bonne régénération notamment *Combretum aculeatum* (1186 tiges/ha), *Acacia gérardi* (480 tiges/ha), *Anogéissus leiocarpus* (262 tiges/ha), *Acacia sénégale* (400 tiges/ha), *Balanites Aegyptiaca* (173 tiges/ha).

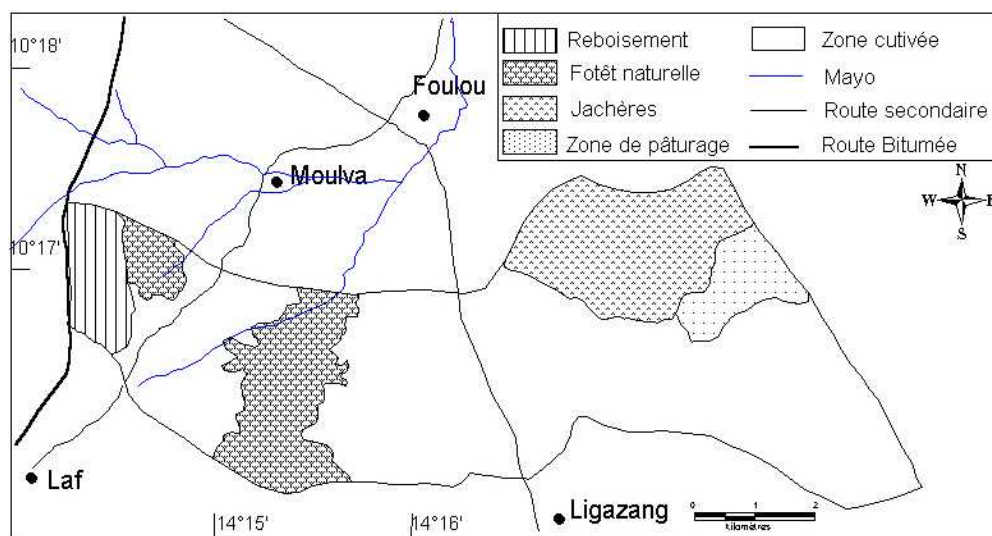


Figure 8.10 : Carte des principales utilisations de l'espace dans la réserve forestière de Laf.

En ce qui concerne la dynamique des activités agricoles et pastorales, l'appropriation des terres pour l'installation des champs a évolué au cours du temps des villages riverains vers le centre de la réserve compte tenu des besoins croissants des populations locales en terre cultivable. Les champs occupent déjà une importante partie de la réserve forestière (2942 ha). La culture du Muskuwaari occupe à elle seule 85 % de ces surfaces cultivées. Les défrichements effectués pour l'installation des champs se font par une coupe systématique de presque tous les arbres. Cette pratique est principalement justifiée par le besoin de protection des champs contre les oiseaux granivores. La concurrence entre les arbres et les cultures est également évoquée. Ainsi, certaines espèces sont sélectionnées et maintenues dans les champs mais avec une très faible densité (en moyenne estimée entre 2 à 3 arbres/ha). L'occupation de la réserve ne s'est pas effectuée uniformément dans l'espace et le temps. Les populations de Laf situent la période d'installation des premiers champs entre 1990 et 1991. Du côté de Foulou par contre, quelques champs avaient déjà commencé à s'y installer au début des années 80. Cette différence s'explique par le fait que les populations de Laf disposaient encore d'importantes terres aptes à la culture du Muskuwaari à l'ouest de la route nationale. Les reboisements entrepris et la présence des gardiens forestiers dans cette partie ont également joué un rôle important dans la conservation des ressources. La durée des jachères dans la réserve varie entre 5 et 10 ans. Les zones de jachère présentent une strate arbustive d'une hauteur moyenne comprise entre 5 et 6 m, une circonférence moyenne de 10 à 15 cm pour les plus anciennes et une strate arbustive plus basse d'une hauteur comprise entre 1 à 2 m pour les plus récentes. Les espèces dominantes sont *Acacia seyal*, *Piliostigma*, *Combretum*, *Ziziphus mauritiana*. La diversité végétale et la richesse floristique sont faibles mais la densité est élevée. L'extension des champs de Muskuwaari contribuant à une réduction des zones de pâturages au niveau de la petite région. Cette zone dans la partie Est de la réserve est exploitée par les populations pour l'alimentation du bétail. Cette zone est relativement riche en fourrage (beaucoup d'herbacées) avec une densité moyenne des ligneux. Les espèces rencontrées sont *Balanites*

aegyptiaca, *Terminalia avicennoides*, *Combretum molle*, *Lannea barteri*. Les éleveurs transhumants venant de la partie Nord de la région et des pays voisins sont de passage dans la zone chaque année en début de saison de pluie (Mai-Juin) au moment où les mares regorgent déjà un peu d'eau et où les pâturages se reconstituent progressivement. Ils y restent 3 à 4 semaines et ne repartent qu'après le retour effectif des pluies. Leur présence et leur mode d'exploitation des ressources ligneuses caractérisé par la coupe et des mauvaises techniques d'émondages des arbres ne sont pas acceptés par les populations locales. Les émondages observés principalement sur les espèces *Anogeissus leiocarpus* (13 tiges/ha), *Acacia seyal* (6tiges/ha), *Balanites egyptiaca* (16 tiges/ha) contribuent à la dégradation des ressources ligneuses.

8.5.3. Les conséquences des changements d'utilisation de l'espace

Les pratiques foncières courantes dans la région reposent sur le principe selon lequel le défrichement fonde le contrôle foncier et c'est sa mise en valeur qui justifie la pérennité de la tenure. On assiste donc à une course à l'espace qui se traduit dans les dynamiques spatiales d'extension des zones agricoles où les paysans adoptent des stratégies défensives d'appropriation des terres qui ont des conséquences négatives sur les ressources ligneuses. En effet, des « défrichements préventifs » sont effectués par les paysans en vue de s'approprier l'espace et le mettre en valeur les années suivantes. Les zones interstitielles entre terroirs villageois où le contrôle foncier reste assez faible et qui disposent encore d'excellentes terres agricoles ou de parcours et de nombreuses ressources ligneuses sont le lieu privilégié des compétitions pour l'accès aux ressources naturelles. Les espaces de réserves forestières pour lesquels l'état a des difficultés d'assurer un contrôle effectif se trouvent dans ces cas. L'état et le rythme de dégradation actuel de la réserve s'expliquent en grande partie par cette logique foncière. De plus, la diversité des utilisateurs de cet espace ainsi que les pratiques liées à l'utilisation des ressources sont de nature à accélérer les dynamiques et déboucher sur des conflits. Enfin, le nombre important d'acteurs intervenants dans la gestion des ressources qui s'ajoute à l'insuffisante collaboration est de nature à hypothéquer la gestion durable des ressources naturelles. La figure 8.11 illustre la superposition de pouvoirs et de rôles qui existe entre l'Etat, les structures de développement et les autorités traditionnelles. L'autorité traditionnelle arbitre l'accès à la terre dans l'espace qui relève de son autorité (limites territoriales implicitement connues). Les populations locales n'ont pas les mêmes droits d'accès à la terre ou d'exploitation des ressources que les étrangers venant d'autres communautés rurales ou urbaines. Dans les villages de Laf et Foulou, les résidents ont un accès libre à la terre. Des terres peuvent être accordées aux étrangers qui négocient auprès du chef traditionnel (Lawane). En ce qui concerne l'accès au bois et au fourrage, les autochtones et les résidents exploitent librement alors que les étrangers négocient en général l'accès auprès des autorités administratives depuis les zones de départ. C'est ce qui se passe pour commerçants de bois ou les éleveurs transhumants qui détiennent des autorisations d'exploitation de l'administration des forêts ou de l'élevage.

8.5.4. Orientations d'aménagement et de gestion de l'espace

Les résultats des analyses indiquent que la réserve de Laf a subi une dégradation continue de ses ressources ligneuses. Les communautés villageoises riveraines sont pour la plupart conscientes de l'existence de la réserve forestière qui est un domaine de l'Etat mais très peu ont une connaissance des frontières avec leur territoire villageois. La tendance reste toute fois à dissimuler ces limites car ils estiment que la situation qui prévaut est dans leur intérêt immédiat. Les responsables de l'administration

forestière perçoivent également la le processus d’extension des zones agricoles et de dégradation qui est en cours dans la réserve. Des actions de répression et de protection sont effectuées mais restent marginales par rapport à l’ampleur de la coupe du bois de feu et de l’extension des terres agricoles dans la réserve. De plus, la collaboration entre l’administration forestière, les autorités traditionnelles et le personnel local des structures de développement reste limitée.

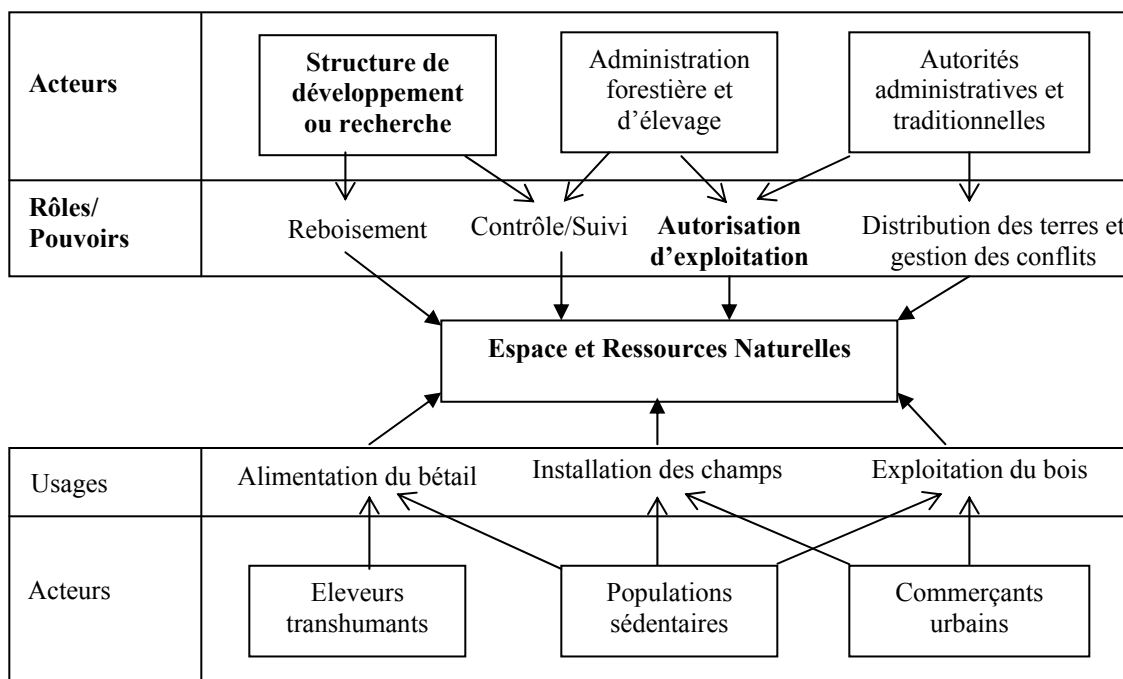


Figure 8.11 : Superposition des usages et pouvoirs des acteurs intervenant dans la gestion de l’espace et l’utilisation des ressources naturelles.

Des suggestions allant dans le sens de l’aménagement et d’une meilleure gestion de l’espace peuvent être dérivées. Les orientations d’aménagement devraient viser à une restauration progressive des ressources ligneuses de la réserve en tenant compte des besoins des différents groupes d’agriculteur, d’éleveur et de commerçant de bois qui utilisent cet espace depuis une longue période. La tendance des dynamiques agraires à l’échelle régionale et le contexte national en ce qui concerne les aires protégées exigent de concevoir et de définir ces orientations à un niveau plus grand que celui du territoire de la réserve. Une option qui est souhaitable pour cet espace consisterait à le maintenir comme réserve forestière destinée à la production du bois. Il sera dans ce cas nécessaire que le plan d’aménagement repose sur un zonage concerté de l’espace qui tiennent compte des besoins des différents groupes d’utilisateurs de cet espace De telle manière que l’accès aux ressources et l’exploitation, soient réglementés et se fassent en concertation et sur la base d’une meilleure connaissance des ressources disponibles dans chaque zone. De plus, certains pouvoirs de contrôle et de suivi doivent être confiés aux communautés locales. En retour, l’exploitation des ressources ligneuses et des produits dérivés comme la gomme arabique se ferait dans le cadre de l’exercice du droit d’usage prévu par la loi. L’accompagnement de cette option d’aménagement de l’espace peut se faire par des initiatives complémentaires de développement allant dans le sens de la création d’une forêt communautaire sur un espace à délimiter avec les populations dans la zone au sud de

la réserve qui est encore relativement boisée. Des actions de lutte contre les oiseaux granivores devraient être menées, de manière à limiter les défrichements à blanc, favoriser l'intégration de l'arbre à la culture du Muskuwaari en vue de la reconstitution progressive du couvert végétal.

8.6. Conclusion et perspectives

Sur le plan méthodologique, les résultats de ce chapitre confirment l'intérêt de la méthode de cartographie proposée au chapitre 3. En prenant l'occupation du sol comme point de départ de l'analyse, on arrive à mettre en évidence les principaux processus de changement d'utilisation de l'espace. Dans le contexte des savanes, caractérisée par une grande hétérogénéité des paysages agraires et une indisponibilité des données, les méthodes automatiques d'analyse d'image doivent être combinées aux techniques de photo-interprétation et de cartographie participatives pour arriver à dériver des informations pertinentes sur les structures d'utilisation de l'espace et les processus. La cartographie participative s'avère plus réaliste pour appréhender les processus qui opèrent dans l'espace. Elle se trouve également moins coûteuse et plus pertinente que la cartographie classique pour réaliser des cartes d'utilisation de l'espace sur des petites régions. Contrairement à la cartographie participative classique, cette approche fournit des cartes d'utilisation de l'espace qui peuvent être facilement géoréférencées et autoriser en même temps une importante flexibilité pour reconstruire l'historique des changements d'occupation du sol et identifier les facteurs déterminants. L'analyse spatiale des changements d'occupation du sol à plusieurs niveaux illustre également l'intérêt du SIG et du dispositif multi-échelle (présenté au chapitre 4) dans la structure et les fonctions du SIE. Le SIG fournit les outils d'analyse spatiale et de couplage des données multi-date et multi-thème qui permettent de dériver des informations explicatives et autorisent la formulation d'hypothèses sur les processus en cours. L'approche multi-échelle a permis de mettre en exergue la diversité des situations et des logiques d'utilisation de l'espace. Le processus de défrichement impulsé par la demande alimentaire et en bois de feu au niveau régional a été relié à ses conséquences au niveau local en terme de pratiques et de stratégies d'utilisation de l'espace.

Sur le plan substantiel, ce chapitre fournit une tendance sur l'évolution des différentes formes d'occupation du sol sur la région autour de la ville de Maroua. Les résultats des analyses spatiales aux différentes échelles spatiales permettent de mieux comprendre les processus de changement d'utilisation de l'espace en cours et les stratégies que les acteurs mettent en place pour faire faces aux différentes mutations. L'étude spécifique menée à l'échelle locale autour de la réserve forestière de Laf est une contribution à deux problématiques régionales qui méritent des études complémentaires et des actions concrètes. La première est l'occupation ou l'utilisation des aires protégées par les populations riveraines pour l'agriculture ou pour l'alimentation du bétail. La deuxième est la gestion durable de l'espace dans les zones interstitielles entre villages encore appelées brousses. En effet, ces espaces sont le siège de la plupart des dynamiques de défrichement des savanes boisées pour l'extension agricole, pour l'approvisionnement en bois ou l'alimentation du bétail. Ce sont également sur ces espaces que se posent avec plus d'acuité les problématiques d'appropriation foncière. De plus, les cartes d'occupation du sol produites sont utilisées comme donnée d'entrée dans les applications décrites aux chapitres suivants (chapitres 9 et 10). Le chapitre 9 concerne l'exploration spatiale explicite des facteurs déterminants en vue de construire des modèles explicatifs et de prédiction de la structure de l'utilisation de l'espace. Le chapitre 10 porte sur l'exploration des trajectoires d'évolution des changements d'utilisation de l'espace dans un futur proche.



Photo 9. Un groupe de femmes autour d'un point d'eau potable dans le village de Gadas, Extrême Nord du Cameroun.

Chapitre 9. Analyse spatiale et quantitative des facteurs déterminant les structures et changements d'utilisation de l'espace

Résumé

La connaissance des relations quantitatives entre la structure de l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants d'ordre biophysique et socioéconomique est une étape très importante dans la construction des modèles spatiaux dynamiques de type empirique. Le choix des variables à inclure dans ces modèles est le plus souvent difficile du fait de la complexité des processus en jeu dans les systèmes d'utilisation de l'espace. Ce chapitre décrit la mise en œuvre d'une méthode combinant les approches inductive et déductive pour identifier les facteurs les plus pertinents qui expliquent la structure et les changements d'utilisation de l'espace dans une région autour de Maroua dans l'Extrême Nord du Cameroun. A partir des couches d'information extraites de la base de données du SIE SMALL Savannah, l'analyse spatiale a permis de calculer des variables représentant au mieux les processus étudiés. La procédure de sélection des variables s'appuie sur une analyse de type régression logistique. Un modèle de prédiction de la structure et des changements au cours de la période 1987 et 1999 a été construit pour chacune des 6 utilisations de l'espace considérées dans la zone d'étude. Les résultats confirment la très forte influence du centre urbain et révèlent celle des potentialités des terres agricoles sur les formes d'utilisation de l'espace. La pression sur l'espace évaluée à partir d'un indice de population potentielle explique mieux les structures et les changements que la densité de la population. Cette application fournit des éléments de compréhension du système d'utilisation de l'espace de la région et les informations quantitatives obtenues sont utilisées pour construire un modèle qui simule les dynamiques spatiales liées aux différentes trajectoires d'évolution.

Mots clés : structure d'utilisation de l'espace, facteur déterminant, approche déductive/inductive, régression logistique, modèle spatial empirique

Abstract

The knowledge of quantitative relationships between land use patterns and biophysical as well as socioeconomic driving factors is an important step in building dynamic GIS-based models. More often, the choice of variables to include in these models is difficult due to the complexity of the system and the underlying processes. This chapter describes the implementation of a method combining inductive and deductive approaches to identify the most pertinent sets of factors that explain land use patterns and change in a region around Maroua, Far North of Cameroon. Land use and driving factors data were derived from the SMALL Savannah EIS database. Spatial analysis is used to calculate variables that better represent the land use processes. The procedure of variable selection is based on a logistic regression model. A predictive model of land use pattern and change between 1987 and 1999 was built for each of the 6 land use types considered in the region. Results confirm the strong influence of the main urban centre and reveal that of soil suitability on land use types. Population pressure evaluated as a population potential index, explains land use patterns and changes more adequately than population density. This study has provides key elements for understanding the land use system of the study area. Quantitative information derived from this application is used to build a model that simulates spatial dynamics related to different trajectories of land use change.

Key words: land use pattern, driving factor, deductive/inductive approach, scale, logistic regression, empirical GIS-based model

9.1. Introduction

L'exploration spatiale explicite et l'analyse quantitative des relations entre l'utilisation de l'espace et ses facteurs déterminants, sont très importantes dans la mesure où elles fournissent des éléments de compréhension des processus en jeu dans le système agraire. De plus, les informations quantitatives sur la manière dont les facteurs déterminants interagissent avec l'utilisation de l'espace sont requises pour supporter la modélisation dynamique des changements futurs de l'utilisation de l'espace et de leur effet. Pendant longtemps, les approches utilisées pour étudier ces questions ont été le plus souvent orientées par les traditions disciplinaires. Les études basées sur de telles approches focalisent l'attention sur un nombre limité de facteurs et fournissent une explication partielle des phénomènes. De plus en plus, les études adoptent des approches pluridisciplinaires qui se focalisent sur l'explication des processus sans se soucier des disciplines. Dans ce cas, plusieurs points de vue sont intégrés dans l'analyse qui prend en compte la multiplicité des facteurs déterminants pour construire des modèles prédictifs plus pertinents des changements d'utilisation de l'espace (Veldkamp et Fresco, 1996).

Cette thèse propose une telle approche intégrée pour analyser les changements d'utilisation de l'espace en zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. Aux chapitres 5 et 7, une analyse préalable a permis de caractériser les grandes dynamiques agraires et de produire une liste de facteurs qui peuvent potentiellement expliquer les changements observés. Ce travail préalable qui combine les informations issues de la revue de la littérature avec les données secondaires et les observations de terrain est important pour la compréhension des dynamiques en cours mais, elle ne fournit pas d'informations précises et localisées. Le chapitre précédent a abordé la résolution de ce problème en permettant l'identification et la quantification des principales conversions de l'occupation du sol. Toutefois, l'analyse des logiques d'organisation des formes d'occupation du sol et des causes des changements observées est restée descriptive, qualitative et hypothétique. Les explications étant principalement basées sur l'interprétation visuelle des images, les observations de terrain et des discussions avec les acteurs impliqués dans l'utilisation et la gestion de l'espace. Une telle approche ne permet pas toujours de capturer toutes les interactions des facteurs et les chaînes de causalité qui gouvernent les structures d'utilisation de l'espace et les changements observés sur une vaste région. On court le plus souvent le risque de généraliser un phénomène local à l'échelle de la région.

Le présent chapitre propose une approche d'analyse complémentaire pour mieux comprendre les facteurs qui déterminent la structure et les dynamiques du système d'utilisation de l'espace. La méthode vise à identifier les combinaisons les plus pertinentes des facteurs explicatifs de la structure et des changements de l'utilisation de l'espace. Une quantification de leur influence devrait permettre de construire des modèles prédictifs performants de la distribution spatiale des changements d'utilisation de l'espace. La performance des modèles, fait ici référence aussi bien à la précision de localisation, la rationalité et l'interprétabilité des résultats dans le contexte de la zone d'étude. Pour atteindre ces objectifs, la méthode d'exploration suivie combine les aspects d'une approche de type inductif avec les éléments d'un raisonnement de type déductif. 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 l'application de chaque module de SMALL Savannah à cette étude de cas. La section 3 décrit l'étape de préparation des données et de représentation des phénomènes

étudiés. La section 4 décrit les résultats de la mise en œuvre de la procédure de sélection des facteurs déterminants sur le jeu de données issu de SMALL Savannah. La section 5 propose une synthèse et une discussion des résultats. La section 6 dégage les perspectives de recherches futures.

9.2. Contexte et cadre méthodologique de l'étude

9.2.1. Zone d'étude et complexité des changements d'utilisation de l'espace

La zone d'étude choisie pour cette application du SIE SMALL Savannah est la même que celle qui a été décrite au chapitre précédent. Une spécificité de cette zone est l'unicité du centre urbain de Maroua, situé au cœur de cette région de l'Extrême Nord du Cameroun. Cette ville aurait une très grande influence sur l'utilisation de l'espace autorisant la formulation d'une hypothèse d'organisation de l'espace autour du centre urbain tel qu'énoncé dans la théorie de l'état isolé de Von Thünen (1826). D'une superficie d'environ 3600 km², la population totale de cette petite région est estimée à 500 000 habitants en 2000, soit une densité moyenne de 138 hab./km² (RGPH, 1987). En dehors du centre urbain qui compte environ 200 000 habitants (Seignobos et al., 2001), c'est une zone de densité moyenne comparée à la zone des monts Mandara voisine située à l'ouest où on enregistre une très forte densité de population. On distingue trois principaux groupes ethniques dans cette petite région. Les Foulbé représente 29%, les Guiziga représentent 21%, les Mofu 34% et les autres ethnies représentent 16%. Nous avons montré au chapitre 5 que chaque ethnie avait une conception différente de l'organisation et de la gestion de l'espace qui pourrait influencer les dynamiques observées. Les mouvements migratoires les plus récents observés au cours des deux dernières décennies parfois stimulés par la mise en place d'infrastructure de communications, traduisent essentiellement des réponses à l'augmentation de la pression démographique, à la dégradation locale des ressources naturelles et aux nouveaux besoins économiques des populations rurales. Ces migrations récentes ont des conséquences sur les changements d'occupation du sol et d'utilisation de l'espace et peuvent conduire à d'importantes mutations inattendues dans le système agraire. On a remarqué par exemple que les migrations engendrent dans les zones d'accueil un processus d'extension des terres cultivées qui se traduit dans le paysage par un défrichement important des savanes boisées. Ces pratiques agricoles extensives imposées par la pression démographique et la faible disponibilité des terres exposent les sols à la dégradation. Les terroirs où aboutissent les courants migratoires les plus importants connaissent ainsi très vite une situation de saturation foncière qui peut conduire à la dégradation ou à des formes plus intensives d'utilisation de l'espace (Milleville et Serpantié, 1994).

Au chapitre 5, une analyse préalable a permis de caractériser les grandes dynamiques agraires et de produire une liste de facteurs qui peuvent potentiellement expliquer les changements observés. Ce travail préalable qui combine les informations issues de la revue de la littérature avec les données secondaires et les observations de terrain est important pour la compréhension des dynamiques en cours mais, elle ne fournit pas d'informations précises et localisées. Le chapitre précédent a abordé la résolution de ce problème en permettant l'identification et la quantification des principales conversions de l'occupation du sol. Toutefois, l'analyse des logiques d'organisation des formes d'occupation du sol et des causes des changements observés est restée descriptive, qualitative et hypothétique. Les explications étant principalement basées sur l'interprétation visuelle des images, les observations de terrain et des

discussions avec les acteurs impliqués dans l'utilisation et la gestion de l'espace. Une telle approche ne permet pas toujours de capturer toutes les interactions des facteurs et les chaînes de causalité qui gouvernent les structures d'utilisation de l'espace et les changements observés sur une vaste région. On court le plus souvent le risque de généraliser un phénomène local à l'échelle de la région.

Le présent chapitre porte sur la mise en œuvre d'une approche d'analyse complémentaire pour mieux comprendre les facteurs qui déterminent la structure et les dynamiques du système d'utilisation de l'espace. Cette application vise à identifier les combinaisons les plus pertinentes des facteurs explicatifs de la structure et des changements de l'utilisation de l'espace. Une quantification de leur influence devrait permettre de construire des modèles prédictifs performants de la distribution spatiale des changements d'utilisation de l'espace. La performance des modèles faits ici référence aussi bien à la précision de localisation, la rationalité et l'interprétabilité des résultats dans le contexte de la zone d'étude.

9.2.2. Justification de l'approche d'analyse des changements d'utilisation de l'espace

Les changements d'utilisation de l'espace sont le plus souvent la résultante d'une combinaison complexe d'un nombre important de facteurs qui changent dans le temps et en fonction des échelles et niveaux d'organisation. L'un des préalables d'une meilleure interprétation des processus observés dans les systèmes agraires est la reconnaissance de cette complexité et la mise en œuvre d'approches d'analyse appropriées. La communauté des chercheurs travaillant sur les changements d'utilisation de l'espace a pris conscience de cet enjeu. Il est maintenant reconnu que la structure et les changements d'utilisation de l'espace sont déterminés dans le temps et l'espace par une combinaison de facteurs de nature biophysique, sociodémographique, géoéconomique et politique qui interagissent à différentes échelles spatiales (Turner et al., 1995). Ces facteurs peuvent influencer directement l'utilisation de l'espace où à travers une longue chaîne de causalité qui peuvent également opérer à différents niveaux d'organisation. Les questions qui se posent dans différents contextes géographiques concernent l'identification des facteurs, l'évaluation de leur importance relative et les mécanismes qui sont en jeu à différentes échelles.

Au chapitre 2 de cette thèse nous avons montré que les approches utilisées pour aborder ces questions ont été le plus souvent orientées par les traditions disciplinaires. De plus en plus, les études adoptent des approches pluridisciplinaires qui se focalisent sur l'explication des processus sans se soucier des disciplines. Dans ce cas, plusieurs points de vue sont intégrés dans l'analyse qui prend en compte la multiplicité des facteurs déterminants pour construire des modèles explicatifs et prédictifs des changements d'utilisation de l'espace (Veldkamp et Fresco, 1996). Le choix des variables à considérer dans la construction de ce type de modèles est le plus souvent difficile du fait de la complexité du système et des processus à modéliser. Les approches scientifiques utilisées pour aborder ce problème peuvent être classées dans un continuum qui se situe entre deux extrêmes (Overmars et al., 2006). On distingue d'un côté, les approches purement inductives qui correspondent aux situations où le choix des facteurs ne s'appuie ni sur un modèle ou une théorie quelconque. La méthode consiste dans ce cas à explorer les grandes bases de données à la recherche de corrélations qui permettraient de déduire des explications. Un premier pas de cette extrémité vers les approches déductives consiste à combiner l'exploration des données avec des hypothèses sur les facteurs qui pourraient être pertinents à l'explication des processus étudiés. Un deuxième pas consiste à définir les variables explicatives en s'appuyant sur des théories de changement d'utilisation de l'espace existantes. Un troisième pas consiste à définir également la structure du modèle en

s'appuyant sur la théorie qui a permis d'identifier les variables. D'autres approches intermédiaires peuvent être définies en incluant un niveau plus ou moins important d'éléments d'une approche déductive. A l'autre extrémité, les approches purement deductives sont celles où pour un système d'utilisation de l'espace donnée, un modèle ou une théorie est spécifié et les paramètres définis. Le modèle ou la théorie est ensuite testé par rapport à la réalité afin d'en apporter des améliorations.

La plupart des études qui portent sur la compréhension des changements d'utilisation de l'espace ont une forte tendance inductive alors que très peu s'appuient sur des théories existantes pour identifier et quantifier les facteurs explicatifs. Les approches inductives sont certes appropriées dans les situations où on ne dispose pas ou de très peu de connaissances sur le système étudié mais, un inconvénient majeur c'est qu'elles peuvent conduire à de nombreuses corrélations qui ne correspondent pas nécessairement à des mécanismes ou à des processus pertinents. L'inconvénient des approches deductives c'est qu'elles réduisent le plus souvent la réalité et arrive difficilement à saisir toute la complexité des systèmes étudiés. Toutefois, elles présentent l'avantage d'incorporer explicitement dans les modèles les mécanismes en jeu, de fournir des meilleures preuves de causalité et de produire des structures qui peuvent être facilement généralisées. En somme, une approche plus réaliste devrait consister à combiner les deux approches en tirant profit des avantages tout en minimisant les inconvénients de chacune.

9.2.3. Cadre méthodologique de l'étude

Pour atteindre les objectifs énoncés dans ce chapitre, la méthode d'exploration suivie dans cette application combine les aspects d'une approche de type inductif avec les éléments d'un raisonnement de type deductif. En effet, la méthode combine l'exploration systématique des données avec les théories de changement d'utilisation de l'espace (chapitre 2) et les connaissances empiriques sur le système d'utilisation de l'espace de la zone d'étude (chapitre 5). Ce chapitre illustre ainsi un exemple d'application du SIE SMALL Savannah présenté au chapitre 6. La figure 9.1 montre que les principaux modules du SIE mis en œuvre sont le module d'analyse spatiale et le module d'explication et prédiction. Le diagnostic du système d'utilisation de l'espace qui a été effectué au chapitre 5 n'est plus traité ici. Les paragraphes suivant décrivent les étapes de la procédure d'identification des facteurs déterminants et de construction des modèles de prédiction.

L'objectif de cette procédure est de sélectionner pour chaque utilisation de l'espace, l'ensemble le plus pertinent de facteurs qui expliquent la structure et les changements observés. Dans plusieurs études, le choix des facteurs déterminants les structures d'utilisation de l'espace et leur changement est limité par la disponibilité des données. On suppose le plus souvent que les facteurs déterminants la localisation des utilisations de l'espace à un moment donné, seront celles qui vont opérer pour une période donnée. L'inconvénient de cette situation est que les prédictions au-delà de cette période ne sont pas valides. Pour cette application, l'analyse statistique est effectuée sur deux dates (1987 et 1999). Ceci permet dans un premier temps de prendre en compte le changement de la nature et de l'importance des facteurs dans l'explication de la structure spatiale de l'utilisation de l'espace. L'analyse statistique effectuée pour le changement entre les deux dates permet également d'expliquer la dynamique spatiale des changements observés. L'idée principale de la méthode d'exploration est de tirer profit à la fois des connaissances empiriques sur les processus et des possibilités offertes par les données spatiales explicites disponibles.

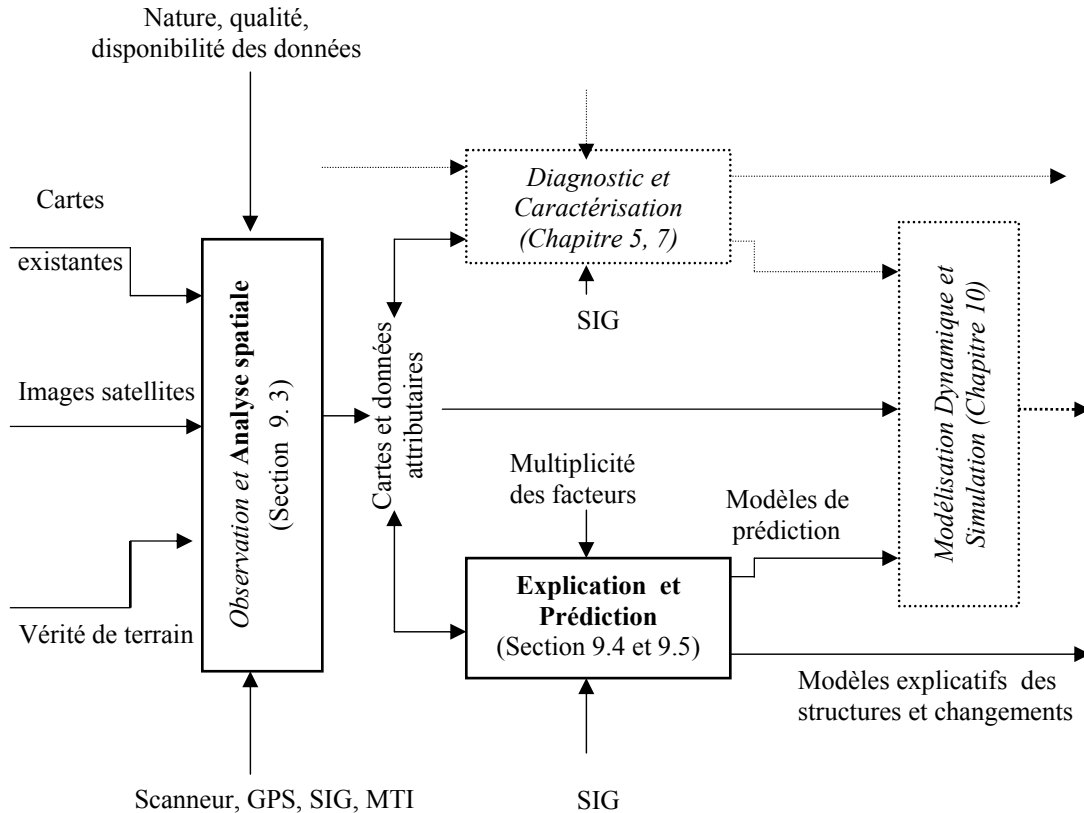


Figure 9.1 : Cadre conceptuel et outils de SMALL Savannah utilisés pour l'analyse des facteurs déterminants les changements d'utilisation de l'espace. Les rectangles en pointillé et les textes en italique représentent les modules non utilisés dans cette application.

Les principales étapes de l'identification des facteurs déterminants incluent :

- la construction des régressions simples entre l'utilisation de l'espace et toutes les variables;
- la sélection des variables potentiellement déterminantes ;
- l'exécution de la procédure de régression conditionnelle multiple pas à pas ;
- la construction et l'évaluation des performances du modèle de prédiction final.

Interprétation des paramètres statistiques des régressions simples

Si on considère l'équation du modèle logistique introduit au chapitre 3, les principaux paramètres statistiques utilisés pour la sélection des variables sont : les coefficients de corrélations ou coefficients logistiques (β_i), la signification statistique de la corrélation (P) et le pouvoir explicatif de la variable dépendante mesuré par la méthode ROC. Le signe et la valeur des coefficients β_i déterminent la nature et l'importance de la contribution du facteur représenté par la variable X_i . En effet pour des coefficients β négatifs, lorsque la valeur de la variable indépendante X grandit, $\beta_0 + X\beta$ devient grand et la probabilité de présence de l'utilisation de l'espace tend vers 1. Pour des coefficients positifs, elle tend vers 0 lorsque la valeur de la variable indépendante X_i grandit (Agresti et Finlay, 1997). Les variables de type catégorie

ayant n valeurs sont traitées comme n-1 variables binaires. Une valeur correspondant à une catégorie moyenne étant choisie comme référence dans la procédure du calcul de la régression. Dans les cas des variables *soilpot* et *soilsorg*, il s'agit respectivement de *soilpot4* et *soilsorg4*. Les coefficients logistiques sont donnés pour chacune des n-1 variables. Le test de Wald est utilisé pour apprécier la signification de chaque corrélation. Les corrélations sont jugées significatives pour $P < 0.01$, soit un degré de confiance de 99% (Agresti et Finlay, 1997). Dans cette application, les niveaux de signification des variables dérivées des variables de type catégorique ne sont pas considérés individuellement dans la procédure de sélection. La valeur de la superficie au-dessous de la courbe ROC est interprétée comme le pouvoir explicatif de la variable indépendante par rapport à la variable dépendante pour chaque modèle de régression simple (Pontius et Schneider, 2001).

Sélection des variables candidates et construction des modèles de prédiction

La procédure de sélection des facteurs déterminant potentiellement a été introduite au chapitre 3. On considère deux seuils de pouvoir explicatif minimum $ROC_{s1} = 0,6$ et $ROC_{s2} = 0,7$.

Les variables dépendantes qui se sont révélées au cours de l'exploration des données sont sélectionnées si le pouvoir explicatif est supérieur à 0,7. Toutefois, la corrélation devra correspondre à une relation pertinente lorsqu'on se réfère aux théories ou aux connaissances empiriques sur le système d'utilisation de l'espace dans la région. Les variables ayant un pouvoir explicatif compris entre 0,6 et 0,7 sont sélectionnées si elles sont déterminantes par hypothèse. Cela signifie que leur corrélation traduit un processus pertinent ou correspond à une hypothèse à tester. Les variables ainsi sélectionnées sont insérées dans une régression conditionnelle pas à pas de type ascendant. Cette procédure de régression évalue la contribution des différentes variables à l'explication de la variable dépendante et décide de l'insertion ou de l'exclusion d'une variable en s'appuyant sur le niveau de signification statistique et l'importance de la colinéarité avec les autres variables du modèle. On arrive ainsi à réduire les effets de multi-colinéarité et les variables indépendantes incluses sont faiblement corrélées les unes aux autres. Les variables finalement sélectionnées à l'issue de la régression pas à pas sont utilisées pour calculer l'équation du modèle de régression. Dans le cas de la régression multiple finale, la valeur en dessous de la courbe ROC, calculée pour chaque utilisation de l'espace en 1987 ou en 1999, est interprétée comme la capacité de discrimination du modèle de prédiction défini par l'équation de régression obtenue. Pour la carte des changements entre 1987 et 1999, elle est interprétée comme la capacité de détection des changements de cette utilisation de l'espace (Pontius et Schneider, 2001).

9.3. Représentation de l'utilisation de l'espace et des facteurs déterminants

Cette section décrit les traitements mis en œuvre pour représenter au mieux les phénomènes liés à l'utilisation de l'espace et aux facteurs déterminants. On distingue les traitements préalables des données et les opérations d'analyse spatiale

9.3.1. Traitements préalables des données

Les traitements préalables incluent l'extraction des couches d'information de la base de données du SIE SMALL Savannah et la définition d'une échelle commune de représentation des données (étendue et

résolution). Ces données étant disponibles à différentes échelles spatiales (chapitre 4), le traitement préalable vise également à obtenir un ensemble de données géoréférencées sur la zone d'étude.

Les limites de cette zone étant artificielles parce que déterminées par l'étendue des scènes d'image satellite utilisées, les effets de bordures sont très importants. A titre d'exemple, pour le calcul de la distance au marché ou au centre urbain le plus proche, les zones de bordures qui sont proches des marchés ou des centres urbains situés hors de la zone n'ont pas des valeurs réalistes. Pour réduire ces effets de bordure, le traitement de toutes les données c'est à dire le calcul des variables spatiales est effectué dans ces cas à l'échelle de la grande région avant d'extraire ensuite l'étendue correspondant à la zone d'étude.

Toutes les couches d'informations sont ramenées à la même résolution spatiale pour que les croisements soient possibles et l'interprétation pertinente. Le choix d'une résolution d'analyse doit être un compromis entre l'échelle d'opération des processus et la résolution des données disponibles sur l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants. Le choix de l'échelle d'analyse est difficile dans la mesure où tous les processus n'opèrent pas à la même échelle et chaque processus opère sur une plage d'échelle et non sur une échelle spécifique (Allen et Starr, 1982 ; Bian, 1997). Les images satellites utilisées ont une résolution de 20 m mais les cartes d'occupation du sol produites ont une résolution de 100 m qui se justifie par le niveau de précision de la méthode de cartographie (voir chapitre 8). A cette résolution, la carte contient encore des hétérogénéités ou détails qui sont difficiles à lier avec les facteurs déterminants d'autant plus que les couches d'information correspondantes ne sont pas disponibles à une échelle aussi fine.

Compte tenu de l'échelle de représentation des autres couches d'information (relief, type de sol, population), la résolution minimale a été fixée à 250 m. On a procédé au changement de résolution de cette carte en procédant à plusieurs agrégations spatiales successives avec un pas de 250 m. Les proportions de chaque classe d'utilisation de l'espace sont maintenues mais les structures d'utilisation de l'espace changent. A chaque pas de temps, les structures de la carte obtenue sont comparées avec celles de la carte de résolution initiale. La procédure de comparaison utilisée est celle proposée par Costanza (1989) et qui compare les structures entre deux images à plusieurs résolutions. L'algorithme de comparaison et de calcul du coefficient d'ajustement F_t a été introduit et décrit au chapitre 3. La taille des fenêtres de comparaison varie de 1 à 100 cellules avec un pas de 4. Le coefficient d'ajustement global (F_i) est calculé comme une moyenne pondérée des coefficients d'ajustement successifs de chaque fenêtre (F_w). Les courbes décrivant les mesures de similarité successives sont présentées à la figure 9.2. On remarque qu'au-delà de 1 000 m de résolution, l'ajustement global devient très bas ($F_t < 0.7$) et la courbe prend de plus en plus l'allure d'une droite indiquant que, les structures des deux images sont très différentes. Cette différence est d'ailleurs perceptible visuellement. Entre 250 m et 1000 m par contre on a des courbes traduisant une bonne similarité de structure entre les deux images. En effet, la courbe augmente d'abord très rapidement avant de se stabiliser à une valeur proche de 1. La plage de 250 à 100 m peut donc être utilisée en garantissant la conservation des grandes structures de l'utilisation de l'espace. Dans cette application, les données ont été ramenées à la résolution de 250 m. L'espace rectangulaire à analyser est donc une grille de 271 lignes et 288 colonnes, soit 78 048 cellules.

Un test de multi-colinéarité a été appliqué à toutes les variables incluses dans les modèles en effectuant une régression entre chaque variable indépendante et les autres variables indépendantes. Les données spatiales sur l'utilisation de l'espace ont une tendance à être dépendantes : on parle d'auto corrélation spatiale. L'autocorrection spatiale est la propriété qui fait que, du fait de la proximité géographique, des

variables dans l'espace (sur une certaine distance) prennent des valeurs plus proches qu'on ne l'aurait espéré si les observations étaient distribuées de façon aléatoire (Overmars et al., 2003). L'ensemble des analyses s'est effectué sur un échantillon aléatoire de 20% (soit 11380) des cellules avec les données de 1987 et 1999 afin de minimiser les effets de l'auto corrélation spatiale. Avec les données des changements d'utilisation de l'espace entre 1987 et 1999, l'analyse est faite sur toutes les cellules (57144) puisque le nombre total d'observation est très faible.

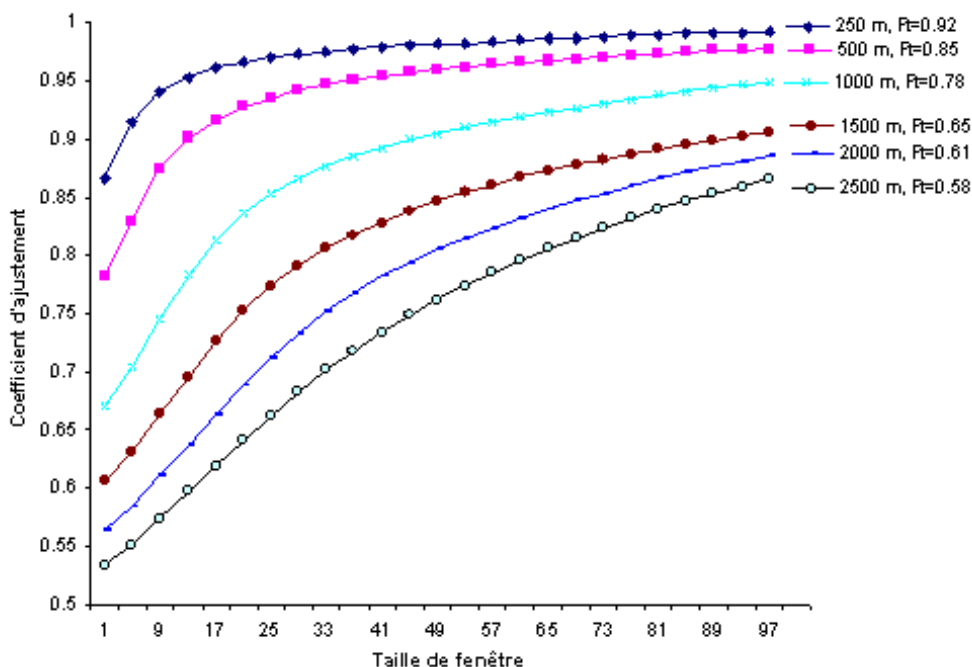


Figure 9.2 : Effets du changement de résolution spatiale sur les structures d'utilisation de l'espace. Les différentes cartes sont comparées avec la carte initiale de résolution 100 m.

9.3.2. Procédure de calcul des variables spatiales

Cette section, décrit comment les variables représentant l'utilisation de l'espace et les facteurs potentiellement déterminants, ont été formulées et représentées. La sélection des données sur les facteurs déterminants s'est faite sur la base d'une revue de la littérature. Une liste de facteurs qui peuvent expliquer les changements d'utilisations de l'espace a été ainsi produite au chapitre 5. Sur la base des connaissances disponibles sur la zone d'étude, une description est donnée sur la façon dont chaque facteur influence l'organisation ou les changements d'utilisation de l'espace. Lorsque des connaissances ne sont pas disponibles, des hypothèses sont émises sur les processus dominants. Ces hypothèses peuvent être dérivées de la théorie ou des expériences dans des zones similaires. De même, les variables ont été construites à partir des données en s'appuyant sur quelques théories de changement d'utilisation de l'espace qui ont été présentées au chapitre 2. Il s'agit par exemple de la théorie de Boserup (1965) qui aborde les conséquences de la densité de la population, la théorie de Malthus au sujet de l'impact de la population sur la dégradation environnementale (Hommer Dixon, 1999), la théorie de Von Thünen (1826) qui parle des marchés et leur influence sur l'organisation des utilisations de l'espace (O'Kelly et Bryan, 1996). En appliquant une suite de fonctions d'analyse spatiale, les variables quantitatives représentant au mieux les processus étudiés, sont calculées à partir des couches d'information issues de la base de données de SMALL Savannah. Les

opérations d'analyse spatiale ont permis de dériver un ensemble de 47 variables réparties de la façon suivante. 18 variables portent sur l'utilisation de l'espace et ses changements soit 6 types d'utilisation de l'espace pour chacune des trois situations : 1987, 1999 et les changements entre les deux dates. On dénombre 15 variables représentant les facteurs biophysiques, 8 variables représentant les facteurs sociodémographiques et 6 variables représentant les facteurs géoéconomiques. Les paragraphes suivant décrivent tour à tour la nature et la procédure de calcul de chacune de ces variables.

Utilisation de l'espace

Les variables représentant l'utilisation de l'espace sont dérivées à partir des deux cartes d'occupation du sol de 1987 et de 1999 qui ont été produites au chapitre précédent. Ces cartes comportent chacune 8 classes. L'opération de classification a été utilisée pour créer deux cartes d'utilisation de l'espace comportant 7 classes. Les classes d'occupation « savanes boisées » et « zones parcourues par le feu » correspondent à une seule utilisation de l'espace qui est appelée « brousse ». Les zones de montagne étant supposées stables au cours du temps, seules 6 classes sont utilisées dans les analyses. Une variable est dérivée pour chaque classe d'utilisation de l'espace et pour chaque date. Une variable correspondant aux changements d'utilisation de l'espace entre 1987 et 1999 est également calculée en croisant les deux premières cartes obtenues. Celle-ci indique pour chaque position si l'utilisation de l'espace présente a changé ou pas. On obtient un total de 18 variables binaires qui décrivent l'utilisation de l'espace et les changements survenus entre les deux dates (tableau 9.1).

Facteurs biophysiques

Les variables représentant les facteurs biophysiques concernent le relief, les types de sol et la pluviométrie (tableau 9.2). Les variables de relief (*altitude* et *slope*) représentent respectivement l'altitude et la pente. Le modèle numérique de terrain (MNT) est défini par la fonction f qui à chaque cellule de coordonnées x et y associe son altitude $f(x, y)$. La valeur de la variable *slope* est dérivée par la formule suivante où on identifie la valeur maximale de l'angle de changement d'altitude de chaque cellule aux cellules voisines :

$$P(x, y) = \text{Arctg} \left(\frac{\text{Max} \left(\frac{df(x, y)}{dx}, \frac{df(x, y)}{dy} \right)}{r} \right),$$

Cette valeur représente l'angle de déviation de la pente sur l'espace considérée. Par exemple, une pente de 45° correspondra à une valeur de 100%, ce qui signifie que la valeur de la pente pourrait excéder 100%.

Cette variable ne mesure pas la valeur réelle de la pente, elle n'est qu'un proxy de la pente qui dépend de la résolution du Modèle Numérique de terrain (MNT). Cette mesure aura tendance à sous estimer la pente en fonction de la variation de l'altitude. Pour améliorer le calcul de la pente à la résolution de 250 m, le MNT a été converti en une carte de point et une interpolation linéaire a été effectuée. La figure 9.4 présente la carte de la variable *altitude* où on peut voir que la zone d'étude est divisée en trois grandes zones d'altitude. D'est en ouest, on distingue successivement : les plaines du Diamaré où l'altitude varie entre 300 et 400 m, les zones de pédiplaines de Kaélé où l'altitude varie entre 400 m et 500 m et les zones

de piémonts où l'altitude varie entre 500 et 800 m. On note également quelques zones montagneuses, principalement dans la partie nord ouest qui atteignent environ 950 m.

Variable	Description	N_1	$\%N_1$
Utilisation de l'espace en 1987			
Habitation	1 si habitation, sinon 0	1 010	1,8
Maraîcher Verger	1 si maraîcher/verger, sinon 0	687	1,2
Culture pluviale	1 si culture pluviale, sinon 0	14 941	26,1
Sol nu	1 si sol nu, sinon 0	8 308	14,5
Sorgho repiqué	1 si sorgho de contre saison, sinon 0	10 276	18,0
Brousse	1 si brousse, sinon 0	19 045	33,3
Utilisation de l'espace en 1999			
Habitation	1 si habitation, sinon 0	1 068	1,9
Maraîcher Verger	1 si maraîcher/verger, sinon 0	794	1,4
Culture pluviale	1 si culture pluviale, sinon 0	20 490	35,9
Sol nu	1 si sol nu, sinon 0	5 007	8,8
Sorgho repiqué	1 si sorgho de contre saison, sinon 0	14 972	26,2
Brousse	1 si brousse, sinon 0	11 936	20,9
Changements d'utilisation de l'espace entre 1987 et 1999			
Habitation	1 si habitation a changé, sinon 0	62	0,1
Maraîcher Verger	1 si maraîcher/verger a changé, sinon 0	224	0,4
Culture pluviale	1 si culture pluviale a changé, sinon 0	7 641	13,4
Sol nu	1 si sol nu a changé, sinon 0	1 155	2,0
Sorgho repiqué	1 si sorgho de contre saison a changé, sinon 0	7 105	12,4
Brousse	1 si brousse a changé, sinon 0	2 219	3,9

Tableau 9.1 : Caractéristiques des variables décrivant l'utilisation de l'espace et ses changements. N_1 est le nombre d'observations où l'utilisation de l'espace concernée est présente et $\%N_1$ représente le pourcentage par rapport au nombre total d'observations $N=5714$.

Les variables de type de sol (*soilpot* et *soilsorg*) sont de type catégorique. Les catégories de ces variables correspondent à des niveaux d'aptitude croissants du sol pour les activités agricoles. Les valeurs de la variable *soilpot* correspondent à une appréciation des potentialités du sol pour l'ensemble des activités agricoles. Les caractéristiques de chaque niveau de potentialité sont données au chapitre 5. Les valeurs de la variable *soilsorg* correspondent à des niveaux d'aptitude des sols pour la culture du sorgho de contre saison. Les caractéristiques de chaque niveau d'aptitude ont été décrites au chapitre 7.

La variable de pluviométrie (*rainfall*) est calculée à partir des relevés pluviométriques disponibles dans la base de données sous forme de tableaux indiquant les quantités de pluies en mm et en nombre de jours de pluie pour 14 stations sur la zone d'étude pour la période 1994-2001. Une carte de points représentant les stations pluviométriques a été établie et une interpolation spatiale est effectuée pour dériver la pluviométrie annuelle moyenne de chaque cellule. La variable *rainfall* représentée spatialement à la figure 9.3, permet de distinguer quatre principales zones d'isohètes dont les valeurs de pluviométrie moyenne varient de 750 mm à 970 mm par an suivant un gradient nord est – sud ouest.

Variable	Description	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type
Altitude	Altitude en mètre	331	968	441	82
Slope	Pente en % (45°=100%)	0	18	2	2
Rainfall	Pluviométrie annuelle moyenne en mm	751	973	864	46
Soilsorg	De 1 si très apte au sorgho repiqué à 6 si inapte	1	6	3	1,87
Soilpot	De 1 si très fortes potentialités agricoles à 6 si inapte	1	6	4	1,45

Tableau 9.2 : Caractéristiques des variables décrivant les facteurs biophysiques.

Facteurs sociodémographiques

Le tableau 9.3 donne la liste des variables représentant les facteurs sociodémographiques. Ces variables décrivent la pression potentielle de la population sur l'espace (*rurpop*, *poppot*), la densité de la population (*density*) et sa composition ethnique (*fulbé*, *guiziga* et *mofu*).

Variable	Description	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type
Fulbe	Pourcentage de l'ethnie Foulbé	0	1	0,26	0,35
Mofu	Pourcentage de l'ethnie Mofu	0	1	0,23	0,38
Guiziga	Pourcentage de l'ethnie Guiziga	0	1	0,30	0,40
Density	Densité de la population	0	83 001	92	367
Rurpot87	Indice de pression de la population rurale en 1987	0	9 568	843	1 113
Rurpot99	Indice de pression de la population rurale en 1999	1	11 078	1 491	1 607
Poppot87	Indice de pression de la population totale en 1987	0	42 295	1 440	3 405
Poppot99	Indice de pression de la population totale en 1999	1	51 634	2 436	4 782

Tableau 9.3 : Caractéristiques des variables décrivant les facteurs sociodémographiques.

Les variables d'ethnicité, *fulbé*, *guiziga* et *mofu*, correspondent au pourcentage de chacun de ces groupes ethniques par localité. Une carte des villages associés aux effectifs de la population en 1987 a été réalisée sur la base des données du dernier recensement général de la population du Cameroun (RGPH, 1987). La population étant dynamique, une carte de population pour l'année 1999 a été réalisée en appliquant la formule de projection suivante : $P_n = P_{n_0} * (1 + T)^{n-n_0}$ où T est le taux d'accroissement de la population par unité administrative, n_0 est la date initiale et n est la date de projection.

La densité de population (*density*) a été calculée à partir de la carte des populations de villages en utilisant la méthode du polygone de Thiessen. Cette méthode d'interpolation locale suppose que la distribution de la population est homogène dans l'espace. Ce qui n'est pas très réaliste et ne pourrait pas permettre d'apprécier les différences d'utilisation de l'espace qui sont liées aux variations de la pression de la population. Pour résoudre ce problème un indice a été calculé pour représenter la pression potentielle de la population sur l'espace.

La formulation de cet indice s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle la pression humaine sur l'espace et les ressources naturelles part d'un point central (le village) et évolue suivant un gradient décroissant quand on s'éloigne du village. Le modèle de calcul repose sur le principe général des modèles gravitaires qui définissent la relation physique entre objets, induite par une force de gravité en se basant sur la distance et une masse. Etant donné un objet (village) placé en un point origine (centre du village), la force (potentiel, pression) va diminuer graduellement au fur et à mesure qu'on se déplace de cette position centrale mais va également augmenter avec la masse (population) de l'objet. La fonction utilisée pour traduire ce facteur suit le modèle gaussien (Ingram, 1971) qui a été appliqué avec succès dans plusieurs études de cas traitant de l'accessibilité (Verburg et al, 2004). Cette fonction définit de la manière suivante produit un indice qui évolue suivant un gradient décroissant quand on s'éloigne des zones fortement peuplées.

$$Poppot_i = \sum_{j=1}^k \left[P_j * e^{\left(\frac{-(d_{ij})^b}{2a^2} \right)} \right]$$

Dans cette formule, $Poppot_i$ représente la pression sur la localité i , causée par les k villages les plus proches, d_{ij} est la distance entre cette localité i et le village j , a est la distance au point d'inflexion de la courbe Gaussienne que définit la fonction d'accessibilité et b est l'exposant de la distance. En s'appuyant sur les caractéristiques des villages de la zone d'étude (Balaza, Mowo, Gadas, voir chapitre 8), on a estimé la zone d'influence moyenne qui correspond à la distance au-delà de laquelle la pression de la population s'annule pour un village. Ainsi on a choisi $b = 2$ et le facteur distance a qui représente le point d'inflexion de la courbe Gaussienne à 1,5 km. La figure 9.3 montre que pour un village théorique de 1 500 habitants, l'indice de population décroît à partir de la valeur 1 500 et s'annule à 5 km du centre. Cet indice permet de localiser les zones de forte pression humaine et les zones relativement vides qui sont des meilleurs indicateurs de localisation des zones cultivées en cultures pluviales, en sorgho repiqué ou des zones encore boisées. Le modèle ainsi défini s'appliquerait donc bien à l'analyse de la structure spatiale de certaines utilisations de l'espace (cultures pluviales, sorgho repiqué et la brousse) dans les zones rurales où l'habitat dans les villages est regroupé. Ainsi, deux cas ont été distingués: 1) l'indice de population potentielle qui considère uniquement la population des zones rurales (*rurpot*); et 2) l'indice de population potentielle globale intégrant également la population urbaine (*poppot*). L'indice de pression de la population sur l'espace environnant a été calculé pour les deux dates afin de prendre en compte la dynamique de la population. A titre d'exemple, la carte de l'indice de population (*rurpot*) présentée à la figure 9.4, permet de voir les zones où la pression humaine dans les zones rurales est potentiellement plus forte. Ces zones qui apparaissent en couleur foncée sont principalement localisées dans la moitié nord de la région. Les zones plus claires dans la partie sud correspondent à des terres vides qui sont soit occupées par la brousse ou utilisées pour la culture du sorgho de contre saison.

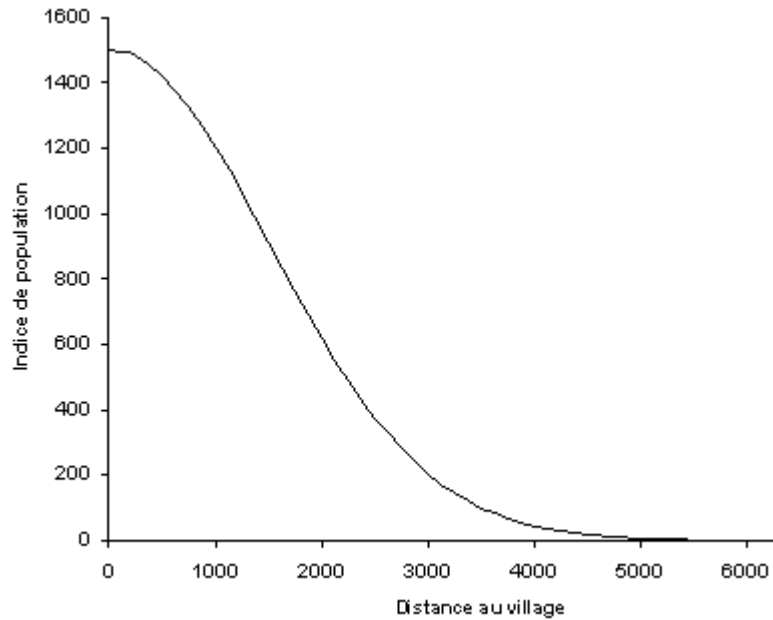


Figure 9.3 : Courbe de distribution de l'indice de population potentielle pour un village de 1 500 habitants.

Facteurs géoéconomiques

Les variables géoéconomiques décrites dans le tableau 9.4 concernent principalement les variables d'accessibilité. Il s'agit de la distance aux routes (*distroad*), la distance au cours d'eau (*distriver*), les temps estimés de déplacement à la ville (*travelc*), aux centres urbains (*travelu*) ou aux marchés (*travelm*) les plus proches. Ces variables ont été calculées en combinant plusieurs cartes de nature différentes qui sont disponibles dans la base de données de SMALL Savannah : une carte du réseau de l'infrastructure routière, une carte du réseau hydrographique, une carte de la ville de Maroua, une carte des petits centres urbains autour de Maroua et la carte des principaux marchés de sorgho et de bétail. La variable *livestock* dont les valeurs indiquent la densité du cheptel par zone est également considérée comme une variable économique dans la mesure où elle traduit l'importance de l'activité d'élevage. La variable *livestock* est calculée à partir des données de recensement du cheptel qui sont également disponibles dans la base de données de SMALL savannah. Les variables *distroad* et *distriver* représentant respectivement la distance à la route et la distance au cours d'eau le plus proche, sont obtenues en appliquant un calcul de distance euclidienne de chaque localité aux objets destination. Les cartes correspondant aux variables *distroad* et *distriver* présentées à la figure 9.4, sont faciles à comprendre. Elles mettent en exergue les réseaux routiers et hydrographiques de la zone d'étude ainsi que les gradients d'accessibilité évalués en terme de distance.

Les temps de déplacement relatif de chaque localité à la ville (*travelc*), au centre urbain (*travelu*) ou au marché (*travelm*) le plus proche ont été calculés en prenant en compte le niveau d'accessibilité. L'accessibilité est une fonction qui définit la capacité des populations à interagir avec des sites présentant des opportunités économiques comme le marché, les produits manufacturés, les moyens de transport, l'industrie etc. (Deichman, 1997). Plusieurs mesures de l'accessibilité peuvent être envisagées dépendant des acteurs, de leurs préférences et des conditions économiques et sociales (Verburg et al., 2004). En plus de la distance euclidienne entre la localité et le point destination, la fonction d'accessibilité définie dans cette application prend en compte les contraintes de déplacement posées par les moyens de déplacements

utilisés dans la région, le retard crée par la présence d'un cours d'eau ou la nature des différents types d'utilisation de l'espace. Ces contraintes sont modélisées par un facteur de résistance (Map_{Resist}) qui est inversement proportionnelle à la vitesse et traduit un poids ou qui reflète la diminution relative de la vitesse dans les zones moins accessibles comparée aux zones les mieux accessibles (Toxopeus, 1996).

$$Map_{Resist} = \frac{Map_1}{Map_{SpeedRoad} \oplus Map_{SpeedRiver} \oplus Map_{SpeedLU}} \text{ où,}$$

Map_1 est une carte avec toutes les valeurs à 1, $Map_{SpeedRoad}$, $Map_{SpeedRiver}$ et $Map_{SpeedLU}$ représentent respectivement les vitesses de déplacement affectées aux routes, aux rivières et aux différentes unités d'occupation du sol. Ces vitesses ont été estimées à partir des connaissances de la région issues de la littérature et des travaux de terrain.

Variable	Description	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type
livestoc	Densité du cheptel en UBT/km ²	0	98	52	17
travelc	Temps de déplacement à la ville de Maroua	0	33 639	14034	5 964
travelu	Temps de déplacement au centre urbain plus proche	0	25 063	9053	4 688
travelm	Temps de déplacement au marché plus proche	0	32 205	10569	5 792
distriver	Distance à la rivière en mètre	0	14 160	3875	3 051
distroad	Distance à la route en mètre	0	7603	1559	1 290

Tableau 9.4 : Caractéristiques des variables décrivant les facteurs géoéconomiques.

Pour les routes, les vitesses moyennes estimées prennent en compte le type de route et le moyen de transport utilisé. Nous avons distingué cinq moyens différents de déplacement et la vitesse moyenne pour chaque catégorie de route est une moyenne pondérée qui prend en compte les vitesses relatives de chaque moyen de déplacement et le pourcentage des utilisateurs qui l'empruntent (tableau 9.5).

Pour les cours d'eau, l'estimation s'est basée sur une combinaison des données de la littérature et des connaissances de la zone d'étude. Dans plusieurs applications où les cours d'eau contiennent de l'eau, la vitesse de l'eau est placée à une valeur faible, de l'ordre de 0,3 km/h, traduisant ainsi les difficultés d'accessibilité (Toxopeus, 1996 ; Verburg, 2004). Dans le cas du Nord Cameroun, la contrainte des cours d'eau est très limitée dans l'espace et le temps car ce sont des cours d'eau saisonniers qui ne contiennent de l'eau que trois mois dans l'année et peuvent facilement être traversés à pied. La vitesse de 0,5 km/h a été affectée aux cours d'eau principaux et la vitesse de 1 km/h aux cours d'eau secondaires.

Type de route	Moyen de déplacement					Vitesse Moyenne	Facteur de résistance
	Voiture Privée	Voiture publique	Moto	Bicyclette	Pied		
Bitumée	80	60	25	15	5	51	1
Non bitumée et permanente	40	30	15	10	4	26	1,96
Non bitumée et non permanente	27	20	10	7	3	18	2,83
Piste	15	10	8	3	2	9	5,60
Pourcentage des utilisateurs	5	70	15	5	5		

Tableau 9.5 : Vitesse de déplacement moyenne en km/h pour les différentes catégories de route. Les valeurs de vitesse sont des estimations basées sur les expériences de terrain et les avis des utilisateurs et experts de la région.

La carte d'occupation du sol sur la zone d'étude a été utilisée pour regrouper les différentes unités d'occupation du sol en fonction des difficultés d'accès et leur affecter des vitesses correspondantes. Ainsi, les zones montagneuses sont plus difficilement accessibles (0,25 km/h). Les zones de brousses sont également relativement difficiles à accéder du fait de la présence de la végétation ligneuse (2 km/h). Par contre les sols nus et les zones cultivées sont plus facilement accessibles. Les zones de culture de sorgho de contre saison sur les terres argileuses présentent toutefois des difficultés d'accès en saison des pluies (3 km/h) alors que les zones sur les terres sableuses ou caillouteuses sont relativement accessibles (5 km/h).

Le facteur de résistance étant inversement proportionnel à la vitesse et le facteur de résistance associé à la plus grande vitesse étant fixée à 1, le facteur de résistance associé aux autres vitesses de déplacement est déduit facilement comme le présente le tableau 9.6. Le temps de déplacement ($Travel_{dest}$) est évalué comme une distance pondérée en utilisant une fonction d'analyse spatiale qui prend en entrée la carte de résistance et une carte de destination (Map_{Dest}). Cette dernière peut être la carte de la ville, des centres urbains ou des marchés. On note :

$Travel_{Dest} = Weightdist(Map_{Dest}, Map_{Resist})$. Dans ce calcul, plus le poids d'une cellule c'est-à-dire la valeur du facteur de résistance sera élevée et plus la distance sera grande, c'est-à-dire que le temps pour accéder à la destination sera plus important.

A titre d'exemple, la représentation spatiale de la variable *travelu* est donnée à la figure 9.4. Les zones les plus claires sont les plus accessibles à partir des centres urbains. On peut y distinguer 4 principaux centres urbains : le principal centre urbain situé au cœur de la région correspond à la ville de Maroua est entouré des centres de Méri dans le nord ouest, de Gazawa dans le sud ouest et de Mindif dans le sud est. L'influence du centre urbain de Bogo sur l'accessibilité est également perceptible dans la partie nord est de la région. Les zones les moins accessibles apparaissent en couleur marron foncé.

N°	Type d'occupation du sol	Vitesse moyenne en km/h	Facteur de résistance
1	Route Bitumée	51	1
2	Route non bitumée permanente	26	1,96
3	Route non bitumée et Non permanente	18	2,83
4	Piste	9	5,6
5	Zones sableuses	5	16
6	Zones argileuses	3	26
7	Brousse	2	40
8	Cours d'eau secondaire	1	80
9	Cours d'eau principal	0,5	160
10	Montagnes	0,25	320

Tableau 9.6 : Facteur de résistance associé aux différentes entités spatiales.

9.4. Résultats de l'exploration des facteurs déterminants et construction des modèles de prédiction

Cette section présente et interprète tour à tour les résultats de la procédure d'exploration des facteurs déterminant chacune des 6 utilisations de l'espace suivantes : zone d'habitation, culture maraîchère/verger, culture pluviale, sol nu, sorgho repiqué et brousse.

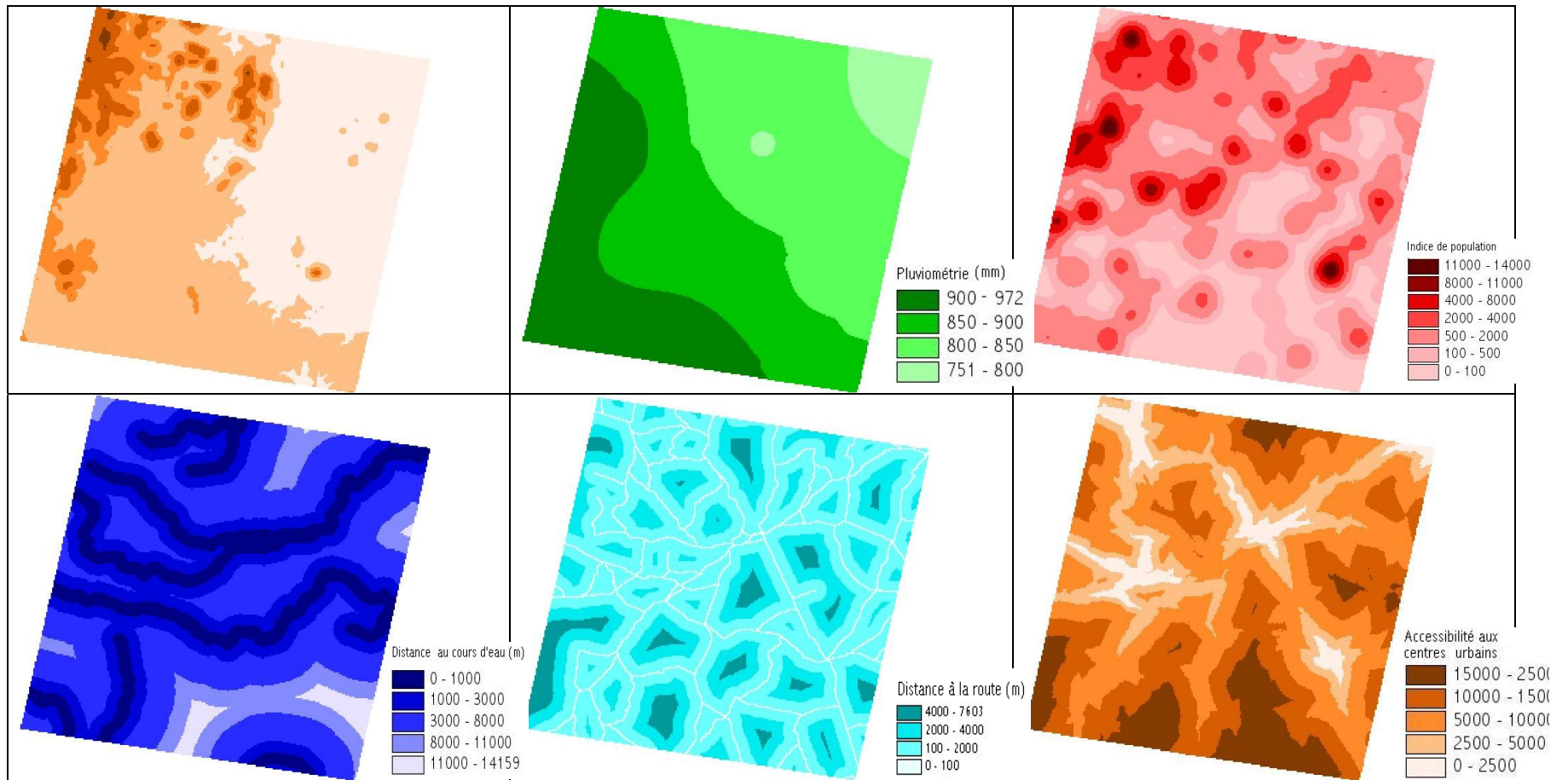


Figure 9.4 : Cartes de quelques variables représentant les facteurs déterminant la structure et les changements d'utilisation de l'espace.

9.4.1. Les zones d'habitation

Le tableau 9.7 résume les résultats des régressions simples entre l'utilisation de l'espace « zone d'habitation » et l'ensemble des facteurs potentiellement déterminants dans les trois cas étudiés soit 1987, 1999 et le changement entre les deux dates.

Variable	1987		1999		Changement	
	β	ROC	β	ROC	β	ROC
Altitude	-0,003	0,553*	-3×10^{-3}	0,561*	-0,003	0,538***
Slope	+0,072	0,535*	-0,156	0,535**	+0,172	0,634
Soilpot		0,655		0,663		0,814
Soilpot1	+0,836		+0,905		+1,447	
Soilpot2	-0,744		-0,744		-1,794	
Soilpot3	-0,250		-0,250		-1,418	
Soilpot5	-0,317		-0,271		-1,525	
Soilpot6	+0,182		+0,362		+1,170	
Soilsorg		0,653		0,661		0,790
Soilsorg1	-1,189		-1,227		-0,059	
Soilsorg2	-0,326		-0,372		-13,618	
Soilsorg3	-0,094		-0,140		-0,452	
Soilsorg5	+1,065		+1,087		+2,072	
Soilsorg6	+0,157		+0,216		+0,991	
Rainfall	-0,014	0,684	-0,014	0,690	-0,021	0,787
Densite	+0,0014	0,771	+0,001	0,763	$+4,9 \times 10^{-4}$	0,587
Rurpot	$+3,8 \times 10^{-4}$	0,705	$+1,4 \times 10^{-4}$	0,705	$+2 \times 10^{-5}$	0,651***
Poppot	$+1,9 \times 10^{-4}$	0,823	$+2,7 \times 10^{-4}$	0,815	$+0,7 \times 10^{-5}$	0,845
Fulbé	+1,06	0,595	+1,142	0,603	+2,295	0,738
Guiziga	-1,462	0,600	-1,502	0,603	-2,014	0,659
Mofu	-0,782	0,553*	-0,793	0,552	-1,597	0,580*
Distriver	$-1,6 \times 10^{-4}$	0,699	$-1,8 \times 10^{-4}$	0,680	-0,001	0,810
Distroad	-0,01	0,775	-0,001	0,776	-0,001	0,676
Travelc	$-2,2 \times 10^{-4}$	0,762	$-2,2 \times 10^{-4}$	0,770	$-3,1 \times 10^{-4}$	0,870
Travelu	$-2,4 \times 10^{-4}$	0,737	$-2,4 \times 10^{-4}$	0,739	$-2,2 \times 10^{-4}$	0,740
Travelm	$-1,7 \times 10^{-4}$	0,710	$-1,8 \times 10^{-4}$	0,716	$-2,6 \times 10^{-4}$	0,783
Livestock	-0,083	0,701	-0,086	0,709	-0,115	0,873

Tableau 9.7 : Paramètres des régressions simples pour l'utilisation de l'espace « habitation ». Toutes les variables sont significatives avec un niveau $P < 0,01$ dans le cas contraire les symboles * pour $0,01 < P < 0,05$, ** pour $0,05 < P < 0,1$, * pour $0,1 < P < 0,9$.**

On peut remarquer dans le tableau 9.7 que les trois variables *altitude*, *slope* et *mofu* qui représentent respectivement le relief, et l'ethnicité affichent des corrélations non significatives ($P > 0.01$). Les variables d'ethnicité *fulbe* et *guiziga* quant à elles ne fournissent pas une explication suffisante ($ROC < 0,6$). Les variables *travelc*, *travelu*, *travelm* et *livestock* relatives aux centres urbains et aux marchés qui affichent par contre un pouvoir explicatif supérieur à 0,7 n'ont pas été sélectionnées parce qu'elles ne traduisent pas un processus connu en relation avec l'installation des zones d'habitation. La relation avec les centres urbains traduit tout simplement la concentration des habitations au niveau des pôles d'urbanisation. C'est également le cas pour les variables d'ethnicité (*fulbé*) et de pluviométrie (*rainfall*), qui sont fortement corrélées avec les changements mais pour lesquelles il est difficile d'associer un processus pertinent.

Les variables de population (*density*, *poppot*, *rurpot*) affichent les pouvoirs explicatifs les plus élevés ($ROC = 0,77$), ce qui exprime bien l'évidence empirique selon laquelle la population explique mieux l'importance et la distribution des zones d'habitation. De la même façon, les pouvoirs explicatifs des variables *distriver* et *distroad* traduiraient le fait que l'installation des zones d'habitation s'effectue prioritairement le long des routes et des cours d'eau. Les corrélations avec les variables de type de sol (*soilsorg* et *soilpot*) sont significatives, mais affichent des pouvoirs explicatifs pas assez élevés (resp. 0,655 et 0,653). Toutefois, les observations de terrain montrent que les terres argileuses qui sont des sols très aptes à la culture du sorgho de contre saison ne sont pas utilisées pour construire les habitations. La variable *soilsorg* a été sélectionnée et pourrait donc mieux expliquer la distribution spatiale des zones d'habitation que la variable *soilpot* qui affiche pourtant un pouvoir explicatif plus élevé.

Pour la situation de 1987, les 6 variables *soilsorg*, *distroad*, *distriver*, *density*, *poppot* et *rurpot* ont été insérées dans la régression conditionnelle. Les variables *density*, *distriver* et *rurpot* ont été éliminées à l'issue de cette procédure. Le modèle de régression final obtenu comprend les trois variables *poppot*, *distroad* et *soilsorg* qui expliquent mieux la distribution des zones d'habitation. On peut voir dans le tableau 9.8 qui résume les coefficients logistiques que la probabilité d'installation des zones d'habitation sera plus grande dans les zones où, la population est importante et de préférence à proximité des axes routiers. Le signe de coefficients des variables *soilsorg1* et *soilsorg2* confirme l'hypothèse et les observations faites sur les difficultés à construire sur des sols argileux. La capacité de discrimination du modèle de prédiction final obtenu est très bonne ($ROC = 0,886$). Comme le montre la figure 9.5, la superficie sous la courbe ROC est suffisamment importante. Cette superficie variant entre 0 et 1. Les valeurs proches de 1 comme dans ce cas indiquent que le test de discrimination est presque toujours vrai. Un modèle aléatoire donnerait une valeur proche de 0,5 et la courbe se rapprocherait de la diagonale.

Pour la situation de 1999, la même combinaison de variables a été insérée dans la régression conditionnelle. On obtient les mêmes variables explicatives mais la capacité de discrimination du modèle obtenu est légèrement plus élevée ($ROC = 0,887$). Le signe de tous les coefficients coïncident entre les deux dates et seules leurs valeurs sont différentes.

Pour le cas des changements entre 1987 et 1999, la même combinaison de variables a été insérée dans la régression conditionnelle. Les mêmes variables sont rejetées à l'exception de *distriver* et le modèle de prédiction des changements obtenu affiche une plus grande capacité de détection des changements ($ROC = 0,889$). Les coefficients des variables *poppot* et *soilsorg* qui sont conservées ne traduisent pas un processus pertinent par rapport au changement des zones d'habitation. Ils traduisent en réalité le fait que

les zones d'habitations qui ont changé appartiennent à des zones densément peuplées et de préférence sur les sols ayant un faible taux d'argile comme le montre les deux modèles précédents.

Toutefois, l'apparition de la variable *distriver* et la faiblesse relative du niveau de signification de la variable *distroad* ($0,01 < P < 0,05$) traduisent le fait que la probabilité de déplacement des zones d'habitation augmente avec la proximité des cours d'eau dont les débordements en saison de pluies exposent les populations à des risques. Cette dynamique a été observée le long du cours d'eau Mayo Tsanaga, à partir des images satellites et confirmée sur le terrain à l'échelle des terroirs. Dans le terroir de Mowo, par exemple, les populations qui se sont déplacées se sont réinstallées le long de la route. En effet les changements de l'utilisation « habitation » concernent de très faibles superficies qui rendent l'analyse difficile à l'échelle régionale. On observe des dynamiques plus marquées à l'échelle du terroir où des facteurs déterminants plus pertinents se révéleraient à cette échelle.

1987		1999		Changement	
Variables	β_i	Variables	β_i	Variables	β_i
β_0	- 3,603	β_0	- 3,57998	β_0	- 5,88411
Poppot87	+ 0,00018	Poppot99	+ 0,00013	Poppot99	+ 0,00004
Distroad	- 0,00119	Distroad	- 0,00119	Distroad	- 0,00040*
Soilsorg1	- 0,04794	Soilsorg1	- 0,78685	Distriver	- 0,00043
Soilsorg2	- 0,06710	Soilsorg2	- 0,02660	Soilsorg1	- 0,30626
Soilsorg3	+ 0,96528	Soilsorg3	+ 0,28827	Soilsorg2	- 13,4090
Soilsorg5	+ 0,54001	Soilsorg5	+ 0,40248	Soilsorg3	- 0,67566
Soilsorg6	- 0,01984	Soilsorg6	- 0,17577	Soilsorg5	+ 0,96856
				Soilsorg6	+ 0,50159
ROC = 0,886		ROC = 0,887		ROC = 0,889	

Tableau 9.8 : Paramètres des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « zone d'habitation ». Toutes les variables sont significatives avec un niveau $P < 0,01$ dans le cas contraire les symboles * pour $0,01 < P < 0,05$, ** pour $0,05 < P < 0,1$, * pour $0,1 < P < 0,9$.**

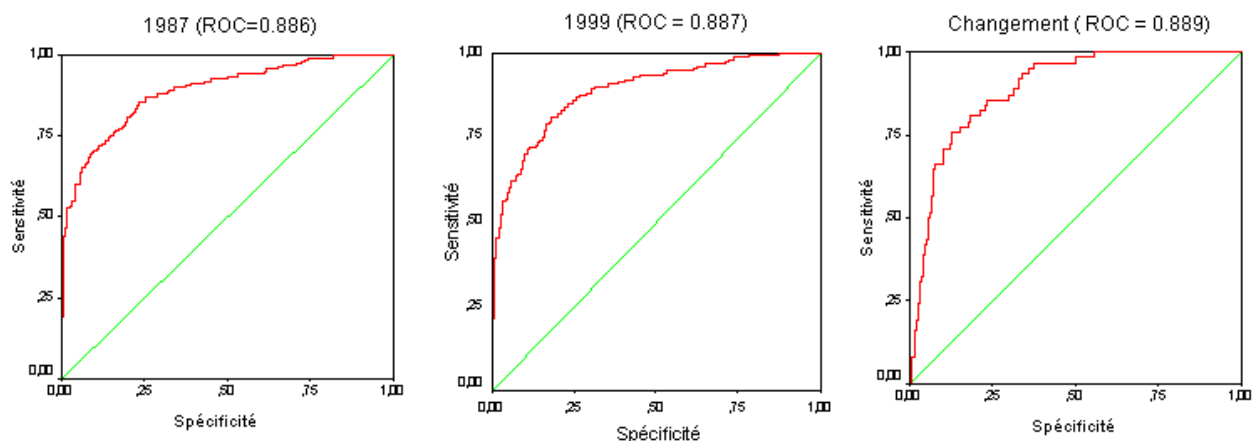


Figure 9.5 : Courbes ROC des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « habitation ».

9.4.2. Les zones de vergers ou cultures maraîchères

Le tableau 9.9 présente les résultats des régressions simples, qui sont utilisés pour la construction du modèle de prédiction de la distribution spatiale de l'utilisation de l'espace « maraîcher/verger ».

Variable	1987		1999		Changement	
	β	ROC	β	ROC	β	ROC
Altitude	-0,012	0,665	-0,008	0,604	-0,005	0,556
Slope	-0,117	0,561*	-0,156	0,550*	-0,465	0,588
Soilpot		0,748		0,749		0,724
Soilpot1	+3,623		+3,703		+16,827	
Soilpot2	+1,563		+1,927		+15,360	
Soilpot3	+0,627		+0,627		+14,195	
Soilpot4	+1,617		+1,809		+15,576	
Soilpot5	+1,745		+1,049		+13,946	
Soilsorg		0,770		0,766		0,702
Soilsorg1	-1,852		-1,005		-0,092	
Soilsorg2	+0,493		+0,554		+0,002	
Soilsorg3	+0,629		-0,033		-0,275	
Soilsorg4	+2,226		+2,053		+1,457	
Soilsorg5	-0,251		-0,727		-1,048	
Rainfall	-0,012	0,665	-0,007	0,598	-0,001	0,517***
Density	+4,6x10 ⁻⁴	0,694	+4,7x10 ⁻⁴	0,725	+2,6x10 ⁻⁴	0,687*
Rurpot	+3,4x10 ⁻⁴	0,716	+0,6x10 ⁻⁴	0,735	+2x10 ⁻⁴	0,691
Poppot	+0,9x10 ⁻⁴	0,751	+2,3x10 ⁻⁴	0,780	+0,7x10 ⁻⁴	0,752
Fulbé	+1,658	0,691	+1,386	0,656	+0,220	0,528***
Guiziga	-1,507	0,570	-0,764	0,521*	+0,195	0,559***
Mofu	-0,760	0,507*	-0,361	0,482***	-0,074	0,466***
Distriver	-15,3x10 ⁻⁴	0,912	-0,001	0,892	-9,35x10 ⁻⁴	0,861
Distroad	-0,001	0,690	-0,001	0,665	-2,9x10 ⁻⁴	0,580
Travelc	-1,64x10 ⁻⁴	0,727	-1,5x10 ⁻⁴	0,723	-0,9x10 ⁻⁴	0,652
Travelu	-1,44x10 ⁻⁴	0,667	-1,4x10 ⁻⁴	0,667	-0,8x10 ⁻⁴	0,590
Travelm	-1,2x10 ⁻⁴	0,667	-1,5x10 ⁻⁴	0,700	-1,3x10 ⁻⁴	0,669
Livestock	-3,1x10 ⁻⁴	0,486***	+0,006	0,542***	+0,012	0,552*

Tableau 9.9 : Paramètres des régressions simples pour l'utilisation de l'espace « Maraîcher/verger ». Toutes les variables sont significatives avec un niveau $P < 0,01$ dans le cas contraire les symboles * pour $0,01 < P < 0,05$, ** pour $0,05 < P < 0,1$, *** pour $0,1 < P < 0,9$.

Le tableau 9.9 affiche quatre variables avec des corrélations non significatives. Il s'agit des variables *livestock*, *slope*, *guiziga* et *mofu*. Les variables de relief (*altitude*), de pluviométrie (*rainfall*), d'ethnicité (*fulbé*) et la variable *distroad* ont un pouvoir explicatif relativement élevé ($0,65 < \text{ROC} < 0,7$), mais ne sont pas sélectionnées du fait qu'elles ne traduisent ni un processus connu, ni une hypothèse pertinente à tester. La corrélation assez élevée avec la variable d'ethnicité (*fulbé*) s'explique par le fait que l'aire de distribution des populations Foulbé (plaine du Diamaré) coïncide avec les zones de cultures maraîchères/vergers.

Les variables suivantes affichent les meilleurs pouvoirs explicatifs ($\text{ROC} > 0,7$) : *distriver*, *soilpot*, *soilsorg*, *density*, *rurpot*, *poppot*, *travelc*. De plus chacune des corrélations avec ces variables traduit un processus pertinent ou une hypothèse à tester. Elles ont par conséquent été sélectionnées pour la régression conditionnelle. La sélection des variables *distriver*, *soilpot*, et *soilsorg* se justifie par les connaissances disponibles sur cette utilisation de l'espace dans la région. On a vu au chapitre 5 que la distribution spatiale des cultures maraîchères/vergers est d'abord déterminée par les conditions du milieu notamment le type de sol et la proximité des cours d'eau. Les observations sur les images satellites et les visites de terrain montrent que la culture se pratique principalement le long des cours d'eau ou sur les alluvions des lits majeurs des cours d'eau où la nappe phréatique est peu profonde et donc facilement accessible. C'est le cas par exemple dans la plaine du Diamaré où les maraîchers sont concentrés le long des cours d'eau mayo Tsanaga et mayo Boula et dans la plaine de Koza à Mora, le long des cours d'eau temporaires mayo Ngassawé et mayo Moskota. La sélection des variables de population *density*, *poppot* et *rurpot* vise à tester l'influence de la croissance démographique sur l'expansion de la culture. Les résultats pourraient fournir des bases pour apprécier et discuter la prévalence des théories de Boserup ou de Malthus (chapitre 2). Par contre, les variables *travelu*, et *travelm* affichent un pouvoir explicatif relativement faible (0,6 et 0,7). Toutefois, elles ont été sélectionnées pour tester l'hypothèse selon laquelle le développement récent de l'agriculture maraîchère est favorisé par la proximité des petits centres urbains qui constituent un marché potentiel et une source d'investissement dans la production.

Pour la situation de 1987, les 9 variables suivantes ont été insérées dans la procédure de régression conditionnelle pas à pas : *distriver*, *travelc*, *travelu*, *travelm*, *density*, *poppot*, *rurpot*, *soilsorg* et *soilpot*. Les variables *soilpot* et *density* ont été exclues de l'équation du modèle final. Ceci nous amènerait à conclure que la densité de la population n'explique pas la distribution spatiale des maraîchers/vergers et que la variable *soilsorg* apparaît plus explicative que *soilpot*. On peut voir dans le tableau 9.10 que les coefficients des variables *distriver*, *travelc* et *travelu* confirment l'évidence selon laquelle les zones de cultures maraîchères se développent de préférence à proximité des cours d'eau et principalement autour des centres urbains qui assurent l'investissement nécessaire. Toutefois, il est a priori difficile d'expliquer raisonnablement la relation avec la variable *travelm*. L'explication c'est que les marchés considérés dans la définition de cette variable ne concernent pas principalement les produits maraîchers et fruitiers, mais plutôt les marchés de bétail et de sorgho de contre saison. Les produits maraîchers et fruitiers sont principalement orientés vers les marchés des centres urbains. La capacité de discrimination du modèle obtenu est la meilleure de toutes les utilisations de l'espace ($\text{ROC} = 0,939$). On peut voir sur la figure 9.6 que la courbe ROC se rapproche de la situation idéale où $\text{ROC}=1$.

Pour la situation de 1999, la même combinaison de variables que celle de 1987 a été insérée dans la procédure de régression conditionnelle. Malgré l'importance de la variable *density* dans la régression

simple (ROC = 0,725), celle-ci a été exclue de l'équation du modèle final. Les variables *soilpot* et *travelu* ont été également exclues. Les coefficients logistiques du modèle obtenu gardent les mêmes signes que pour la situation de 1987. La capacité de discrimination du modèle est légèrement plus faible mais reste très élevée soit ROC = 0,915.

Pour la carte des changements entre 1987 et 1999, la même combinaison de variables a été sélectionnée. En plus de la variable *density*, les variables *soilpot* et *poppot* ont été exclues de l'équation du modèle. La capacité de détection des changements de cette utilisation de l'espace par le modèle obtenu est évaluée à 0,888. On remarque à partir des coefficients du modèle obtenu que les variables *distriver*, *travelc* expliquerait la distribution des changements de l'utilisation de l'espace « maraîcher/verger ». Le signe du coefficient de la variable *travelu* est par contre difficile à associer avec une relation pertinente traduisant les changements observés. Comme dans le cas des zones d'habitation, ces relations traduisent plutôt la localisation de cette utilisation de l'espace qui a été mis en évidence dans les deux modèles statiques précédents. En effet, les changements observés pour l'utilisation de l'espace « maraîcher/verger » sont également de très faibles superficies et donc difficiles à expliquer à l'échelle régionale. On a vu au chapitre 8 que ces espaces sont convertis principalement pour les cultures pluviales ou le sorgho repiqué. Les observations de terrain ont montré que ce type de changement s'effectue en général sur les alluvions du lit majeur des cours d'eau où les sols peuvent se prêter à plusieurs types de culture. Le type de conversion d'une année à l'autre dépend de la pluviométrie et des stratégies paysannes pour le maintien de la sécurité alimentaire.

1987		1999		Changement	
Variables	β_i	Variables	β_i	Variables	β_i
Bo	-0,86642	Bo	-1,39035	Bo	-3,51716
Distriver	-0,00150	Distriver	-0,00108	Distriver	-0,00083
Travelc	-0,00033	Travelc	-0,00023	Travelc	-0,00009
Travelu	-0,00017	Travelm	0,00012	Travelu	+0,00027
Travelm	+0,00034	Rurpop99	0,00034	Travelm	-0,00019
Rurpop87	+0,00053	Poppot99	-0,00004	Rurpop99	+0,00022
Poppot87	-0,00006	Soilsorg1	-1,44444	Soilsorg1	-0,61235
Soilsorg1	-2,19931	Soilsorg2	+0,83701	Soilsorg2	-0,06472
Soilsorg2	0,94809	Soilsorg3	-0,80407	Soilsorg3	-0,54877
Soilsorg3	-0,69117	Soilsorg5	0,29364	Soilsorg5	-0,15109
Soilsorg5	+0,32527	Soilsorg6	-1,78467	Soilsorg6	-1,56808
Soilsorg6	-1,75173				
ROC = 0,939		ROC = 0,915		ROC = 0,888	

Tableau 9.10 : Paramètres des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « maraîcher/verger ». Toutes les variables sont significatives avec un niveau $P < 0,01$ dans le cas contraire les symboles * pour $0,01 < P < 0,05$, ** pour $0,05 < P < 0,1$, *** pour $0,1 < P < 0,9$.

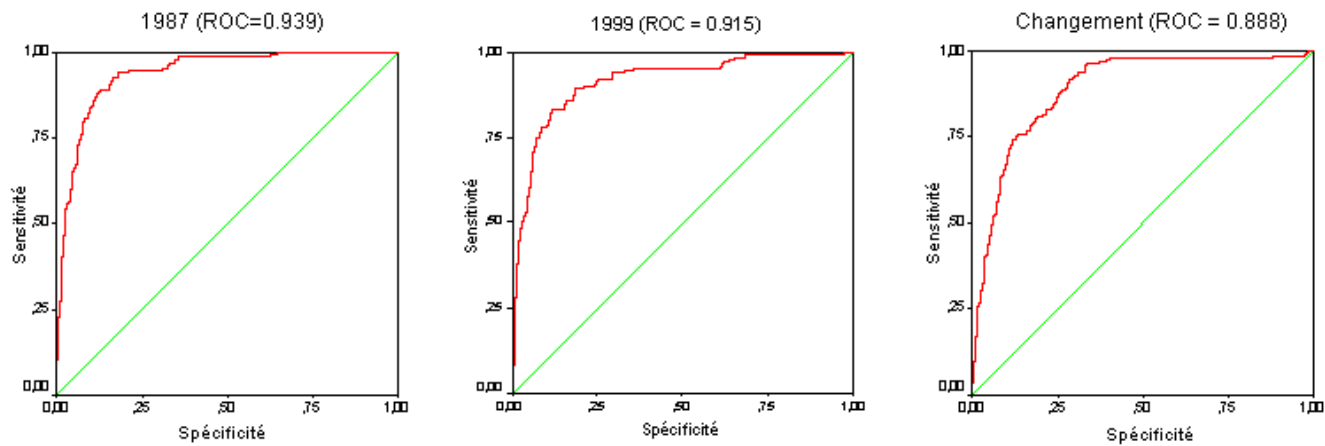


Figure 9.6 : Courbes ROC des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « Maraîcher/verger ».

9.4.3. Les zones de culture pluviale

Le tableau 9.11 résume les résultats des régressions simples qui sont utilisés pour la construction du modèle de distribution des zones de culture pluviale.

Variable	1987		1999		Changement	
	β	ROC	β	ROC	β	ROC
Altitude	+0,002	0,537	+0,004	0,596	+0,002	0,593
Slope	+0,106	0,565	+0,137	0,605	+0,02736	0,572
Soilpot		0,654		0,661		0,621
Soilpot1	+0,674		+0,447		-0,078	
Soilpot2	- 0,890		-1,152		-0,701	
Soilpot3	- 0,532		-0,178		+0,473	
Soilpot4	+ 0,130		+0,218		+0,427	
Soilpot5	+ 0,372		+0,371		-0,024	
Soilsorg		0,660		0,671		0,630
Soilsorg1	- 0,538		-0,360		-1,832	
Soilsorg2	- 0,729		-1,846		-0,997	
Soilsorg3	+ 0,175		-1,448		-0,683	
Soilsorg4	+ 0,920		-0,857		-0,582	
Soilsorg5	+ 0,612		+0,050		-0,369	
Rainfall	- 2,9x10 ⁻³	0,547	+2x10 ⁻³	0,524	+0,00721	0,601
Densite	+ 2,2x10 ⁻⁴	0,635	+7x10 ⁻⁵	0,609***	-2,6x10 ⁻⁴	0,483
Rurpot	+ 3,7x10 ⁻⁴	0,674	+1,5x10 ⁻⁵	0,644	+0,8x10 ⁻⁴	0,528
Poppot	+ 4,9x10 ⁻⁵	0,675	+2,19x10 ⁻⁴	0,632	-0,23x10 ⁻⁴	0,482
Fulbé	- 0,216	0,509	-0,807	0,564	-1,039	0,587
Guiziga	- 0,478	0,530	-0,299	0,526	+0,065	0,492*
Mofu	+ 0,943	0,605	+1,333	0,626	+0,774	0,561
Distriver	- 1,25x10 ⁻⁴	0,622	-5x10 ⁻⁵	0,564	+0,6x10 ⁻⁴	0,553
Distroad	- 3,9x10 ⁻⁴	0,627	-3x10 ⁻³	0,611	-0,4x10 ⁻⁴	0,521
Travelc	- 8x10 ⁻⁵	0,626	-5x10 ⁻⁵	0,569	+0,2x10 ⁻⁴	0,550
Travelu	-9,9x10 ⁻⁵	0,623	-9x10 ⁻⁵	0,616	-0,3x10 ⁻⁴	0,530
Travelm	-7x10 ⁻⁵	0,601	-5x10 ⁻⁵	0,572	-3,7x10 ⁻⁶	0,493**
Livestock	5,4x10 ⁻³	0,512	-0,001	0,522***	-0,005	0,539

Tableau 9.11 : Paramètres des régressions simples pour l'utilisation « Culture pluviale ». Toutes les variables sont significatives avec un niveau $P < 0,01$ dans le cas contraire les symboles * pour $0,01 < P < 0,05$, ** pour $0,05 < P < 0,1$, * pour $0,1 < P < 0,9$.**

Dans l'ensemble, on trouve qu'aucun facteur n'explique clairement la distribution spatiale des zones de culture pluviale. On peut remarquer dans le tableau 9.11 que deux variables notamment *livestock* et *density* affichent des corrélations non significatives et ne peuvent par conséquent être sélectionnées pour la régression conditionnelle. Il en est de même pour la plupart des variables comme celles du relief (*altitude*, *slope*), de la pluviométrie (*rainfall*), et d'ethnicité (*fulbé*, *Guiziga*) qui affichent un pouvoir explicatif inférieur à 0,6. La variable d'ethnicité (*mofu*) et Les variables géoéconomiques (*distriver*, *distroad*, *travelc*, *travelu* et *travelm*) affichent une corrélation significative et un pouvoir explicatif assez grand ($0,6 < ROC < 0,7$) mais n'ont pas pu être associées à un processus pertinent ou connu. La corrélation avec la variable *mofu* correspond au fait que l'aire de distribution de l'ethnie Mofu est localisée en zone des piémonts qui est une zone où le système agraire est dominé par les cultures pluviales.

Par contre, les variables *soilsorg*, *soilpot*, *poppot* et *rurpop* qui affichent des corrélations significatives avec des pouvoirs explicatifs compris entre 0,6 et 0,7 ont été sélectionnées pour la procédure de régression conditionnelle. Comme pour les autres formes d'utilisation de l'espace, la densité (*density*) de population n'apparaît pas comme un facteur explicatif pertinent de la distribution spatiale des zones de cultures pluviales. L'indice de pression de la population qui est représentée par les variables *poppot* et *rurpot* explique mieux la distribution des zones cultivées en culture pluviale.

Pour la situation de 1987, seules les variables de type de sol et de population ont été insérées dans la procédure de régression conditionnelle au vu des observations précédentes. A l'issue de cette procédure, les variables *poppot* et *density* sont exclues de l'équation du modèle final qui affiche une capacité de discrimination égale à 0,693. La variable *soilsorg* affiche un niveau de signification plus grand que *soilpot* mais, en suivant une approche déductive, on privilégie la variable *soilpot* qui devrait mieux expliquer la distribution des zones de culture pluviale et on obtient un modèle de régression final avec une capacité de discrimination de 0,695. Le modèle où la variable *soilsorg* est incluse affiche une performance de 0,694. Les coefficients logistiques du modèle obtenu traduisent bien les hypothèses formulées. En effet, la probabilité pour que l'utilisation de l'espace soit de type « culture pluviale » est élevée dans les zones où la pression humaine est forte. Compte tenu de la représentation spatiale de l'indice de pression humaine et considérant l'hypothèse d'une organisation de l'utilisation de l'espace en auréoles concentriques autour des zones d'habitations (chapitre 7), les zones de culture pluviale constituent donc effectivement la première auréole autour des zones d'habitation où les valeurs de l'indice sont élevées. Cette tendance d'organisation de l'utilisation de l'espace a été observée par la cartographie de l'occupation du sol à l'échelle des terroirs et de la petite région autour de Maroua (chapitres 7 et 8).

Pour la situation de 1999, le même ensemble de variables a été sélectionné pour la régression conditionnelle et les résultats obtenus sont similaires. Le modèle de régression obtenu affiche une capacité de discrimination évaluée à 0,695. Comme le montre le tableau 9.12, le signes des coefficients logistiques coïncident avec ceux de la situation de 1987 et seule les valeurs sont différentes.

Pour la carte des changements entre 1987 et 1999, les variables de population affichent un pouvoir explicatif très bas. Seules les variables de sol (*soilsorg* et *soilpot*) et de pluviométrie (*rainfall*) ayant un pouvoir explicatif supérieur à 0,6 ont été sélectionnées pour la régression conditionnelle. Elles ont été toutes maintenues et le modèle obtenu à une capacité de détection des changements évaluée à 0,666. En maintenant uniquement les variables *soilpot* et *rainfall*, le modèle final obtenu a une capacité de

discrimination de 0,665. Les changements observés pour l'utilisation de l'espace culture pluviale sont les plus importants mais de nature assez diverse, ce qui rend difficile l'explication. Les principaux changements de cette classe s'effectuent pour les classes « sorgho de contre saison » et « sol nu ». Les autres changements concernent la conversion en « zones brousse » (jachères) et en cultures maraichères/vergers. Une très faible proportion est convertie en zone d'habitation. Le modèle obtenu prédit que la probabilité de changement de cette utilisation est d'autant plus grande que la pluviométrie est élevée. Nous n'avons pas pu trouver une explication raisonnable à cette corrélation d'autant plus que cette pluviométrie est une moyenne sur plusieurs années. L'analyse de cette relation aurait été plus pertinente à l'échelle inter annuelle et du terroir, où le paysan prend en compte les données pluviométriques pour décider de l'allocation des terres.

Dans l'ensemble, on constate comme le montre la figure 9.7 que les performances des modèles de prédiction obtenus pour les zones de culture pluviale restent assez faibles dans les trois cas ($0,66 < ROC < 0,7$). On peut voir que la courbe ROC est plus proche de la diagonale, qui correspond à un modèle aléatoire. La difficulté à expliquer la distribution des zones de culture pluviales proviendrait en grande partie de sa nature. En effet cette classe d'utilisation de l'espace ne correspond pas exactement aux zones cultivées en culture pluviale. Elle inclut également les jeunes jachères constituées de savanes arbustives qui se confondent aux zones cultivées qui au moment de l'acquisition des images ne sont pas mises en culture. Les erreurs d'excédent qui traduisent ce mélange de classes ont été estimées à 42%. Ces erreurs pourraient donc introduire une composante aléatoire dans les modèles construits.

1987		1999		Changement	
Variables	β_i	Variables	β_i	Variables	β_i
β_0	-1,21378	β_0	-0,53016	β_0	-8.617
Rurpot87	+0,00020	Rurpot99	+0,00014	rainfall	+0.008
Soilpot1	+0,53400	Soilpot1	+0,32335	Soilpot1	-0.198
Soilpot2	-0,85165	Soilpot2	-1,14917	Soilpot2	-0.897
Soilpot3	-0,43085	Soilpot3	-0,14564	Soilpot3	+0.424
Soilpot5	-0,00561	Soilpot5	+0,12014	Soilpot5	+0.231
Soilpot6	+0,03860	Soilpot6	+0,15240	Soilpot6	-0.285
ROC = 0,695		ROC = 0,695		ROC = 0,665	

Tableau 9.12 : Paramètres des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « Culture pluviale ». Toutes les variables sont significatives avec un niveau $P < 0,01$ dans le cas contraire les symboles * pour $0,01 < P < 0,05$, ** pour $0,05 < P < 0,1$, *** pour $0,1 < P < 0,9$.

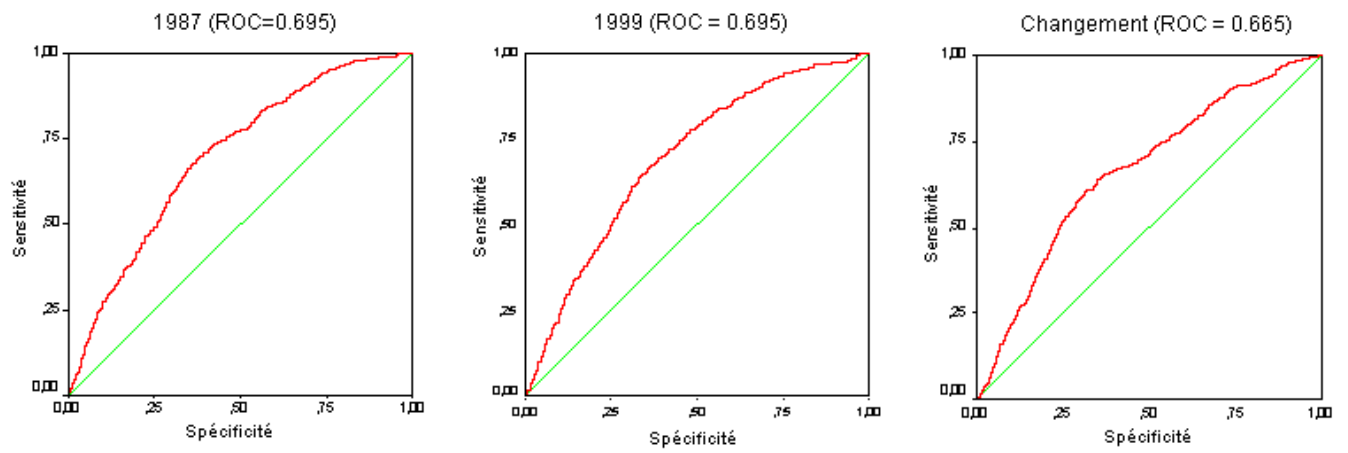


Figure 9.7 : Courbes ROC des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « culture pluviale ».

9.4.4. Les zones de sol nu

Le tableau 9.13 donne résultats de toutes les régressions simples qui sont utilisés pour la construction du modèle de distribution des zones de sol nu.

	1987		1999		Changement	
	β	ROC	β	ROC	β	ROC
Altitude	-5,1 x10 ⁻⁴	0,480**	-0,003	0,556	-0,005	0,628
Slope	-0,021	0,453**	-0,041	0,467*	-0,12755	0,546
Soilpot		0,628		0,669		0,651
Soilpot1	-0,189		-0,475		+0,553	
Soilpot2	+0,009		-0,728		-0,649	
Soilpot3	+0,406		0,283		+0,499	
Soilpot4	1,017		0,653		+0,715	
Soilpot5	-0,109		-1,051		-0,758	
Soilsorg		0,608		0,662		0,704
Soilsorg1	-1,024		-1,319		-0,549	
Soilsorg2	-0,758		-1,250		-1,352	
Soilsorg3	-,010		0,521		1,402	
Soilsorg4	-1,017		-1,001		+0,189	
Soilsorg5	-0,543		-0,927		-0,889	
Rainfall	+15x10 ⁻⁴	0,520*	-0,002	0,530	-0,004	0,571
Densite	-3,1x10 ⁻⁴	0,522*	-0,001	0,547*	-0,002	0,505
Rurpot	-1,02x10 ⁻⁴	0,527	-1x10 ⁻⁴	0,535	-1 x10 ⁻⁴	0,507
Poppot	-0,65x10 ⁻⁴	0,532	-0,98x10 ⁻⁴	0,550	-1,70 x10 ⁻⁴	0,519
Fulbé	-0,063	0,502***	0,542	0,549	+1,059	0,603
Guiziga	-0,142	0,518*	-0,288	0,534*	-0,769	0,576
Mofu	+0,279	0,518	-0,185	0,529*	-0,240	0,531*
Distriver	-0,17x10 ⁻⁴	0,500*	-0,2x10 ⁻⁴	0,509***	+0,22x10 ⁻⁴	0,502*
Distroad	+1,3x10 ⁻⁴	0,547	+0,18 x10 ⁻⁴	0,515***	-3,86x10 ⁻⁴	0,614
Travelc	+0,2x10 ⁻⁴	0,526	+0,1x10 ⁻⁴	0,523*	-0,3x10 ⁻⁴	0,550
Travelu	+0,1x10 ⁻⁴	0,510*	+0,1x10 ⁻⁴	0,512***	-2,2x10 ⁻⁶	0,481***
Travelm	+0,2x10 ⁻⁴	0,542	+0,3x10 ⁻⁴	0,550	-0,26x10 ⁻⁴	0,520
Livestock	-0,001	0,515***	-0,001	0,512***	0,005	0,534*

Tableau 9.13 : Paramètres des régressions simples pour l'utilisation « sol nu ». Toutes les variables sont significatives avec un niveau $P < 0,01$ dans le cas contraire les symboles * pour $0,01 < P < 0,05$, ** pour $0,05 < P < 0,1$, * pour $0,1 < P < 0,9$.**

Le tableau 9.13 montre que presque toutes les corrélations des variables avec l'utilisation de l'espace « sol nu » ne sont pas significatives. C'est le cas des variables de relief (*altitude*, *slope*), de pluviométrie (*rainfall*) et des variables géoéconomiques (*distriver*, *distroad*, *travelc*, *travelu*, *travelm* et *livestock*). On aurait espéré avoir une corrélation importante entre les pentes et la distribution des sols nus. Cette tendance a d'ailleurs été observée sur les images satellites de cette région mais principalement dans la zone des piémonts. Toutefois, il apparaît que les pentes sont assez faibles sur l'ensemble de la zone qui est une région de plaine. Les variables ethniques (*fulbe*, *guiziga* et *mofu*) et de population (*density*, *rurpot* et *poppot*) affichent également des corrélations très faiblement significatives et des pouvoirs explicatifs assez bas (valeur ROC < 0,6).

Seules les variables de type de sol (*soilsorg* et *soilpot*) ont un pouvoir explicatif supérieur à 0,6 et ont été sélectionnées pour la régression conditionnelle pas à pas. En suivant une approche purement inductive, on aurait un modèle de régression final avec une seule variable *soilpot* dont les performances sont celles du tableau 9.14 (ROC = 0,651). En formulant l'hypothèse que la pression humaine peut expliquer le processus de défrichement des savanes boisées et par conséquent la dénudation des sols, les variables *rurpot* et *poppot* ont été également sélectionnées pour la régression conditionnelle.

Pour la carte de 1987, ces quatre variables sont insérées dans la procédure de régression conditionnelle. La variable *rurpot* et *soilsorg* ont été exclues de l'équation du modèle à l'issue de cette procédure. Le modèle de régression final obtenu affiche un pouvoir explicatif évalué à 0,640. Pour la carte de 1999, la même combinaison de variables est insérée dans la procédure de régression conditionnelle. Les quatre variables sont maintenues dans l'équation du modèle obtenu qui affiche une capacité de discrimination égale à 0,697. La corrélation avec la variable *rurpot* n'est pas significative bien que celle-ci soit maintenue dans l'équation. Ainsi, en maintenant uniquement les variables *soilpot* et *poppot*, on obtient un modèle final dont la capacité de discrimination est estimée à 0,687. Contrairement aux attentes, le signe du coefficient de la variable *poppot* indique que la probabilité que l'utilisation de l'espace soit «sol nu » est faible dans les zones où la pression humaine est forte. La cartographie et les observations de terrain sur cette région autour de Maroua, confirment cette tendance dans la mesure où les zones avoisinant les zones d'habitation sont le plus souvent suffisamment arborées. D'autre part, les parcs arborés entretenus par les populations sont visibles dans le paysage au centre de la plaine du Diamaré. Cet exemple traduit les signes d'intensification observés sur certains sites.

Pour la situation des changements entre 1987 et 1999, seules les variables *altitude* et les variables de type de sol (*soilsorg* et *soilpot*) affichent un pouvoir explicatif supérieur à 0,6. La relation avec la variable *altitude* ne traduisant pas un processus pertinent, celle-ci n'a pas été sélectionnée. Une approche strictement inductive conduirait à un modèle avec la seule variable *soilsorg* qui affichent un pouvoir explicatif de 0,704. Les changements observés pour l'utilisation de l'espace « sol nu » sont relativement importants et correspondent principalement à des récupérations de sols dégradées pour les cultures pluviales ou les cultures de sorgho de contre saison. Dans certains cas, ce sont des reboisements. Chacune de ces conversions de l'utilisation de l'espace nécessite des investissements financiers, en terme de travail, ou en terme de technique de préparation de la terre. Les variables *distroad* et *travelc* qui traduisent l'accessibilité et dans une moindre mesure la facilité à y investir ont été introduites dans la régression conditionnelle avec les variables de type de sol (*soilsorg* et *soilpot*). La variable *travelc* est exclue de l'équation du modèle à l'issue de la régression conditionnelle et le modèle obtenu à une capacité de

détection estimée à 0,722. En gardant uniquement les variables *soilsorg*, *distroad* et *travelc* on obtient un modèle final dont la capacité de détection des changements est estimée à 0,718. Une interprétation plausible du modèle obtenu c'est que le processus de récupération des terres dégradées pour l'agriculture s'effectue plus probablement dans des zones éloignées du centre urbain et qui sont accessibles (proche des routes) et donc moins contraignants pour y investir.

Parmi toutes les utilisations de l'espace, le modèle de distribution des sols nus est celui qui a la plus faible capacité de discrimination. Contrairement au cas des zones de culture pluviale dont la cartographie affiche des erreurs d'excédents importants (48%), la cartographie des sols nus affiche des erreurs d'excédents relativement moins importants (35%). La difficulté de prédiction est certes liée aux erreurs de cartographie mais une importante partie est liée à l'absence d'une variable explicative pertinente parmi les variables spatiales utilisées. A titre d'exemple, les vérités de terrain ont montré que la plupart des sols nus sont des terres dégradées et marginales. Une explication pertinente de la distribution des changements de cette forme d'occupation du sol serait liée aux pratiques culturales (extensives ou intensives). La diversité des types des conversions et des causes possibles explique d'une part la difficulté à expliquer les changements de cette forme d'occupation du sol.

1987		1999		Changement	
Variables	β_i	Variables	β_i	Variables	β_i
β_0	-2,03861	β_0	-2,15784	β_0	-3,32732
Poppot87	-0,00006	Poppot99	-0,00010	distroad	-0,00035
Soilpot 1	-0,11986	Soilpot 1	-0,34942	travelc	+4,4 x 10 ⁻⁶
Soilpot 2	-0,00247	Soilpot 2	-0,74480	Soilsorg 1	-0,47572
Soilpot 3	+0,37225	Soilpot 3	+0,22891	Soilsorg 2	-1,25301
Soilpot 5	+1,02784	Soilpot 5	+0,68880	Soilsorg 3	+1,43771
Soilpot 6	-0,02609	Soilpot 6	-0,88916	Soilsorg 5	+0,08908
				Soilsorg 6	-0,85209
ROC = 0,640		ROC = 0,687		ROC = 0,718	

Tableau 9.14 : Paramètres des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « sol nu ». Toutes les variables sont significatives avec un niveau $P < 0,01$ dans le cas contraire les symboles * pour $0,01 < P < 0,05$, ** pour $0,05 < P < 0,1$, * pour $0,1 < P < 0,9$.**

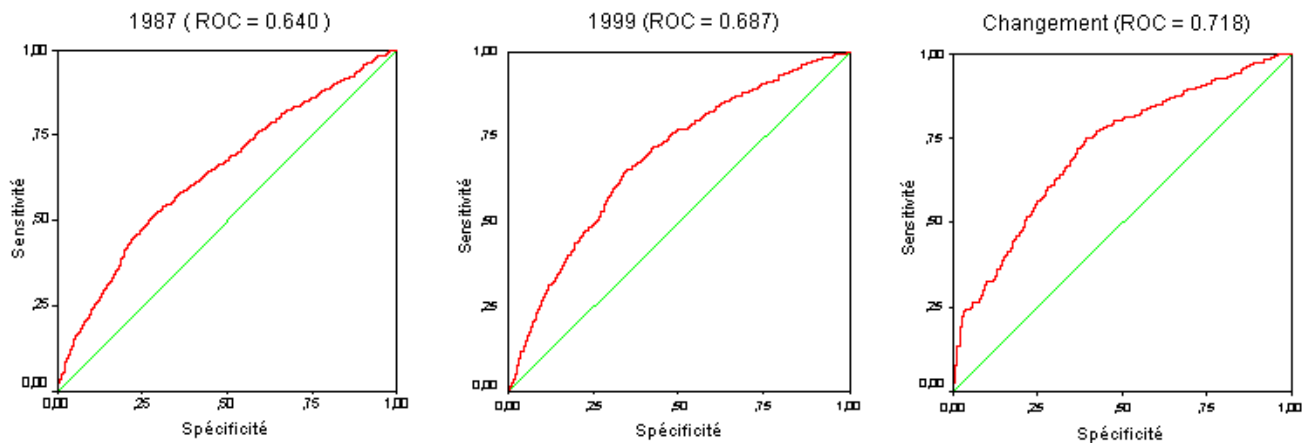


Figure 9.8 : Courbes ROC des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « sol nu ».

9.4.5. Les zones de culture du sorgho de contre saison

Le tableau 9.15 donne les résultats de toutes les régressions simples, qui sont utilisés pour construire le modèle de prédiction de l'utilisation de l'espace « sorgho repiqué ».

	1987		1999		Changement	
	β	ROC	β	ROC	β	ROC
Altitude	-53,9x10 ⁻⁴	0,561	-0,009	0,622	-70,4 x10 ⁻⁴	0,596
Slope	-0,464	0,646	-0,751	0,686	-0,609	0,642
Soilpot		0,713		0,749		0,701
Soilpot1	+0,546		+0,888		+0,535	
Soilpot2	+1,362		+2,148		+1,744	
Soilpot3	+0,166		+0,962		+1,161	
Soilpot4	-0,327		+0,192		+0,329	
Soilpot5	-1,861		-1,553		-1,366	
Soilsorg		0,735		0,777		0,715
Soilsorg1	+1,690		+2,325		1,179	
Soilsorg2	+0,861		+0,988		+0,794	
Soilsorg3	-1,303		-0,650		-0,182	
Soilsorg4	+0,344		+0,151		-0,263	
Soilsorg5	-1,487		-2,037		-2,063	
Rainfall	+0,9x10 ⁻⁴	0,506***	-0,003	0,537	-5,8x10 ⁻⁴	0,509*
Densite	-7,1x10 ⁻⁴	0,538	-4,8x10 ⁻⁴	0,542	-3,8x10 ⁻⁴	0,560
Rurpot	-3,1x10 ⁻⁴	0,564	-1,9 x10 ⁻⁴	0,558	-2,3x10 ⁻⁴	0,573
Poppot	-0,7x10 ⁻⁴	0,553	-0,3 x10 ⁻⁴	0,541	-0,2x10 ⁻⁴	0,560
Fulbé	+0,376	0,547	+0,620	0,571	+0,323	0,537
Guiziga	+0,435	0,558	+0,279	0,543	+0,408	0,551
Mofu	-1,016	0,555	-1,387	0,585	-1,379	0,588
Distriver	-0,2x10 ⁻⁴	0,501*	-0,2x10 ⁻⁴	0,496*	+0,3x10 ⁻⁴	0,545
Distroad	+0,7x10 ⁻⁴	0,530	+0,87x10 ⁻⁴	0,543	+1,2x10 ⁻⁴	0,558
Travelc	-0,2x10 ⁻⁴	0,539	-0,2x10 ⁻⁴	0,539	+0,1x10 ⁻⁴	0,523
Travelu	+0,2x10 ⁻⁴	0,527	+0,3x10 ⁻⁴	0,545	-2,57827	0,585
Travelm	-0,5x10 ⁻⁴	0,576	-0,3x10 ⁻⁴	0,547	+0,08x10 ⁻⁴	0,525
Livestock	+0,028	0,643	+0,027	0,632	+0,008	0,545

Tableau 9.15 : Paramètres des régressions simples pour l'utilisation de l'espace « sorgho de contre saison ». Toutes les variables sont significatives avec un niveau $P < 0,01$ dans le cas contraire les symboles * pour $0,01 < P < 0,05$, ** pour $0,05 < P < 0,1$, * pour $0,1 < P < 0,9$.**

On remarque dans le tableau 9.15 que 2 variables affichent des corrélations non significatives. Il s'agit de *rainfall* et *distriver* qui n'ont donc pas été sélectionnées pour la régression conditionnelle. Les variables de population (*density*, *rurpot* et *poppot*), d'ethnicité (*fulbé*, *guiziga*, *mofu*) et les variables géoéconomiques (*distroad*, *travelc*, *travelu*, *travelm*) affichent une corrélation significative mais leurs pouvoirs explicatifs sont très bas ($ROC < 0,6$).

Comme nous l'avons montré au chapitre 7, les variables de type de sol (*soilpot* et *soilsorg*) sont celles qui expliquent le mieux la distribution des zones de sorgho de contre saison ($ROC > 0,7$). La variable *livestock* affiche un pouvoir explicatif relativement plus bas ($0,6 < ROC < 0,7$). Toutefois, une hypothèse a été formulée au chapitre 7 sur la tendance d'intégration entre la culture du sorgho de contre saison et le développement de l'élevage. Cette variable a donc été sélectionnée pour la procédure de régression conditionnelle. Contrairement à la variable *altitude* dont le pouvoir explicatif est assez bas, la variable *slope* affiche une corrélation significative et un pouvoir explicatif relativement plus élevé ($0,6 < ROC < 0,7$). Ce résultat traduit le fait que l'altitude en soit n'est pas un facteur contraignant pour la mise en culture du sorgho repiqué, mais plutôt la pente. Une approche inductive basée uniquement sur l'exploration des données aboutit à un modèle avec les variables de type de sol (*soilsorg* et *soilpot*), de relief (*slope*) et la variable *livestock*.

Pour la situation de l'année 1987, toutes ces quatre variables sont maintenues dans l'équation du modèle à l'issue de la régression conditionnelle. Le modèle de régression ainsi construit fournit une performance évaluée à 0,770. Les variables *rurpot* et *travelm* qui ont des pouvoirs explicatifs avoisinant 0,6, sont incluses dans le modèle pour prendre en compte l'influence du marché et de la pression humaine. Dans ce cas, on obtient un modèle qui a une plus grande capacité de discrimination des zones de sorgho de contre saison, soit $ROC=0,776$.

Pour la situation de 1999, On obtient des résultats similaires. En suivant l'approche purement inductive, on obtient un modèle qui a une capacité de discrimination évaluée à 0,807. En insérant les variables *travelm* et *rurpot*, la capacité de discrimination du modèle obtenu est plus importante, soit $ROC = 0,810$. Comme le montre les courbes ROC de la figure 9.9, les deux modèles produits fournissent une assez bonne prédiction de la distribution spatiale des zones de sorgho de contre saison. On peut remarquer dans le tableau 9.16 que les signes des coefficients de toutes les variables incluses dans ces modèles coïncident entre les deux dates et fournissent des explications pertinentes. En effet, la probabilité d'affectation d'un espace à la culture du sorgho de contre saison diminue avec la pente et la distance au marché. Elle augmente avec la densité du cheptel bovin. Ce qui confirme la complémentarité entre l'élevage transhumant et la culture du sorgho repiqué qui a été expliquée amplement au chapitre 7.

Pour la distribution spatiale des changements entre 1987 et 1999, les variables sélectionnées en suivant une approche inductive sont : *slope*, *soilsorg* et *soilpot*. Le modèle obtenu a une capacité de détection des changements estimée à 0,735. La variable *rurpot* qui affiche un pouvoir explicatif proche de 0,6 a été incluse dans le modèle pour prendre en compte l'influence de la pression humaine sur les changements observés. Le modèle obtenu affiche une capacité de détection des changements évaluée à 0,733 mais, affiche une corrélation non significative avec la variable *rurpot*. Ce résultat s'explique par l'organisation de l'utilisation de l'espace autour des zones d'habitation dans la région. Les zones de culture de sorgho repiqué sont en général localisées dans la dernière auréole avant les zones de brousse c'est à dire très éloignées du centre du village. Par contre la variable *rurpot* affiche les plus grandes valeurs au centre du village et prend des valeurs décroissantes lorsqu'on se déplace du centre du village vers les zones de

brousse. La variable *rupot* a donc été exclue de l'équation du modèle final qui affiche la même capacité de détection des changements (ROC = 0,733).

Les changements observés pour l'utilisation de l'espace « sorgho de contre saison » correspondent principalement à des espaces transformés en brousse (longues jachères) ou à des conversions en culture pluviale. Une faible proportion est convertie en culture maraîchère ou en sol nu. Les conversions en culture pluviale ou en culture maraîchère se font sur les sols intermédiaires entre les vertisols et les sols d'apport alluvial. Les longues jachères observées concernent le plus souvent les terres les plus aptes à la culture du sorgho de contre saison. Ceci est confirmé par la corrélation positive avec la variable *soilsorg* qui affiche un pouvoir explicatif élevé (ROC > 0,7). Ces jachères surviennent le plus souvent après plusieurs années d'exploitation successives, qui pourrait traduire ainsi une demande de plus en plus importante de la population. En plus des conditions du milieu (type de sol et relief), les changements observés sont fortement dictés par les besoins de production plus importants qui se traduisent par les pratiques paysannes liées à l'amélioration de la fertilité des sols, mais qui ne peuvent être capturées dans ce type de modèle.

1987		1999		Changement	
Variables	β_i	Variables	β_i	Variables	β_i
β_0	-2,01523	β_0	-1,56436	β_0	-1,737
Slope	-0,21279	Slope	-0,42343	Slope	-0,363
Livestock	+0,01968	Livestock	+0,01857	Soilsorg1	+0,939
Rurpot87	-0,00031	Travelm	-0,00002	Soilsorg 2	+0,628
Travelm	-0,00004	Rurpot99	-0,00009	Soilsorg 3	-0,345
Soilsorg1	+1,36185	Soilsorg1	+1,93026	Soilsorg 5	-0,480
Soilsorg2	+0,84024	Soilsorg2	+0,88849	Soilsorg 6	-1,563
Soilsorg3	-1,41260	Soilsorg3	-0,82629		
Soilsorg5	+0,21811	Soilsorg5	-0,11627		
Soilsorg6	-0,92469	Soilsorg6	-1,36438		
ROC = 0,776		ROC = 0,810		ROC = 0,733	

Tableau 9.16 : Paramètres des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « sorgho de contre saison ». Toutes les variables sont significatives avec un niveau $P < 0,01$ dans le cas contraire les symboles * pour $0,01 < P < 0,05$, ** pour $0,05 < P < 0,1$, *** pour $0,1 < P < 0,9$.

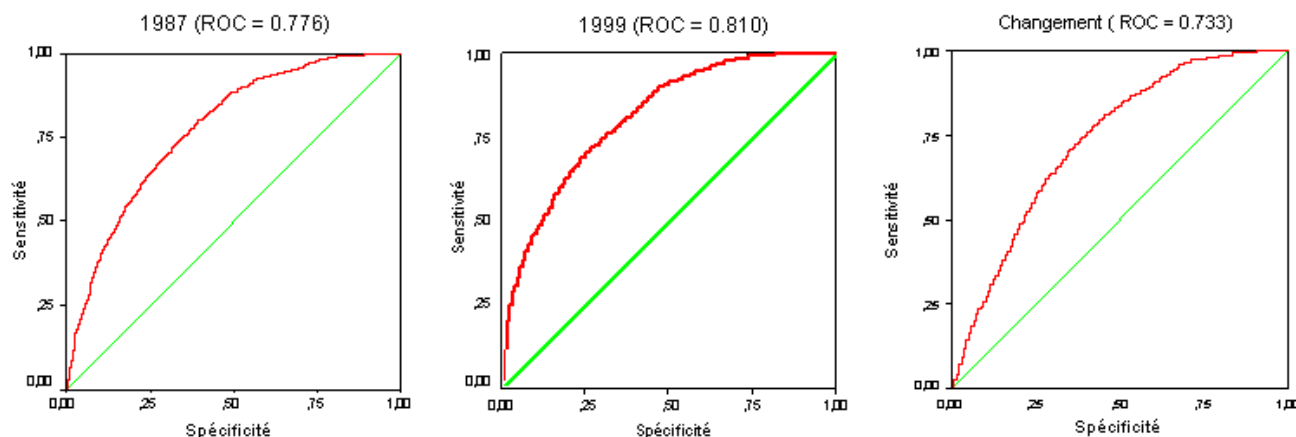


Figure 9.9 : Courbes ROC des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « sorgho de contre saison ».

9.4.6. Les zones de brousse ou savanes boisées

Le tableau 9.17 donne les résultats notamment, les paramètres statistiques de toutes les régressions simples qui sont utilisées pour construire les modèles de prédiction de l'utilisation de l'espace « brousse ».

	1987		1999		Changement 1987 - 199	
	β	ROC	β	ROC	β	ROC
Altitude	-0,005	0,584	-0,005	0,575	+1,3x10 ⁻⁴	0,587***
Slope	-0,237	0,574	-0,294	0,564	-0,178	0,536
Soilpot		0,635		0,630		0,635
Soilpot1	-1,097		-1,477		-0,140	
Soilpot2	-0,122		-0,395		+0,869	
Soilpot3	0,320		-0,323		+0,382	
Soilpot4	-0,497		-0,621		+0,200	
Soilpot5	-1,790		-2,562		-1,364	
Soilsorg		0,624		0,650		0,657
Soilsorg1	-0,405		-0,996		-0,528	
Soilsorg2	+0,363		+0,701		+0,983	
Soilsorg3	+0,296		+0,693		-0,019	
Soilsorg4	-0,905		-0,864		-0,314	
Soilsorg5	-0,603		-0,093		-0,432	
Rainfall	+0,002	0,530	+0,001	0,530*	+0,012	0,668
Densite	-3,9x10 ⁻⁴	0,648	-0,011	0,680	-0,003	0,593
Rurpot	-6,2x10 ⁻⁴	0,669	-0,001	0,726	-0,001	0,658
Poppot	-4,5 x10 ⁻⁴	0,684	-0,001	0,736	-0,001	0,666
Fulbé	+0,081	0,493***	+0,171	0,502*	-0,708	0,565
Guiziga	+0,486	0,531	+0,610	0,546	+0,958	0,594
Mofu	-1,297	0,619	-2,011	0,638	-0,644	0,558
Distriver	+1,6x10 ⁻⁴	0,644	+1,5x10 ⁻⁴	0,646	+0,7x10 ⁻⁴	0,575
Distroad	+1,98x10 ⁻⁴	0,579	+3,1x10 ⁻⁴	0,620	+3,14x10 ⁻⁴	0,610
Travelc	+1,03x10 ⁻⁴	0,671	+1,3x10 ⁻⁴	0,707	+0,76x10 ⁻⁴	0,643
Travelu	+0,97x10 ⁻⁴	0,632	+1,3x10 ⁻⁴	0,675	+1,05x10 ⁻⁴	0,637
Travelm	+1x10 ⁻⁴	0,655	+1,2x10 ⁻⁴	0,694	+0,3x10 ⁻⁴	0,569
Livestock	-0,014	0,565	-0,018	0,577	-0,013	0,561

Tableau 9.17 : Paramètres des régressions simples pour l'utilisation de l'espace « brousse ». Toutes les variables sont significatives avec un niveau $P < 0,01$ dans le cas contraire les symboles * pour $0,01 < P < 0,05$, ** pour $0,05 < P < 0,1$, * pour $0,1 < P < 0,9$.**

On remarque dans le tableau 9.17 que les corrélations avec les variables d'altitude (*altitude*), de pluviométrie (*rainfall*) ne sont pas significatives respectivement pour la situation des changements et la situation de 1999. La corrélation avec la variable d'ethnicité (*fulbé*) est également non significative. Presque toutes les autres variables affichent une corrélation significative mais leur pouvoir explicatif reste très faible ($ROC < 0,6$). Il s'agit des variables d'ethnicité (*guiziga mofu*), de la variable d'altitude (*slope*) et la variable *livestock*. Par contre, les variables *distriver* et *travelm* qui ont un pouvoir explicatif relativement plus élevé ($0,6 < ROC < 0,7$) n'ont pas été sélectionnées parce qu'elles ne traduisent pas un processus pertinent ou une hypothèse que l'on veut tester.

Les variables géoéconomiques (*travelc*, *travelu*) et les variables de population (*poppot* et *rurpot*) affichent les meilleurs pouvoirs explicatifs ($ROC > 0,7$). Ces variables ont été sélectionnées pour la régression conditionnelle pas à pas puisque les corrélations avec ces variables traduisent la pression de la population et la proximité de la ville avec leurs besoins en bois et aliments qui sont les principales incitations aux défrichements des savanes boisées dans la région. Les variables de type de sol (*soilsorg* et *soilpot*), les variables *density* et *distroad* qui ont un pouvoir explicatif compris entre 0,6 et 0,7 ont été également sélectionnées. On a vu aux chapitres 7 et 8 à partir de l'analyse des images satellites confirmée sur le terrain que la plupart des défrichements des savanes boisées se font principalement pour l'extension agricole. On peut dans ce cas s'attendre à ce que les types de sol expliquent la distribution spatiale des zones de brousse et des changements observés. On pourrait également envisager que les zones de brousse restantes soient localisées à une grande distance des principaux axes routiers.

Pour la situation de 1987, les 8 variables suivantes ont été incluses dans la procédure de régression conditionnelle : *travelc*, *travelu*, *poppot*, *rurpot*, *soilpot*, *soilsorg*, *density* et *distroad*. Les variables *density*, *rurpot* et *soilsorg* ont été exclues de l'équation du modèle à l'issue de cette procédure. Le modèle final obtenu a une capacité de discrimination évaluée à 0,720. Pour la situation de 1999, la même combinaison de variables que celle de 1987 a été sélectionnée pour la procédure de régression conditionnelle et les mêmes variables sont maintenues dans l'équation du modèle final. Le modèle de prédiction dans ce cas affiche une capacité de discrimination plus élevée ($ROC = 0,778$). Les signes des coefficients logistiques, coïncident entre les deux dates mais seules les valeurs diffèrent. Les signes des coefficients des variables *distroad* et *travelc* indiquent que la probabilité pour qu'un espace donné soit encore boisé augmente avec la distance aux routes et au principal centre urbain (tableau 9.18). Le coefficient de la variable *travelu* est par contre difficile à interpréter. Puisque chaque centre urbain définit un front de défrichement qui part de son centre, on aurait espéré avoir le même sens de corrélation qu'avec la variable *travelc*.

Pour la situation des changements entre 1987 et 1999, la même combinaison de variables que celles des deux cas précédents a été insérée dans la procédure de régression conditionnelle. On constate qu'en plus des variables rejetées dans les deux premiers cas, la variable *travelu* a été également rejetée de l'équation du modèle. La capacité de discrimination du modèle obtenu est évaluée à $ROC = 0,707$. Les changements observés pour l'utilisation de l'espace « brousse » correspondent aux défrichements de la savane boisée. Les corrélations positives avec *distroad* et *travelc* indiquent que la probabilité qu'une zone ait subi un défrichement au cours de la période considérée est plus grande dans des zones difficilement accessibles à partir des routes ou de la ville. En effet, l'analyse diachronique de l'occupation du sol effectuée au chapitre 8 a montré que les défrichements se sont effectués dans le temps suivant un gradient partant du

centre de la ville aux zones rurales environnantes. Ces facteurs seraient donc plus explicatifs de la distribution spatiale des brousses restantes que des changements observés. Les observations de terrain ont confirmé l'influence du type de sol sur la présence de reliques de zones boisées dans la région. En effet, les zones encore boisées correspondent le plus souvent à des situations où les sols présentent des très faibles potentialités agricoles et où les essences d'arbres présentes ne sont pas appréciées pour le bois de feu.

1987		1999		Changement	
Variabes	β_i	Variabes	β_i	Variabes	β_i
β_0	-1,12485	β_0	-1,57875	β_0	-4,19409
Distroad	+0,00005	Travelc	+0,00010	Distroad	+0,00021
Poppot87	-0,00023	Travelu	-0,00003	Travelc	+0,00003
Travelc	+0,00010	Poppot99	-0,00055	Poppot99	-0,00022
Travelu	-0,00004	Distroad	+0,00011	Soilpot1	+0,188
Soilpot1	-0,89519	Soilpot1	-1,12442	Soilpot2	+0,77
Soilpot2	-0,27048	Soilpot2	-0,63779	Soilpot3	+0,306
Soilpot3	+0,08777	Soilpot3	-0,68003	Soilpot5	+0,284
Soilpot5	-0,50455	Soilpot5	-0,51355	Soilpot6	-1,023
Soilpot6	-1,57547	Soilpot6	-2,01718		
ROC= 0,720		ROC= 0,778		ROC= 0,707	

Tableau 9.18 : Paramètres des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « brousse ». Toutes les variables sont significatives avec un niveau $P < 0,01$ dans le cas contraire les symboles * pour $0,01 < P < 0,05$, ** pour $0,05 < P < 0,1$, * pour $0,1 < P < 0,9$.**

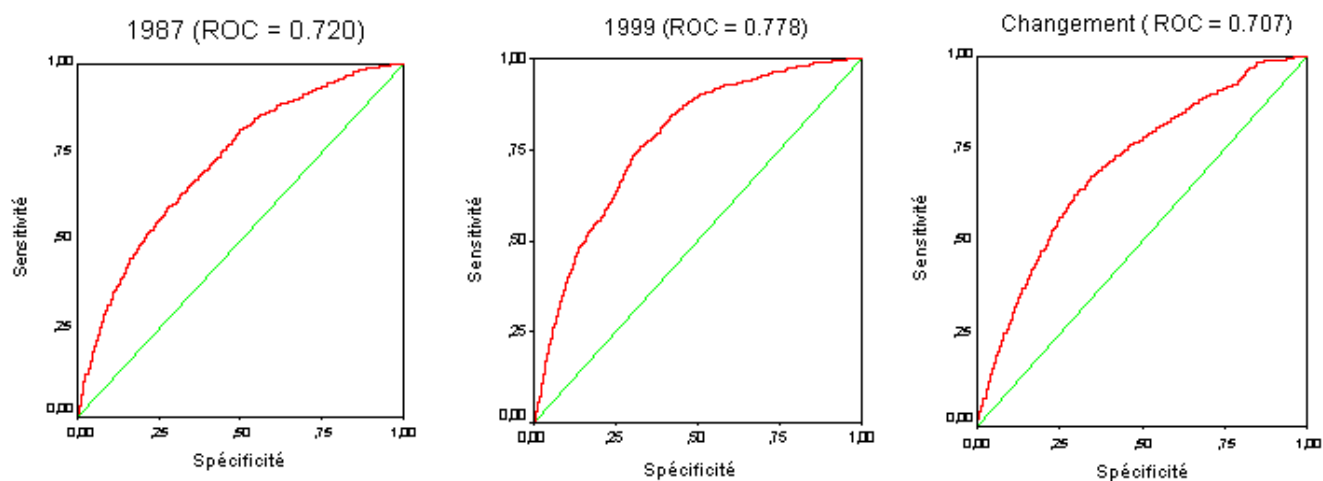


Figure 9.10 : Courbes ROC des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « brousse ».

9.5. Synthèse et discussions

L'exploration des facteurs déterminants a permis de construire un modèle de prédiction pour chaque utilisation de l'espace dans les trois situations considérées : 1987, 1999 et les changements entre les deux dates. Le tableau 9.19 résume les combinaisons des variables explicatives et les capacités de discrimination de tous les modèles de prédiction obtenus.

LU	Date	Variables des modèles de prédiction					ROC	P*		
<i>Habitation</i>	1987	Poppot87	Distroad	Soilsorg		0,886	92			
	1999	Poppot99	Distroad	Soilsorg		0,887				
	Changement	Poppot99	Distroad	Distriver	Soilsorg			0,889		
<i>Maraîcher Verges</i>	1987	Distriver	Travelc	Travelu	Travelm	Rurpop87	Poppot87	Soilsorg	0,939	94
	1999	Distriver	Travelc	Travelm	Rurpop99	Poppot99	Soilsorg		0,915	
	Changement	Distriver	Travelc	Travelu	Travelm	Rurpop99	Soilsorg		0,888	
<i>Culture Pluviale</i>	1987	Rurpot87	Soilpot					0,695	52	
	1999	Rurpot99	Soilpot					0,695		
	Changement	rainfall	Soilpot					0,665		
<i>Sol nu</i>	1987	Poppot87	Soilpot					0,640	65	
	1999	Poppot99	Soilpot					0,687		
	Changement	Distroad	Travelc	Soilsorg						0,718
<i>Sorgho repiqué</i>	1987	Slope	Livestock	Rurpot87	Travelm	Soilsorg		0,776	89	
	1999	Slope	Livestock	Travelm	Rurpot99	Soilsorg		0,810		
	Changement	Slope	Soilsorg					0,733		
<i>Brousse</i>	1987	Distroad	Poppot87	Travelc	Travelu	Soilpot		0,720	85	
	1999	Travelc	Travelu	Poppot99	Distroad	Soilpot		0,778		
	Changement	Distroad	Travelc	Poppot99	Soilpot					0,707

Tableau 9.19 : Combinaisons des variables explicatives et performances des modèles de prédiction des utilisations de l'espace. La colonne *P représente la précision d'utilisation des classes d'occupation du sol calculée au chapitre 8. Elle est d'autant plus faible que les erreurs d'excédent sont importantes.

9.5.1. Aperçu général sur les facteurs explicatifs de l'utilisation de l'espace et des changements

On peut remarquer dans le tableau 9.19 que les natures des variables qui expliquent la distribution spatiale de chaque utilisation de l'espace (structure du système) ne changent pas fondamentalement entre 1987 et 1999. Les signes des coefficients logistiques coïncident également entre les deux dates. Les changements les plus importants concernent l'importance relative des valeurs des coefficients qui traduisent l'influence des différents facteurs. Toutefois, on note quelques exemples de situations qui sont difficiles à expliquer. L'absence de la variable *travelu* dans l'équation du modèle des cultures maraîchères/verges en 1999 et le signe de son coefficient dans le modèle de la brousse sont contraires aux attentes si on considère l'hypothèse formulée sur l'influence des petits centres urbains de la région

(chapitre 5). On pourrait conclure que cette influence n'est pas encore assez marquée comme celle du principal centre urbain. Les facteurs déterminant les changements ne sont pas toujours les mêmes qui déterminent la distribution spatiale, ce qui est bien compréhensible. Mais, dans plusieurs des cas, on ne dispose pas de variables spatiales pertinentes qui traduisent les processus qui gouvernent ces changements. Ainsi, plusieurs variables identifiées comme déterminant les changements traduisent en réalité la localisation des unités qui ont subi les changements.

Le tableau 9.19 montre que presque toutes les variables interviennent significativement dans l'explication des structures d'utilisation de l'espace à l'exception des variables de pluviométrie (*rainfall*) et d'ethnicité (*fulbé, guiziga, mofu*). La variable *rainfall* apparaît uniquement dans le modèle des cultures pluviales mais nous n'avons pas pu trouver une interprétation raisonnable à cette corrélation. Cette dernière situation s'explique d'une part par la précision spatiale des données et l'échelle temporelle considérée qui ne permettent pas de capturer les phénomènes étudiés. De même, on a observé des corrélations avec certaines variables d'ethnicité (*fulbé* avec les cultures maraîchères et *mofu* pour les cultures pluviales) qui ne pouvaient pas être associée à des mécanismes ou stratégies connues. Les modèles proposés ne permettent pas de capturer facilement la manière (pas nécessairement linéaire) dont ce type de variable influence l'utilisation de l'espace.

Les potentialités des sols et les variables démographiques apparaissent comme des facteurs intervenant dans l'explication de la structure et des changements de toutes les utilisations de l'espace. L'indice de population potentielle par exemple apparaît dans l'explication de la distribution de presque toutes les utilisations de l'espace sauf pour les cultures maraîchères/vergers qui obéissent plus à une logique économique. Les résultats de la procédure d'exploration ont confirmé la très forte influence du centre urbain sur l'évolution des cultures maraîchères et du processus de défrichement des savanes boisées. La pression sur l'espace ou la disponibilité des terres évaluées à partir d'un indice de population potentielle explique mieux la structure et les changements d'utilisation de l'espace que la densité de la population.

9.5.2. Modèles de prédiction de chaque utilisation de l'espace

On remarque dans l'ensemble du tableau 9.19 que chaque utilisation de l'espace a son sous-ensemble spécifique de facteurs déterminants. Dans la plupart des cas, sauf pour quelques-uns qui ont été explicités, les variables qui interviennent dans l'explication de chaque utilisation de l'espace ont généralement le signe espéré et permettent ainsi d'aboutir à des modèles de prédiction plus réalistes et interprétables. Dans cette sous-section, les résultats sont résumés et confrontés avec les hypothèses théoriques ou les connaissances empiriques pour chaque type d'utilisation de l'espace.

Zones d'habitation

La distribution spatiale des zones d'habitation s'explique principalement par la pression humaine et s'organise autour des principaux axes routiers. Les habitations ont également une tendance à s'installer sur des terres ayant un faible taux d'argile. Les changements observés pour cette classe d'utilisation de l'espace surviennent de préférence le long des cours d'eau sous la menace des effets de l'érosion des berges. Cette dynamique peut être mieux expliquée à l'échelle du terroir.

Cultures maraîchères/Vergers

L'organisation spatiale des cultures maraîchères et des vergers est déterminée par un nombre important de variables notamment celles liées au milieu physique (proximité des cours d'eau et type de sol),

celles liées à la demande (population) et à l'accessibilité au marché. L'influence de la qualité des sols sur la distribution des cultures maraîchères se traduit dans le modèle par une corrélation positive avec les sols d'apport alluvial à texture fine (*soilsorg5*) et les sols argileux à faciès verticale (*soilsorg2*). Ainsi, le modèle obtenu confirme globalement l'idée d'une organisation de la culture maraîchère le long des cours d'eau et autour du principal centre urbain en fonction des types de sol. Pour l'année 1987, le modèle indique qu'une organisation similaire se répète à l'échelle des petits centres urbains. Toutefois, cette observation n'est pas confirmée en 1999. L'influence de la variable qui définit la distance au marché est difficile à expliquer parce que les marchés considérés sont plutôt spécialisés dans la vente du bétail et du sorgho de contre saison et non dans les produits maraîchers ou les fruits.

Cultures pluviales

Aucun facteur n'explique de façon assez évidente et individuelle la localisation des cultures pluviales. La plupart des variables affichent un pouvoir explicatif assez faible. Le modèle obtenu met en exergue l'influence significative de la pression humaine et des types de sol, confirmant ainsi l'hypothèse selon laquelle les zones de cultures pluviales constituent la première auréole autour du village en zone rurale et en priorité sur les meilleures terres. L'indice de pression potentielle de la population explique mieux cette distribution que la densité de la population.

Sols nus

Tout comme pour les cultures pluviales, aucun facteur n'explique de façon assez évidente la localisation des sols nus et le même couple de variables explicatives est obtenu dans ce cas. Compte tenu de l'impact de la dégradation des sols suite à l'érosion on aurait espéré une corrélation positive avec la pente (*slope*). De même, on aurait également espéré une corrélation avec l'importance de l'élevage qui est perçu par les acteurs de la région comme un facteur qui crée la pression sur la végétation et donc la dénudation des sols. Toutefois, aucune des corrélations avec ces variables n'est significative.

Sorgho repiqué

La distribution des zones cultivées en sorgho repiqué est déterminée par une combinaison de variables de natures diverses incluant 2 variables biophysiques, une variable démographique et 2 variables géoéconomiques. Le modèle confirme l'évidence selon laquelle l'extension spatiale est fortement contrainte par le type de sol et le niveau de pente du sol. Il met également en exergue le fait que la culture du sorgho de contre saison constitue la dernière auréole autour des zones d'habitation, s'installant ainsi sur les espaces vides où la pression humaine est faible (*rurpot*). La compatibilité de l'utilisation pastorale de l'espace (*livestock*) avec la culture du sorgho repiqué est également confirmée par ce modèle. Toutefois, la précision du MNT utilisée ne permet pas de mettre en exergue les dynamiques d'extension de la culture sur les sites en microtopographie et qui exigent l'aménagement des diguettes.

Brousse

Le modèle obtenu pour la brousse montre que sa distribution spatiale est principalement déterminée par la pression humaine et l'accessibilité. En effet, la pression humaine a conduit à des défrichements sur la plupart des meilleures terres pour l'extension agricole et la satisfaction des besoins en bois de feu. Par conséquent, les zones de brousse restantes sont de plus en plus éloignées des zones d'habitation et des routes principales. Quelques observations sur le terrain ont montré que les zones

non défrichées qui sont relativement proche du centre urbain correspondent à des terres de très faibles potentialités agricoles et dont les espèces ligneuses présentes ne sont pas prisées pour le bois de feu.

9.5.3. Performances des modèles de prédiction

Une tendance générale qui se dégage du tableau 9.19 est que les performances des modèles de prédiction des utilisations de l'espace sont d'autant plus élevées que la précision de la cartographie meilleure. Ainsi, les modèles de prédictions les plus performants sont ceux de la distribution des zones de cultures maraîchères et des zones d'habitation. Les modèles des zones de culture de sorgho repiqué et des zones de brousse sont assez performants alors que les zones de cultures pluviales et de sols nus restent difficiles à prédire. Les classes culture pluviale et sol nu affichent les valeurs les plus faibles de la précision d'utilisation, traduisant les difficultés de leur identification par cartographie (chapitre 8). Les difficultés de prédictions de ces classes s'expliquent par le fait que les mélanges de classe (erreurs d'excédent) introduisent des aléas dans le modèle qui sont difficiles à expliquer. En plus de la qualité de la cartographie, la performance du modèle de prédiction dépend également de la pertinence et de la complétude des facteurs déterminants qui ont été introduits dans le modèle. On a vu dans cette application plusieurs exemples de facteurs pertinents qui n'ont pas été inclus dans les modèles soit à cause de l'absence de données spatiales, soit à cause des difficultés à exprimer ces facteurs sous forme des variables spatiales pertinentes, etc. Il se pose également un problème d'échelle. En effet, pour certaines utilisations comme les zones d'habitation et les cultures maraîchères les superficies concernées par les changements sont assez faibles et difficiles à analyser à l'échelle régionale. Les facteurs déterminant ces changements opèrent également à l'échelle locale et nécessite dans ce cas de mettre en œuvre une méthode explicitement multi-échelle.

On remarque que les modèles de prédiction des changements sont généralement moins performants que les modèles de prédiction de l'organisation spatiale. Une raison importante de cette situation est la difficulté pour le type de modèle utilisé de capturer les mécanismes qui induisent les changements. On a vu par exemple que certaines utilisations présentent une grande diversité des formes de conversions et donc de causes possibles et de stratégies mises en place. Le type de modèle utilisé est donc en réalité statique et n'est pas adapté pour prédire les changements d'utilisation de l'espace. Ces modèles permettent de calculer des probabilités de localisation des utilisations ou des changements qui sont exploités ultérieurement pour calibrer un modèle qui simule les changements d'utilisation de l'espace en prenant en compte la compétition entre les différentes formes d'utilisation de l'espace. La comparaison des résultats de plusieurs modèles indique que le modèle le plus pertinent n'est pas nécessairement celui correspondant aux hypothèses formulées à l'avance, ni celui correspondant aux meilleures corrélations fournies par les données. Il correspond à un compromis qui tend à refléter les processus étudiés et justifie l'intérêt de l'approche d'exploration utilisée.

9.6. Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre, une méthode d'exploration spatiale a été appliquée sur un jeu de données extrait de la base de données de SMALL Savannah pour analyser les facteurs qui expliquent la structure et les changements d'utilisation de l'espace dans la région de Maroua, Extrême Nord du Cameroun. La méthode combine une approche inductive basée sur l'exploration des données avec des aspects d'un raisonnement déductif basé sur les connaissances préalables sur la zone d'étude et les théories de changement d'utilisation de l'espace. Un ensemble de variables spatiales a été calculé pour représenter l'utilisation de l'espace et traduire les facteurs qui influencent potentiellement sa structure et ses

changements. Un modèle de prédiction a été construit pour chacune utilisation de l'espace en distinguant la situation de 1987, celle de 1999 et des changements entre les deux dates. Les modèles ainsi développés fournissent une meilleure caractérisation (quantitative) des relations entre l'utilisation de l'espace et un ensemble de facteurs d'ordre biophysique, sociodémographique et géoéconomique. Les résultats confirment la très forte influence du centre urbain et révèlent celle des potentialités des terres agricoles sur les formes d'utilisation de l'espace. La pression sur l'espace évaluée à partir d'un indice de population potentielle explique mieux les structures et les changements que la densité de la population.

Cette application met en exergue l'ensemble des situations envisagées par la procédure de sélection des facteurs potentiellement déterminants introduite au chapitre 3. Des hypothèses émises sur l'influence de certains facteurs sont confirmés alors que certaines sont rejetées et de nouvelles relations pertinentes sont identifiées et quantifiées.

Sur le plan méthodologique, les performances des modèles construits dépendent de deux facteurs : l'approche d'exploration et la nature des données. La comparaison des performances de prédiction des modèles obtenus avec celles des modèles issus d'une approche purement déductive ou celle essentiellement basée sur les meilleures statistiques fournies par les données, justifie l'intérêt et la pertinence de la méthode proposée pour explorer la complexité du système d'utilisation de l'espace. Les résultats obtenus montrent qu'en combinant une approche inductive avec des aspects de raisonnement déductif, on arrive à mieux expliciter les interactions entre ces facteurs et les changements d'utilisation de l'espace. En conclusion les études portant sur l'utilisation de l'espace devraient adopter de plus en plus des approches d'analyse plus déductives et intégrées qui prennent en compte les processus réels et la multiplicité des interactions entre l'utilisation de l'espace et un ensemble de facteurs déterminants. Les principales limites de ce type d'approche sont liées à la disponibilité et à la qualité des données. Les performances des modèles de prédiction dépendent de la qualité de la cartographie, de la pertinence des facteurs insérés dans les modèles et de l'échelle à laquelle opère le processus. Certains processus bien identifiés sont difficiles à modéliser sous forme des variables spatiales explicites. Quelques fois, la modélisation peut être simple mais le problème se pose au niveau des moyens de collecte des données spatiales explicites. De plus toutes les données ne sont pas collectées dans le même contexte ni pour les mêmes objectifs, ce qui explique la variabilité des échelles de représentation qui ont une influence certaine sur les résultats de régression et affectent les performances de prédiction des modèles. En conclusion le développement des bases de données spatiales explicites contenant des données socio-démographiques est requis pour les études sur les changements d'utilisation de l'espace.

Les performances des modèles peuvent être également améliorées en explorant la contribution d'autres échelles spatiales qui ont été jugées pertinentes. La même analyse effectuée dans ce chapitre peut être par exemple répétée aux résolutions de 500 m et 750 m. D'autre part, nous avons montré au chapitre 8, l'intérêt d'une analyse multi-échelle prenant en compte les zones agro écologiques pour lesquelles des modèles plus spécifiques peuvent être construits. L'exploration des facteurs déterminants décrite dans ce chapitre fournit uniquement des éléments de caractérisation de la structure du système d'utilisation de l'espace. Le type de modèle utilisé est donc en réalité statique et n'est pas adapté pour prédire les changements d'utilisation de l'espace. Toutefois, les informations quantitatives dérivées sont utiles pour une modélisation dynamique prenant en compte les mécanismes de changements. C'est dans cette perspective que les résultats de l'analyse spatiale et quantitative effectuée dans ce chapitre seront utilisés au chapitre suivant pour construire un modèle intégré de simulation des changements et de la compétition entre les différentes formes d'utilisation de l'espace.



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^{ème} 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.

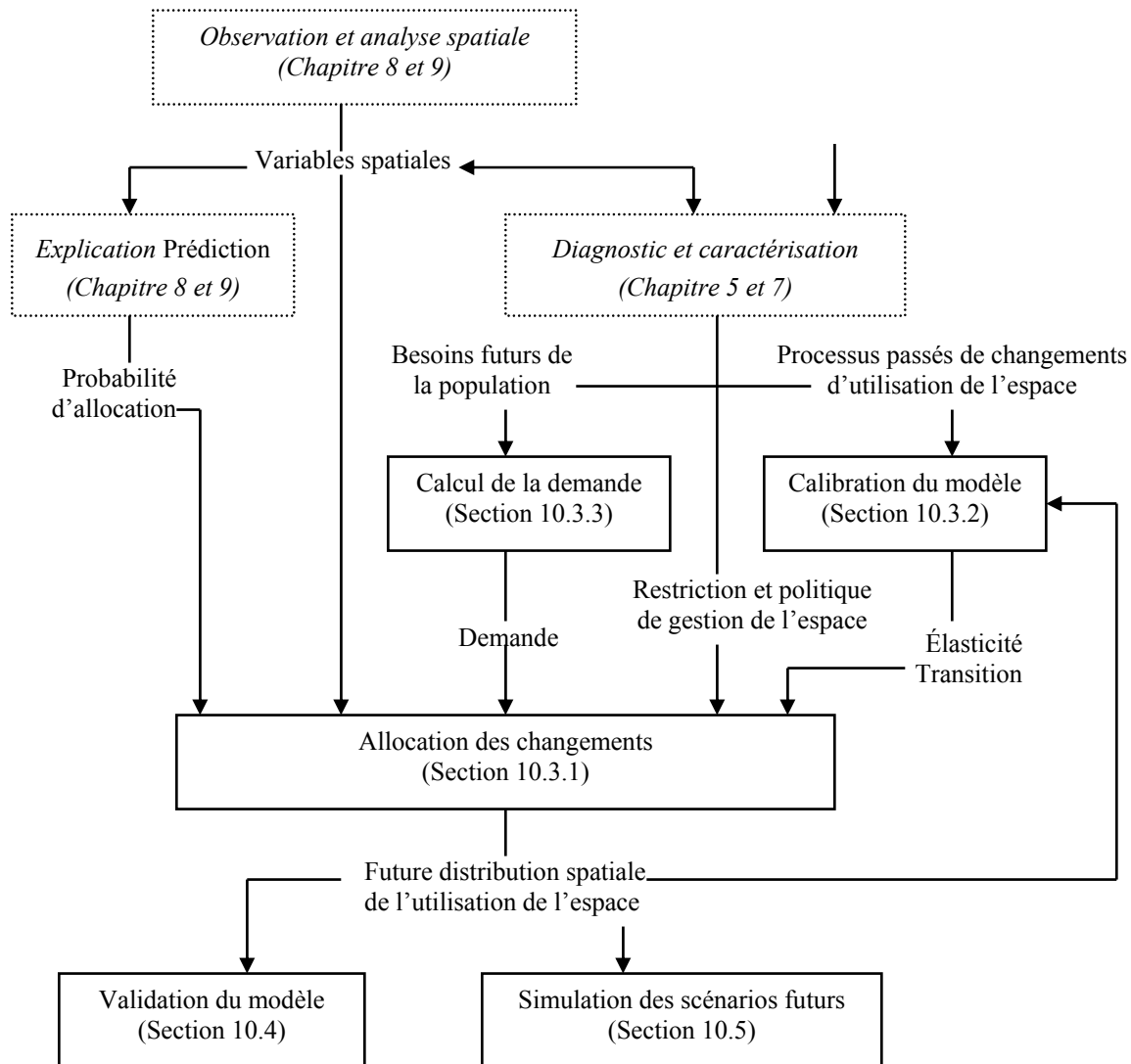


Figure 10.1 : Flux d'informations entre les modules de SMALL Savannah et de la plate-forme CLUE-S. Le rectangle en pointillé et le texte en italique représentent les modules non utilisés dans cette application.

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.

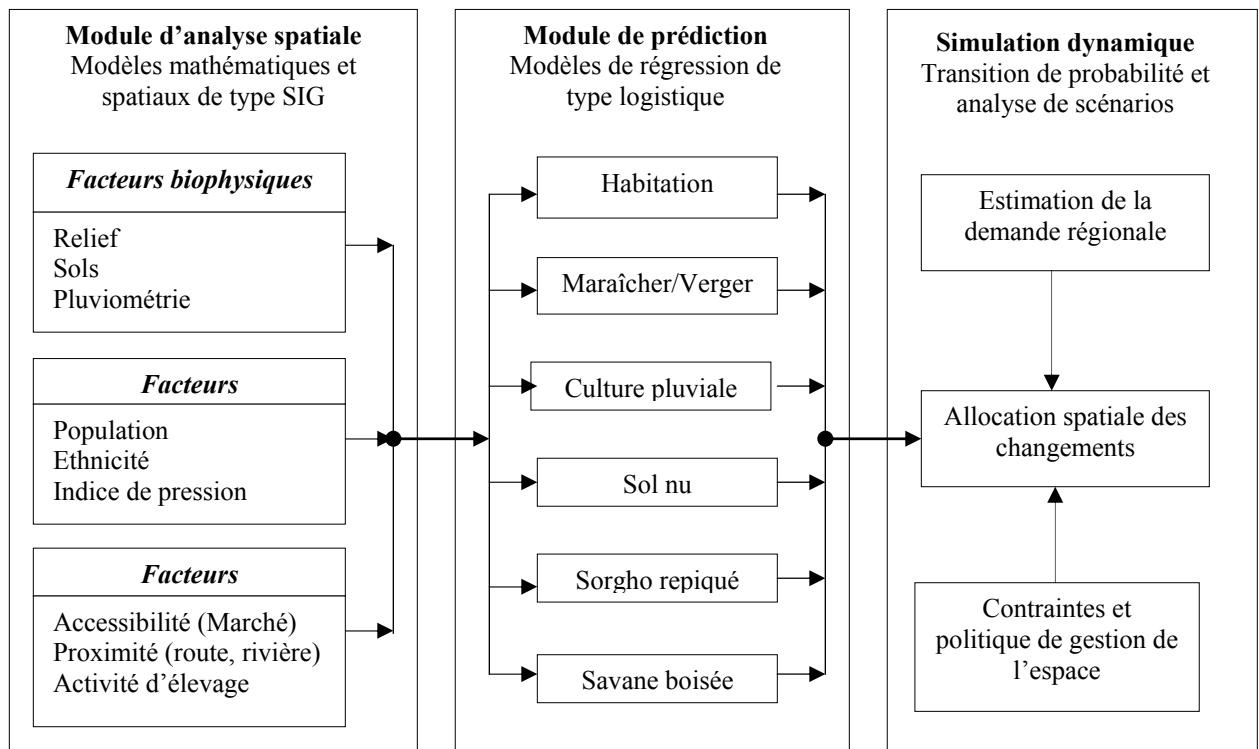


Figure 10.2 : Structure du modèle intégré de changement d'utilisation de l'espace sur la région autour de Maroua.

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.

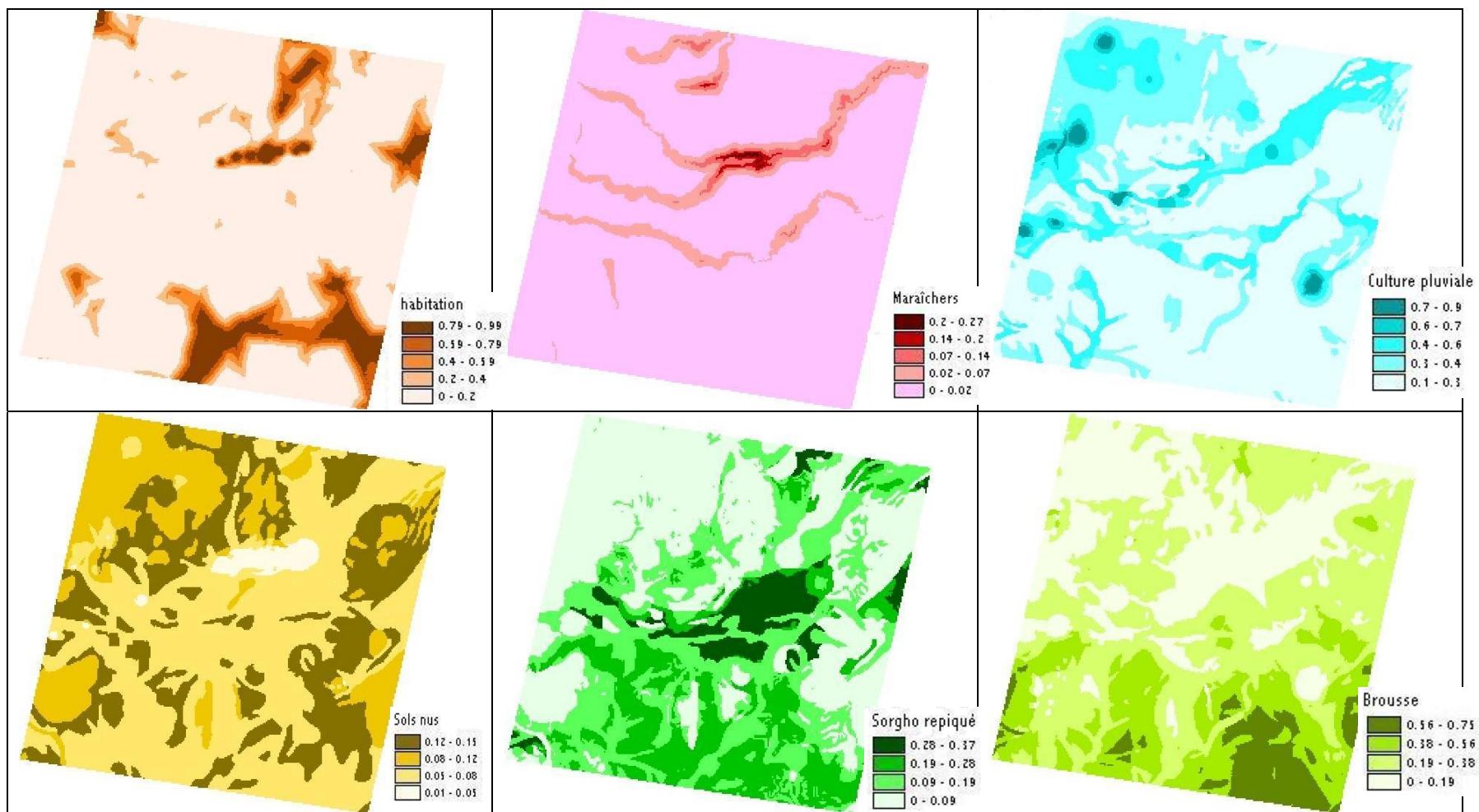


Figure 10.3 : Carte de probabilité d'allocation de chaque type d'utilisation de l'espace calculée à partir des résultats de régression de 1987.

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.

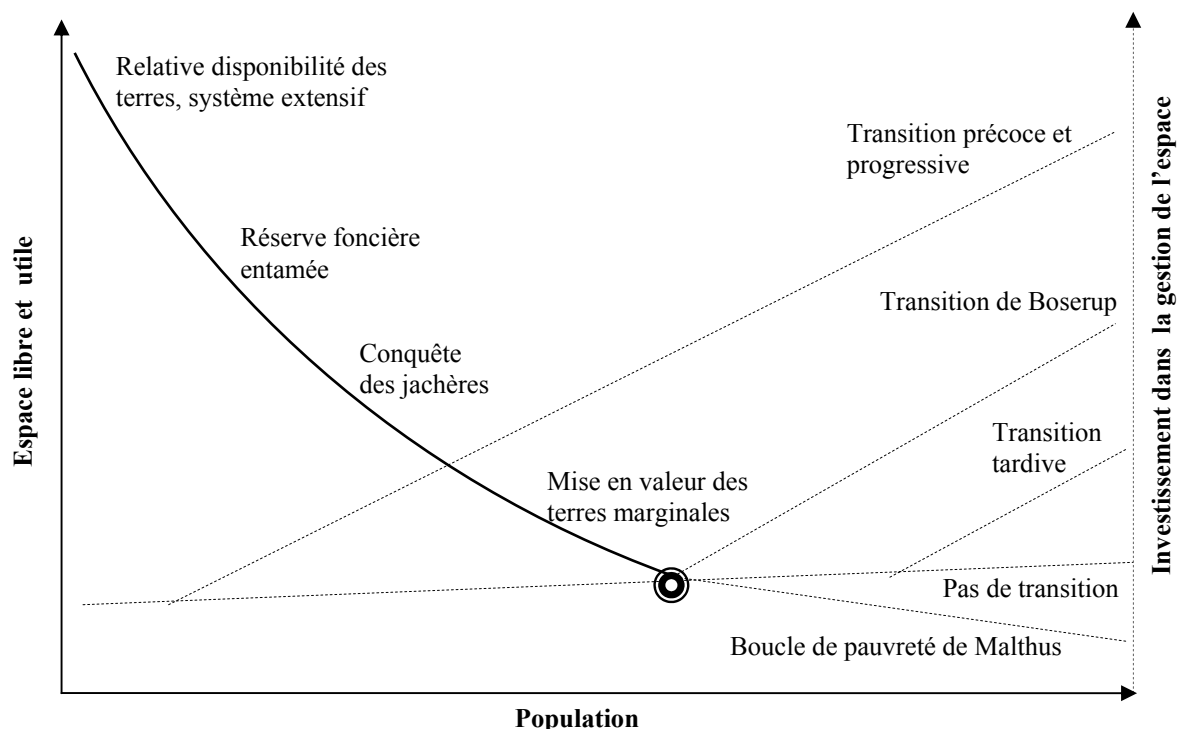


Figure 10.4 : Modélisation des processus de changement d'utilisation de l'espace et trajectoires hypothétiques des changements dans un futur proche.

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, ΔLU_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.

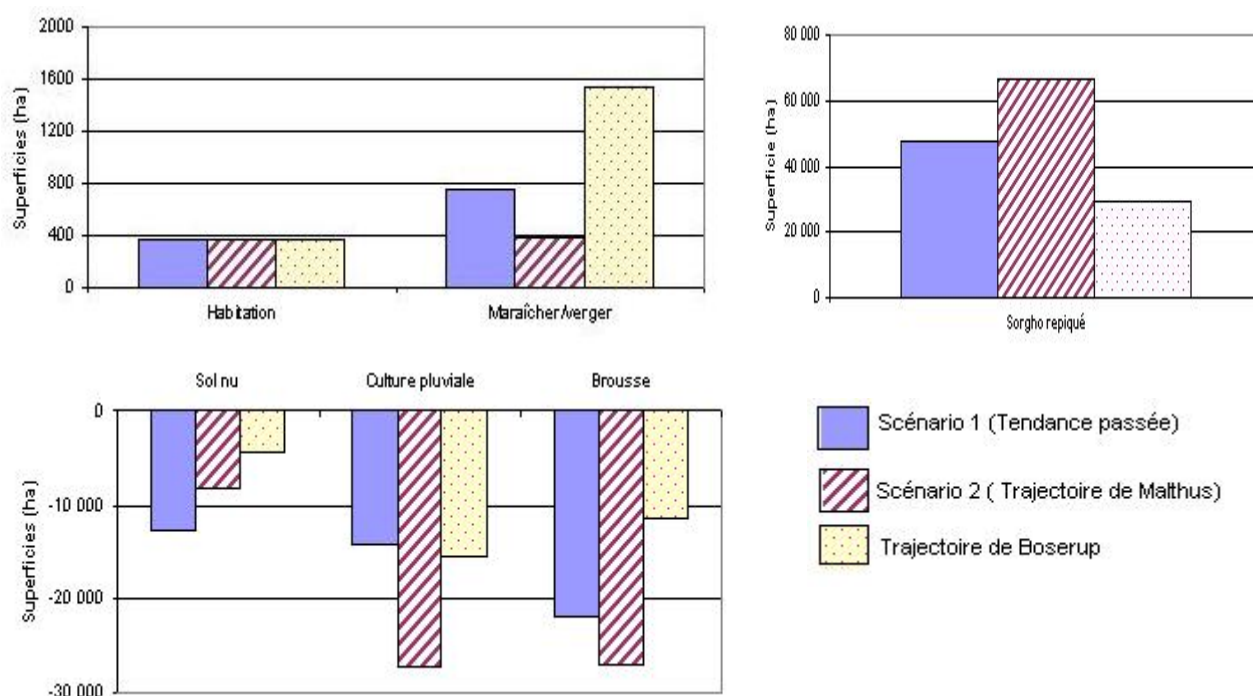


Figure 10.5 : Différence entre les demandes complémentaires d'allocation ou de récupération pour chaque utilisation de l'espace pour les trois scénarios formulés.

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) croît 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
Total	357 150			357 150

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
Total	357 150			357 150		357 150

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.

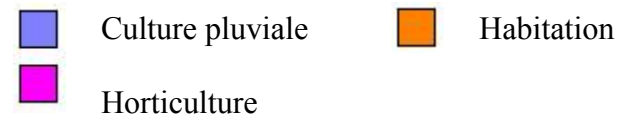
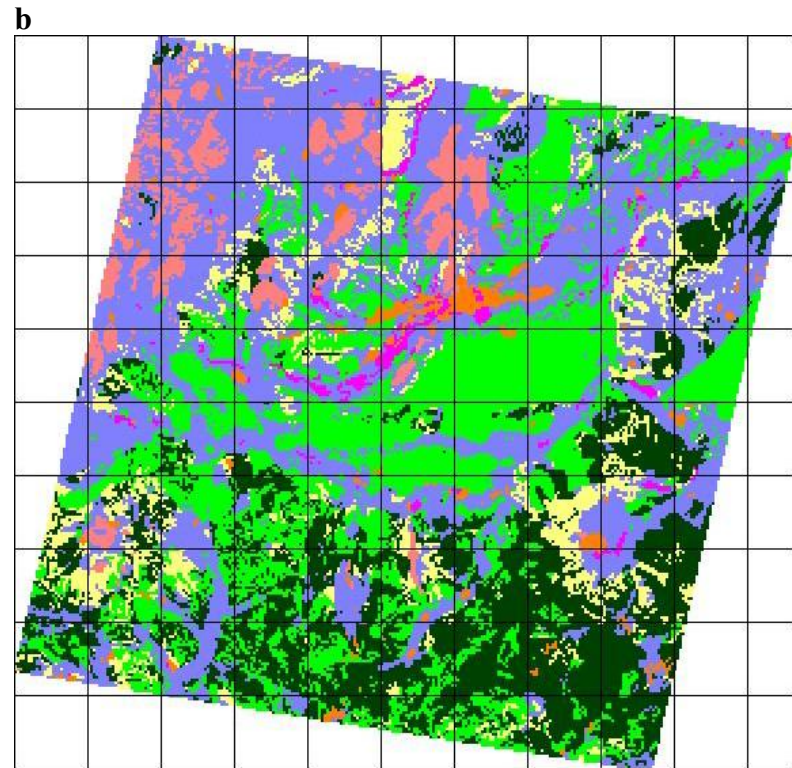
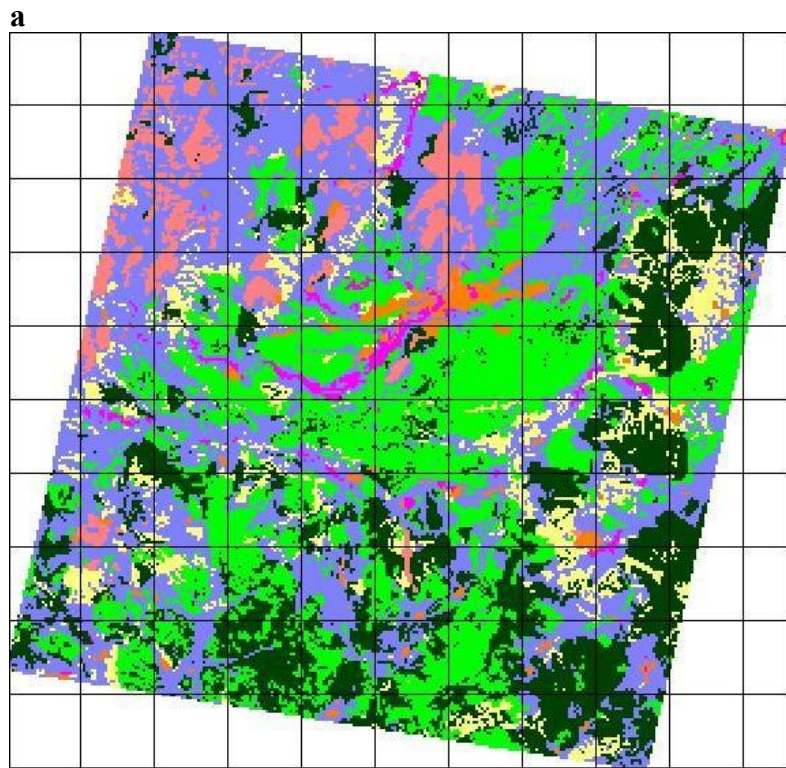


Figure 10.6 : Cartes d'utilisation de l'espace en 1999, obtenues par analyse d'images de télédétection (a) et par projection (b).

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.

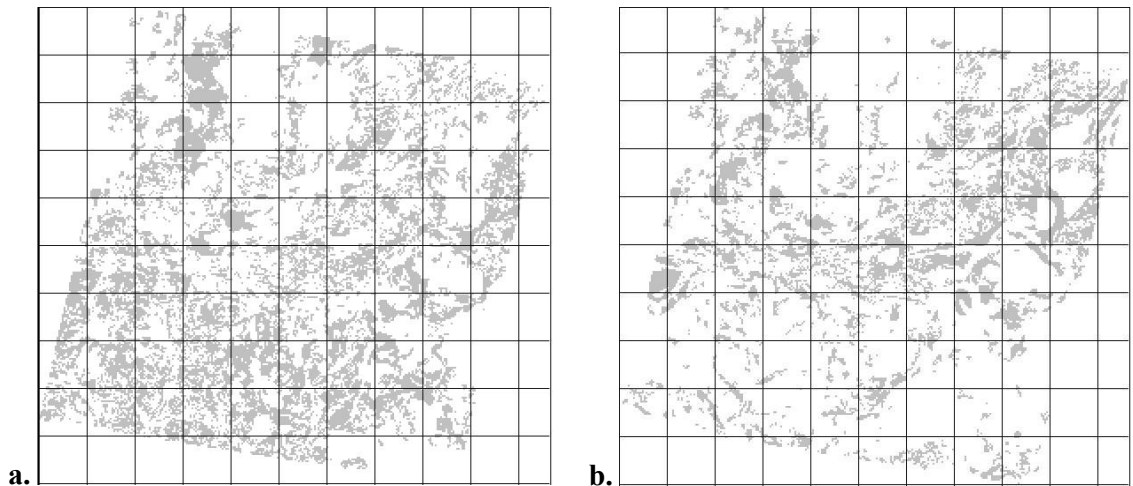


Figure 10.7 : Les cartes de changements observés entre 1987 et 1999 (a), et des changements prédits par le modèle (b).

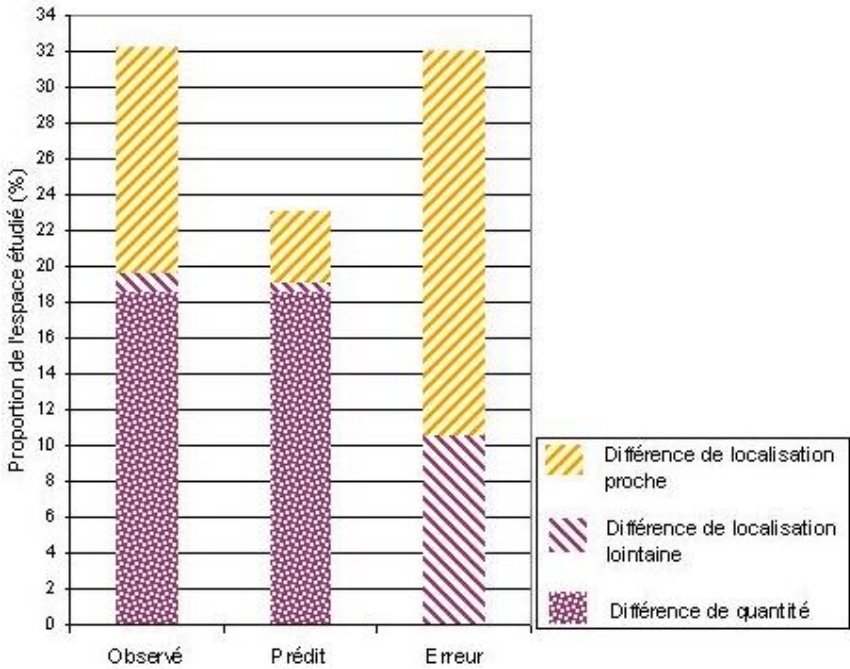


Figure 10.9 : Quantification des changements observés, changements prédits et erreurs de prédiction.

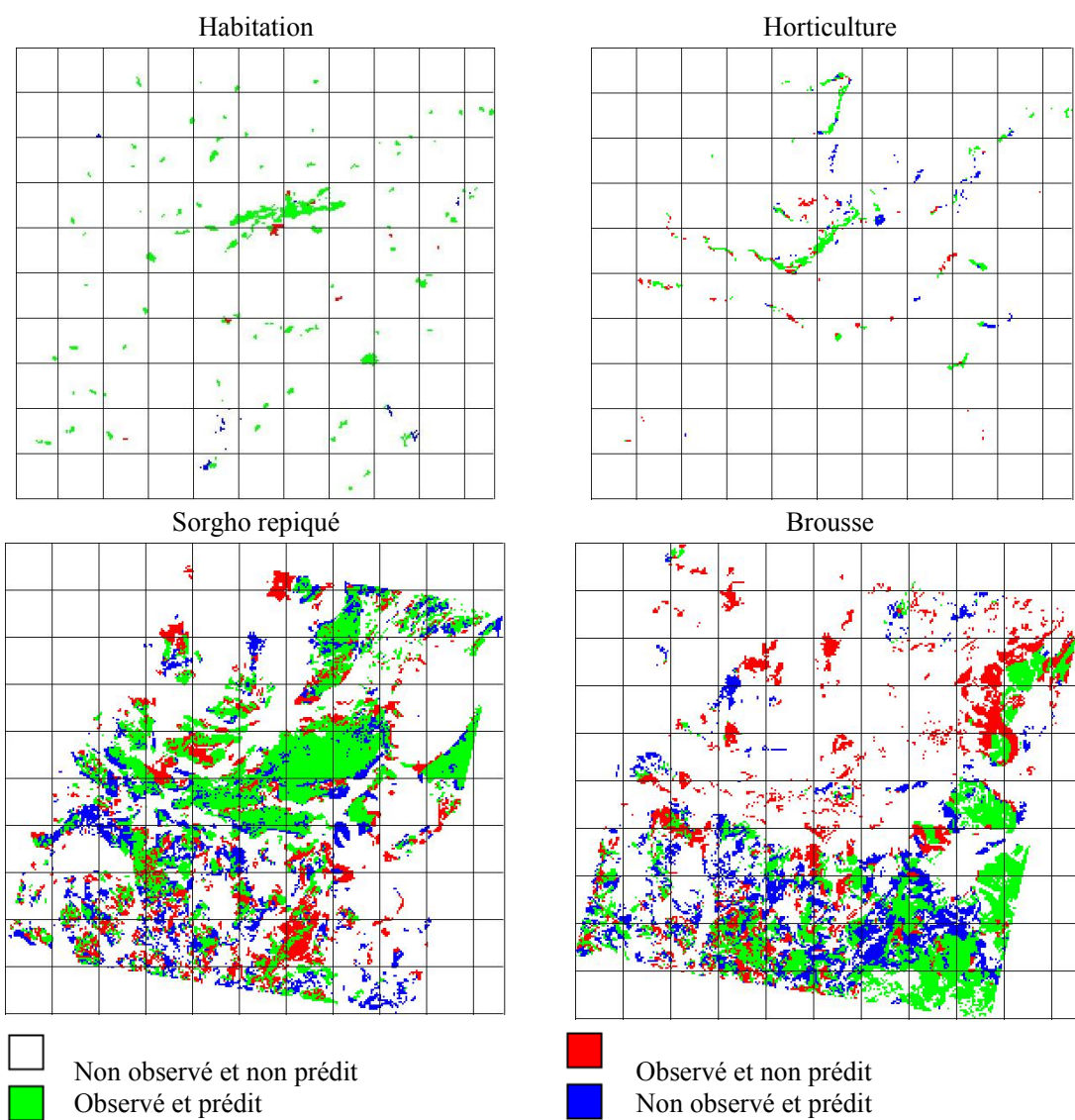


Figure 10.8 : Carte de localisation des prédictions correctes et des erreurs de prédiction pour les utilisations de l'espace.

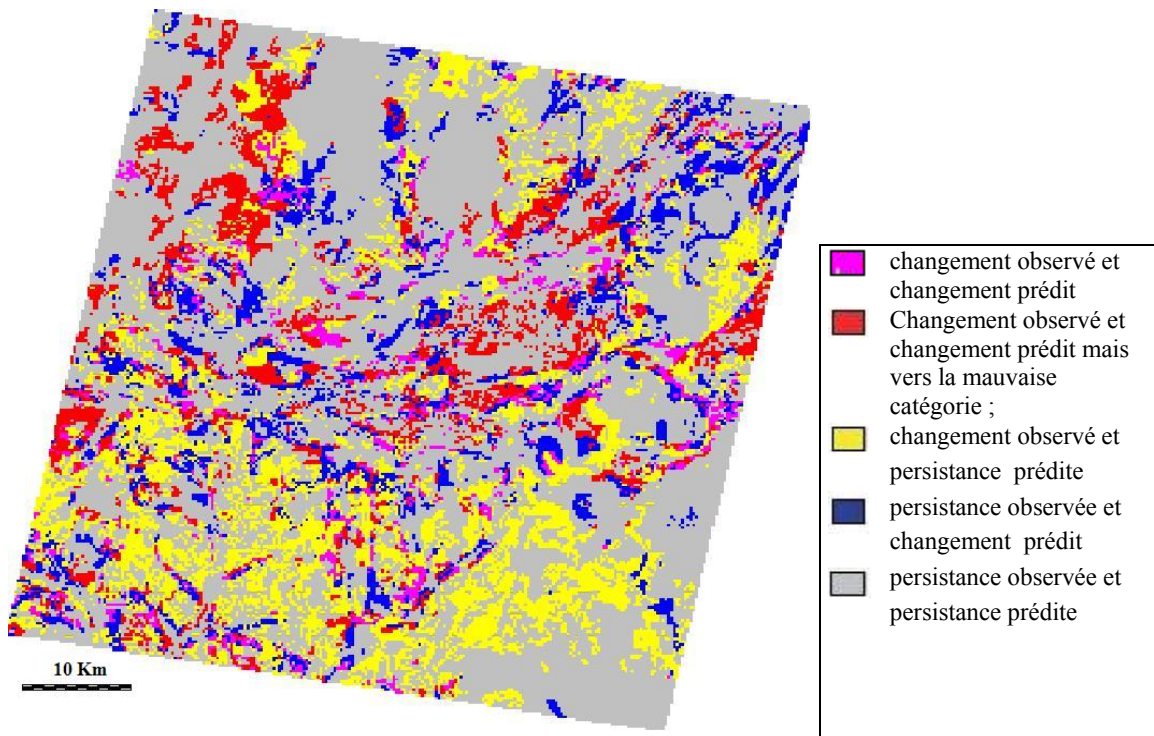


Figure 10.10 : Superposition des cartes de références (1987, 1999) et de la carte de prédiction en 1999.

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.

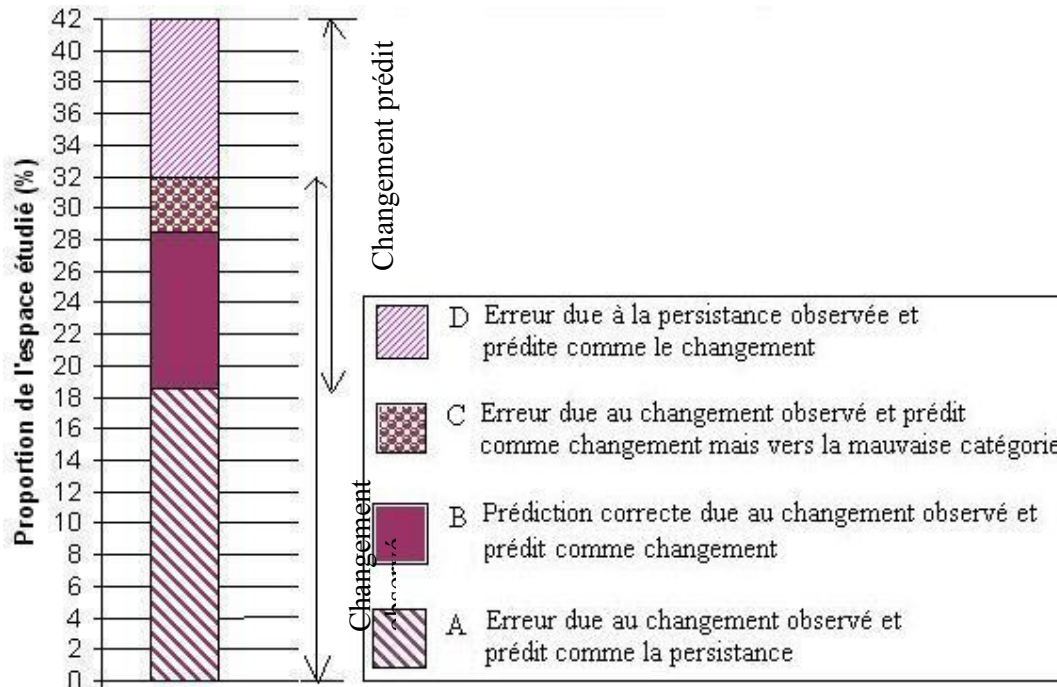


Figure 10.11 : Proportion des pixels correctement prédits et des sources d'erreur du modèle.

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%.

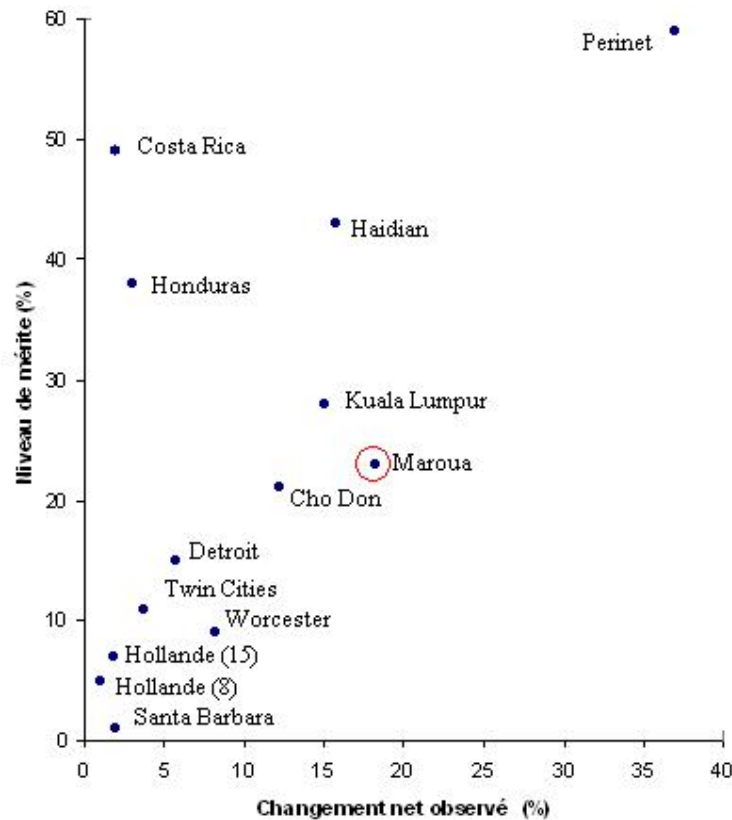


Figure 10.12 : Relation entre le niveau de mérite et la proportion de changements observés.

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.

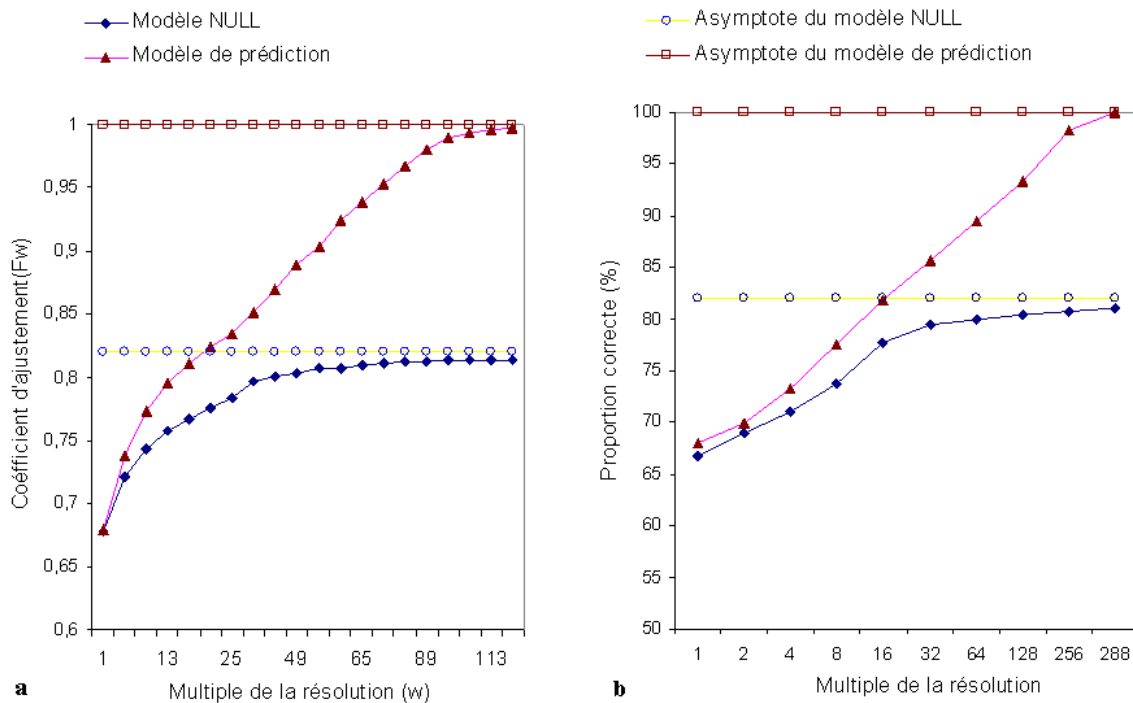


Figure 10.13 : Comparaison des performances du modèle de prédiction avec le modèle nul à plusieurs résolutions. a) proportion de pixels correctement prédits ; b) coefficients de similarité des structures entre la carte observée et prédite.

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.

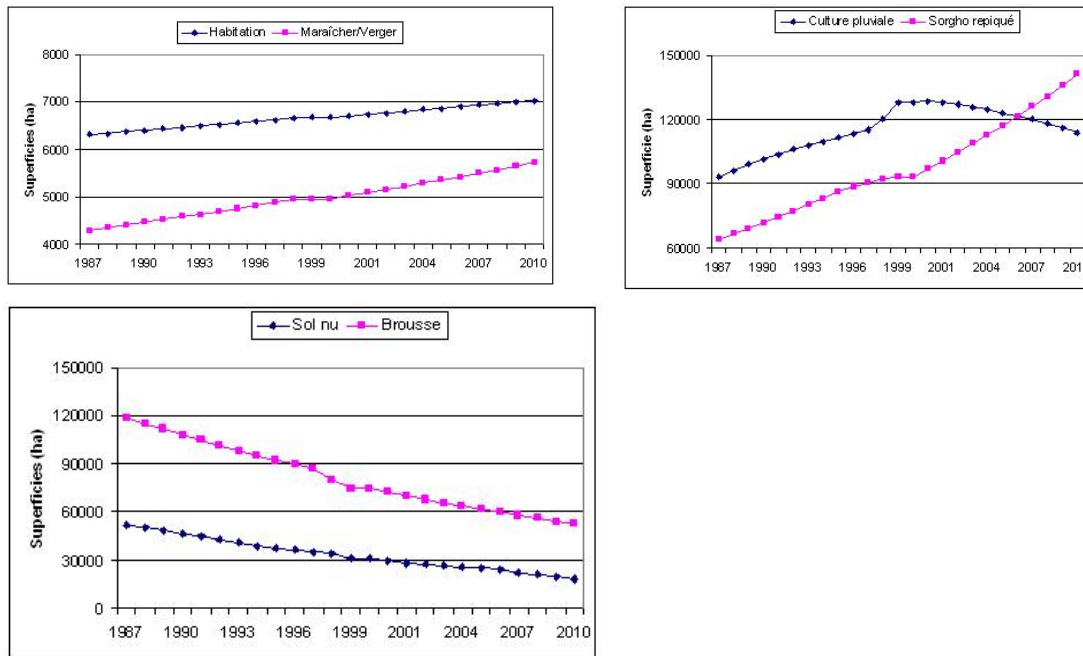


Figure 10.14 : Evolution des superficies des 6 types d’utilisation de l’espace pour le scénario 1. La partie de la courbe entre 1987 et 1999 représente la tendance observée et la partie entre 1999 et 2010 représente la tendance prédite.

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.

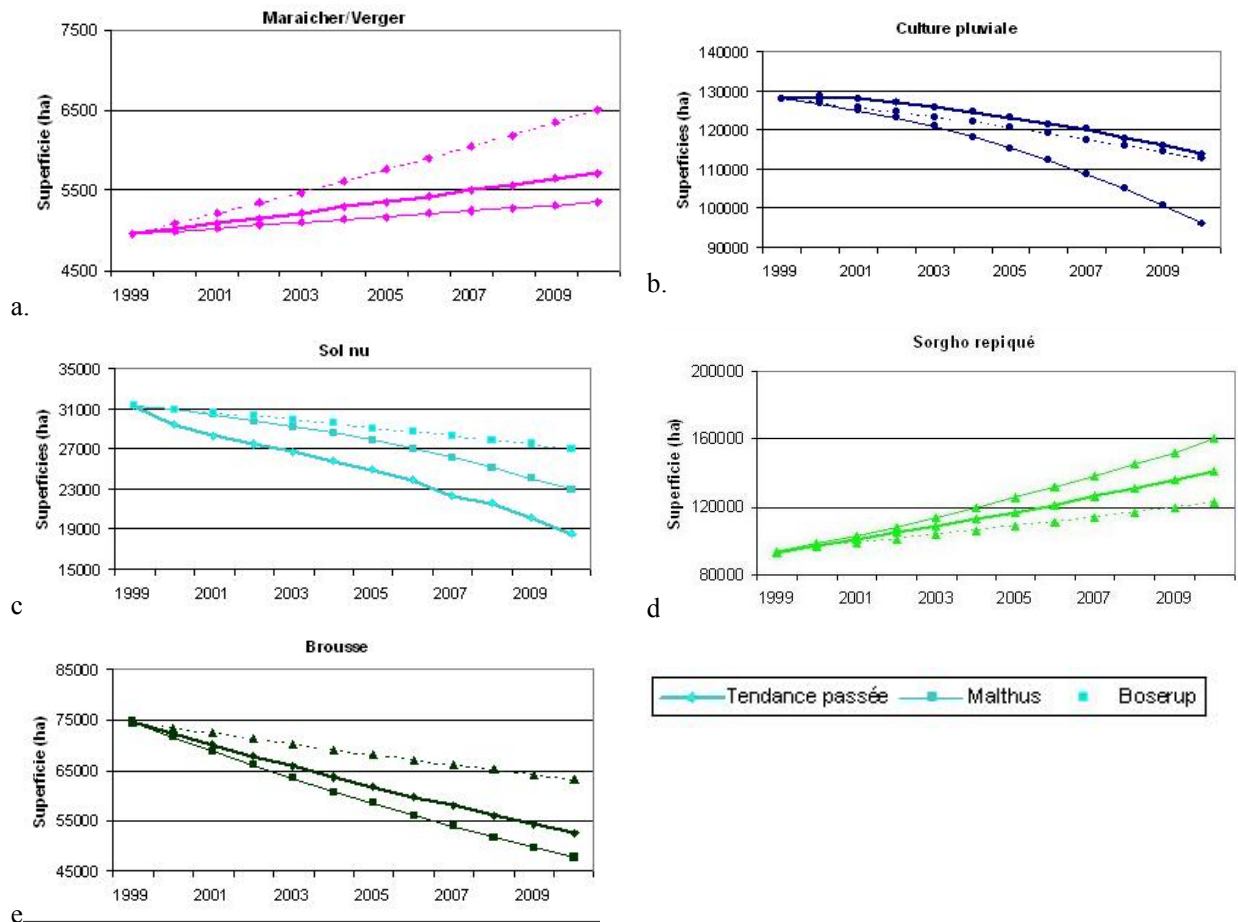


Figure 10.15 : Evolution des superficies des différents types d'utilisation de l'espace pour les trois scénarios.

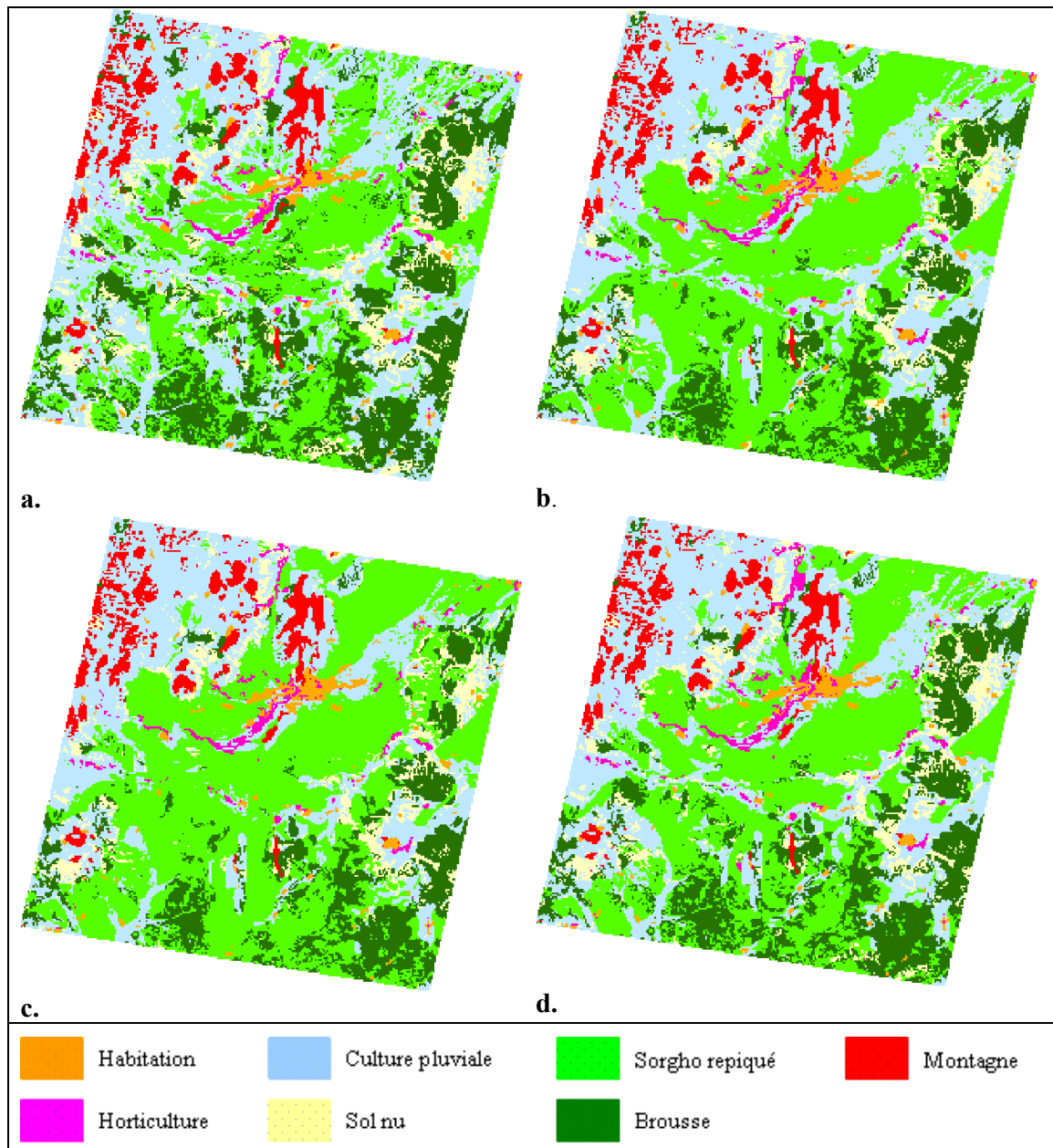


Figure 10.16: Cartes prédites de l'utilisation de l'espace en 2010. a) Cartes d'utilisation de l'espace en 1999 obtenue par analyse d'image, b) carte prédite pour le scénario 1 considérant une continuation des tendances passées, c) pour le scénario 2 considérant une trajectoire malthusienne et d) pour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



Photo 11. Un exploitant agricole du village de Mowo, entrain de conditionner la récolte d'oignon, avant de l'acheminer sur le marché.

Chapitre 11. Conclusion générale et perspectives

Ce dernier chapitre est consacré à une discussion de l'ensemble des résultats d'ordre méthodologique et substantiel qui découlent des recherches menées dans cette thèse. La section suivante rappelle le contexte de réalisation de ce travail et les enjeux liés au développement des méthodes d'analyse et de conception des Systèmes d'Information sur l'Environnement (SIE). La section 2, consacrée aux résultats d'ordre méthodologique, donne un aperçu de la démarche d'analyse et de conception du SIE SMALL Savannah qui a été développé dans le cadre de ce travail de recherche. La section 3 décrit les résultats substantiels utilisables en faveur du développement de la zone d'étude. La section 4 présente quelques limites de l'étude qui devraient orienter les travaux de recherche futurs.

11.1. Enjeux et spécificités des Systèmes d'Information sur l'Environnement

11.1.1. Enjeux liés au développement des Systèmes d'Information sur l'Environnement

L'idée de la recherche restituée dans cette thèse est partie d'un constat sur les difficultés d'application des méthodes d'analyse et de conception des SI existantes pour le développement des SIE qui sont en évolution croissante. On a assisté au cours des deux dernières décennies à la mise en place de nombreux projets internationaux visant à développer des Systèmes d'Information le plus souvent sous la dénomination d'observatoires environnementaux. Le présent travail de recherche a été initié dans le cadre du projet Système d'Information Multimédia sur l'Environnement en Afrique Subsaharienne (SIMES) qui avait pour objectif de développer des méthodes et techniques informatiques pour soutenir la constitution d'un réseau cohérent d'observatoires environnementaux interconnectés à travers Internet (Derniame, 1998). La nécessité de travailler sur un exemple concret d'observatoire nous a conduit à réaliser cette recherche dans le cadre du Pôle Régional de Recherche Appliquée au Développement des Savanes d'Afrique Centrale (PRASAC). Un des principaux objectifs du pôle est de mettre en place un observatoire du développement dans la zone des savanes d'Afrique centrale. Un enjeu majeur du développement rural dans cette région est la croissance rapide de la population qui induit, une pression importante sur les terres agricoles et pastorales avec de nombreuses mutations dans les systèmes d'utilisation de l'espace. Dans ce contexte les fonctions de l'observatoire régional du développement sont entre autre le suivi et l'analyse des filières agricoles, l'analyse des dynamiques d'utilisation de l'espace et des ressources naturelles, le suivi des exploitations agricoles et l'évolution des stratégies des producteurs. Malgré l'intérêt croissant manifesté pour les SIE, les méthodes qui ont été conçues pour le développement d'applications de gestion simples restent inadaptées à cette nouvelle génération de SI. Certaines méthodes ont été proposées ou adaptées pour le développement des SIG. Celles-ci font référence uniquement aux problématiques spatiales qui caractérisent ces systèmes. Il existe donc très peu de travaux consacrés à la conception des SIE qui se caractérisent par des objectifs spécifiques et une vision plus globale de l'information environnementale. Plusieurs spécialistes assimilent souvent les SIG aux SIE, pourtant il existe une différence fondamentale qu'il est important de faire dans ce contexte. Cette thèse contribue à la définition et à la spécification de la structure des SIE que nous considérons comme une étape préalable à la proposition de toute méthode de conception adaptée. Le travail de recherche initié dans cette thèse a donc un double objectif : spécifier un modèle de Système d'Information sur l'Environnement et mettre en oeuvre une application utilisable dans le cadre d'un observatoire du développement. Etant donné la multiplicité

des méthodes existantes et leur degré de maturité (Bouzeghoub et al., 1997), le but de ce travail n'était pas de proposer une nouvelle méthode mais des éléments susceptibles de contribuer à l'adaptation et l'enrichissement des méthodes existantes de manière à prendre en compte les spécificités des SIE.

11.1.2. Spécificités des SIE et démarche de conception

L'étude s'est focalisée sur le cas spécifique des zones de savanes de l'Extrême Nord du Cameroun où on a observé au cours des deux dernières décennies, de nombreuses transformations des paysages agraires impulsées par la forte pression démographique et l'importante mobilité humaine. Ces dynamiques ont conduit dans plusieurs cas à une saturation foncière et à une compétition plus accrue entre les formes d'utilisation de l'espace. Le Système d'Information développé pour ce cas et dénommé SMALL Savannah est un ensemble de concepts, méthodes, outils et données permettant de caractériser la structure et explorer les dynamiques du système d'utilisation de l'espace, en référence aux problèmes environnementaux et de développement auxquels font face les communautés rurales de la zone d'étude. A la fin de cette étude, un constat important qui se dégage c'est que l'une des préoccupations majeures dans l'analyse ou la gestion des questions environnementales est le plus souvent lié aux changements d'utilisation de l'espace comme la déforestation, l'érosion ou la dégradation des sols, la perte de la biodiversité et l'intensification agricole. Le choix de SMALL Savannah est à ce titre un exemple représentatif pour illustrer les problèmes posés par l'analyse des systèmes environnementaux et le développement des SI adaptés.

Au chapitre 2, un modèle de représentation des systèmes d'utilisation de l'espace a été décrit et met en exergue les relations entre l'occupation du sol, l'utilisation de l'espace, et les facteurs déterminants d'ordre biophysique et socio-économique à différentes échelles. De cette représentation se dégagent plusieurs spécificités qui caractérisent ces systèmes environnementaux. On peut citer entre autre la multiplicité des facteurs déterminants, l'importance de l'espace qui est le support des différentes interactions, la multiplicité des échelles auxquelles opèrent les processus, le caractère non linéaire des dynamiques. De plus, les utilisateurs des Systèmes d'Information sur l'Environnement sont de nature diverse (chercheurs, gestionnaires de l'espace, populations locales) et leurs besoins variés. Ceux-ci sont le plus souvent intéressés d'une part, par les facteurs qui motivent ou contraignent les activités humaines liées à l'utilisation de l'espace et d'autre part, par les facteurs biophysiques qui sont directement responsables des changements d'occupation du sol et d'utilisation de l'espace. Les données nécessaires pour représenter ces phénomènes environnementaux et prendre en compte ces propriétés sont également hétérogènes et complexes. Ceci exige de recourir à une diversité d'outils logiciels pour le stockage, le traitement et l'analyse (chapitre 3). Or, les méthodes de développement de SI conçues pour des applications plus simples ne sont pas adaptées pour répondre à ces nouveaux besoins de représentation et de compréhension des phénomènes complexes, d'interopérabilité entre plusieurs composants logiciels et d'ouverture du Système d'Information vers un public plus large.

Pour répondre à ces exigences, cette thèse a proposé une démarche interdisciplinaire qui a été mis en oeuvre pour la conception et la réalisation du SIE SMALL Savannah. Cette démarche qui s'articule autour des approches d'analyse spatiale, d'analyse systémique et de modélisation dynamique, couvre les trois principales phases d'une méthode classique de conception et de développement d'un SI à savoir l'analyse préalable du système réel (chapitre 5), la conception du système d'information organisationnelle et informatisée (chapitre 6), l'implémentation et la mise en œuvre des applications (chapitres 7 et 8). De plus, des aspects supplémentaires à intégrer explicitement à chaque phase sont proposés afin de prendre en compte les spécificités des SIE. Le chapitre 2 décrit la manière dont

l'espace est pris en compte à chaque étape de la démarche. Le chapitre 3 décrit les méthodes et outils logiciels utilisés pour l'implémentation de SMALL Savannah. Le chapitre 4 présente le dispositif multi-échelle sur lequel repose le SIE. Les chapitres 9 et 10 décrivent deux applications qui illustrent l'importance de l'étape de modélisation des phénomènes dans la démarche de développement du SIE.

11.2. Résultats d'ordre méthodologique

Cette section donne un aperçu des points saillants de la démarche d'analyse et une discussion des résultats méthodologiques obtenus. Les spécificités des SIE présentées dans la section précédente sont abordées tour à tour et la manière dont elles sont prises en compte dans la démarche est décrite.

11.2.1. Prise en compte de l'espace dans la démarche de développement du SIE

Les données à gérer dans un SIE sont presque toujours localisées et il serait impensable de concevoir un SIE sans accorder une place importante à l'espace et par conséquent aux SIG. C'est ce qui justifie la confusion qui est le plus souvent faite entre SIG et SIE. On peut distinguer fondamentalement deux principales approches pour analyser les relations entre l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants. Ces approches déterminent la manière dont l'espace est pris en compte dans l'analyse. La première approche de type spatial part des structures d'utilisation de l'espace et cherche à les relier aux facteurs déterminants d'ordre socioéconomique et aux processus en jeu. La deuxième approche de type sociale commence par l'analyse du processus de prise de décision et du comportement des acteurs en relation avec l'utilisation de l'espace et cherche ensuite à les relier au contexte spatial. Dans la démarche de conception de SMALL Savannah, la première approche a été suivie tout en explorant les possibilités d'intégration des données et informations issues de la deuxième approche. Les méthodes et techniques utilisées dans cette démarche combinent la télédétection, les SIG, et les outils d'analyse statistique avec les approches d'analyse de paysage, des systèmes agraires et de l'environnement socio-économique. La distinction faite entre l'occupation du sol et l'utilisation de l'espace est fondamentale pour comprendre le principe de cette démarche qui est illustrée par la figure 11.1. On constate que le point de départ de l'analyse repose sur la structure et les changements d'occupation du sol, qui sont ensuite reliés aux processus de changement d'utilisation de l'espace.

La méthode de cartographie proposée combine les techniques de traitement d'images aux interviews semi-structurés et à la cartographie participative. La cartographie participative s'avère plus réaliste pour appréhender les processus qui opèrent dans l'espace. Elle se trouve également moins coûteuse et plus pertinente que la cartographie classique pour réaliser des cartes d'utilisation de l'espace sur des petites régions. Contrairement à la cartographie participative classique, cette approche fournit des cartes d'utilisation de l'espace qui peuvent être facilement géoréférencées et autoriser en même temps une importante flexibilité pour reconstruire l'historique des changements d'occupation du sol et identifier les facteurs déterminants.

Les couches d'information produites sont intégrées dans le SIG avec les données sur les facteurs déterminants. Le croisement des couches d'information et l'interprétation à la lumière d'autres connaissances issues des enquêtes ou de la revue de la littérature fournissent une meilleure compréhension des conséquences des changements et les stratégies que les acteurs mettent en place. Des hypothèses sur les facteurs déterminants et les processus peuvent être formulées sur la base de ces connaissances empiriques et des théories de changement d'utilisation de l'espace existantes (chapitres 5, 7 et 8). L'analyse spatiale permet de construire des variables spatiales qui représentent au mieux les phénomènes étudiés en s'appuyant sur les hypothèses formulées. Les structures d'utilisation de

l'espace sont reliées explicitement aux facteurs sociodémographiques et géoéconomiques et les relations quantifiées. On arrive ainsi à confirmer ou révéler des liens de causalité possibles qui gouvernent la structure et les changements d'utilisation de l'espace (chapitre 9). Ces informations sont utilisées pour simuler les processus de compétition entre les différentes utilisations de l'espace et explorer leurs dynamiques spatiales (chapitre 10).

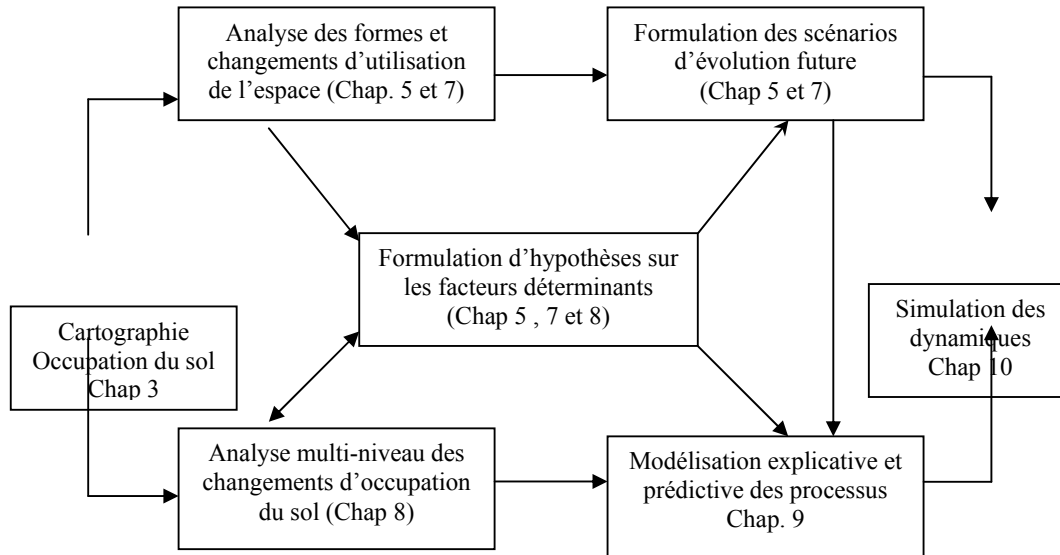


Figure 11.1 : Aperçu de la démarche d'analyse des dynamiques agraires suivie dans cette thèse. Une flèche indique le sens du flux d'information d'une étape vers la suivante.

11.2.2. Prise en compte de la multiplicité des échelles dans la démarche de développement du SIE

Les questions d'échelle sont très importantes et omniprésentes dans presque toutes les applications environnementales. Une attention particulière devrait y être apportée au cours des différentes phases du développement des SIE. Le chapitre 4 met en évidence l'intérêt de prendre en compte explicitement les différentes échelles auxquelles opèrent les processus lorsqu'on s'intéresse à l'analyse des dynamiques d'utilisation de l'espace. Les questions se posent en terme d'identification et de choix d'échelles appropriées pour l'observation, l'analyse ou pour la représentation des données et en terme d'articulation entre ces différentes échelles.

Les questions d'échelles et d'espace sont très liées et la manière dont l'espace est pris en compte influence fortement la manière de prendre en compte la multiplicité des échelles. Les approches spatiales explicites se focalisent d'abord sur les caractéristiques du système d'utilisation de l'espace au niveau régional avant de les relier aux processus qui opèrent au niveau local (figure 11.2). Les analyses portent en général sur un site de vaste étendue où l'on s'intéresse aux questions relatives au taux de changement d'occupation du sol, à la localisation et à l'organisation spatiale des changements actuels et futurs, ainsi qu'aux facteurs environnementaux et socio-économiques qui expliquent ces changements. Par contre, les approches sociales mettent d'abord l'accent sur les micro-structures des acteurs et leurs interactions avant de les relier aux processus régionaux. Dans ce cas, les analyses portent en général sur de sites de petite étendue (terroir ou village), où on s'intéresse aux motivations, contraintes et relations entre acteurs qui déterminent les changements d'utilisation de l'espace (Njomaha, 2004 ; Réounodji, 2003 et AnkoGuy-Mpoko, 2002).

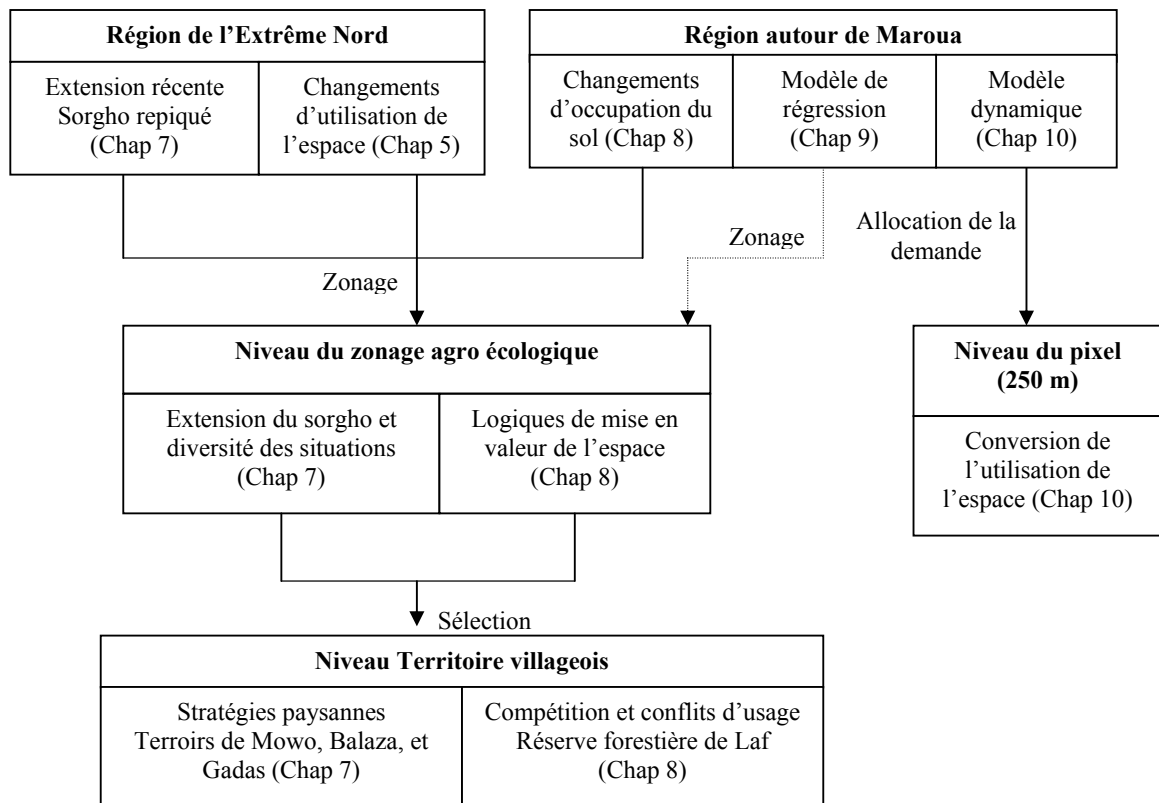


Figure 11.2 : Aperçu de la multiplicité des échelles prises en compte dans la démarche. Les cases indiquent les différents niveaux d'échelle et les processus analysés, une flèche indique une articulation entre deux niveaux.

L'approche utilisée pour le développement de SMALL savannah est de type spatial explicite. La figure 11.2 montre comment la multiplicité des échelles d'opération des processus d'utilisation de l'espace est prise en compte dans les différentes phases de développement du SI. Le changement d'échelle d'analyse se fait principalement du niveau régional au niveau local (sens des flèches). A chaque niveau correspond un processus de changement d'utilisation ou une problématique spécifique. Les exemples d'applications de l'analyse à plusieurs niveaux ont été présentés dans les chapitres 7, 8 et 10. Au chapitre 7, l'analyse multi échelle de l'extension de la culture du sorgho de contre saison permet de voir comment un processus d'une ampleur régionale, se traduit au niveau local et quelles sont les stratégies que les producteurs adoptent face aux différentes mutations. Au chapitre 8, l'analyse multi niveau des changements d'occupation du sol a permis de mettre en exergue la diversité des situations et des logiques d'utilisation de l'espace. Le processus régional de d'extension de la culture du sorgho impulsé par la demande au niveau régional a été relié à ses conséquences au niveau local en terme de pratiques et de stratégies d'utilisation de l'espace. Au chapitre 10, le modèle dynamique développé intègre plusieurs formes d'articulation et d'interaction entre échelles régionales et locales. Un exemple est la procédure d'allocation des changements qui prend en compte la demande régionale et utilise les contraintes d'aptitudes à l'échelle locale pour affecter les utilisations au niveau du pixel. L'incorporation dans le modèle de facteurs qui agissent sur de larges distances permet également de prendre en compte les processus qui opèrent à différentes échelles.

11.2.3. Contribution des étapes de modélisation dans la démarche de développement du SIE

L'exemple étudié dans cette thèse montre que les SIE dépassent le plus souvent le cadre des applications de gestion et intègrent des applications d'aide à la décision et à l'aménagement de l'espace qui, exigent aux concepteurs et aux utilisateurs une meilleure compréhension des interactions et dynamiques complexes. La modélisation et la simulation dynamique se présentent dans ce contexte comme des outils indispensables dans le cycle de vie du SIE. Comme le montre la figure 11.3, les différentes étapes de la modélisation des processus étudiés fournissent aux différents utilisateurs (gestionnaires de l'espace, chercheurs, etc.) les informations permettant d'améliorer chacune des fonctions du SIE. Ces fonctions étant notamment l'observation de l'environnement, la gestion de l'information environnementale, l'analyse et la prévision des phénomènes en vue d'une meilleure prise de décision. La modélisation devrait être prise en compte dans chacune des phases et étapes de la démarche de développement du SIE notamment l'analyse, la conception et la mise en oeuvre. Pendant l'analyse préalable de SMALL Savannah, les modèles descriptifs sont utilisés pour décrire la structure du système d'utilisation de l'espace et les trajectoires de changements en s'appuyant sur une confrontation entre les théories existantes et les connaissances empiriques obtenues par revue de la littérature, observation et entretien sur le terrain. Dans la phase de conception, le choix des variables spatiales explicites incluses dans les modèles de prédiction s'appuie également sur les théories existantes. Les modèles mathématiques et les modèles de régression de type spatiaux sont utilisés pour expliquer et prédire les processus étudiés. Pendant la mise en oeuvre du système (application), le modèle dynamique développé est ensuite utilisé pour simuler les dynamiques spatiales et explorer les trajectoires d'évolution possible du système. La figure 11.3. illustre ces différentes étapes du processus de modélisation (à droite) et leur contribution aux tâches du SIE (à gauche). Le flux d'information et les rétroactions illustrent comment la modélisation permet de passer successivement du paysage produit par un système de gestion vers différents modèles (modèles spatiaux, modèles de prédiction et modèles dynamiques). On arrive ainsi à représenter et mieux comprendre la réalité en vue d'une meilleure gestion de l'utilisation de l'espace. Le processus de modélisation part du paysage réel qui est produit par un mode de gestion de l'espace donné. L'étape de cartographie permet de produire des données spatiales représentant les phénomènes observés dans le paysage. Les mesures effectuées sur les données spatiales (validation) renseignent sur la nature des phénomènes observés et sur les erreurs de perception de la réalité (chapitre 3). Les étapes de modélisation explicative ou dynamique donnent l'occasion au modélisateur d'apprendre sur la structure du système et la nature des changements. L'étape de validation (mesures sur les résultats de prédiction et les données) dans le processus de modélisation permet de mieux comprendre le fonctionnement du modèle et de la réalité. Au chapitre 10, on a vu que les résultats de validation du modèle peuvent aider à identifier les zones où la cartographie ne permet pas de mieux capturer la réalité. Finalement, les résultats de l'analyse des scénarios peuvent être utilisés par le gestionnaire de l'espace et les autres acteurs pour modifier la structure et les fonctions du paysage.

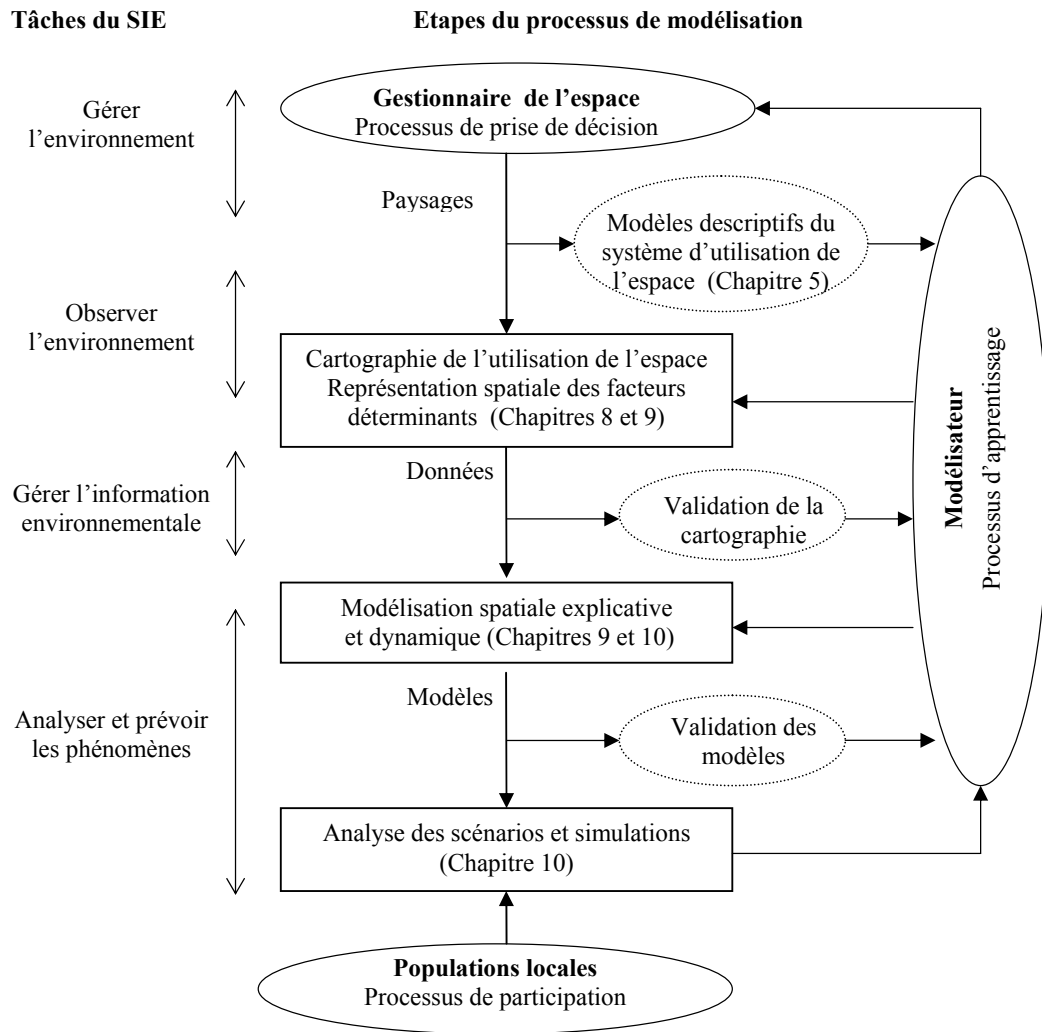


Figure 11.3. Diagramme illustrant la contribution de la modélisation au développement du SIE. Les formes ovales en traits tirés indiquent les étapes du processus d'apprentissage et les formes ovales en traits continus indiquent les principaux utilisateurs du modèle développé.

11.2.4. Intégration de plusieurs outils logiciels pour l'implémentation du SIE

Les systèmes environnementaux présentent des caractéristiques complexes qui posent le problème de la multiplicité et de l'intégration des logiciels. Contrairement aux SI classiques où la grande partie du SI est

en général informatisable, plusieurs tâches nécessitent une expertise dans le domaine de l'environnement du fait de la complexité des thèmes et la délicatesse des interprétations. Par conséquent, la plupart des outils informatiques développés sont essentiellement des outils d'analyse et très peu d'importance est accordée à l'interface Homme-Machine. Compte tenu de la diversité et de la complexité des données environnementales manipulées, leur stockage, traitement et analyse font appel à une large gamme d'outils logiciels spécialisés tels que les SIG, les SGBD, les logiciels de traitement d'images, les modules d'analyse statistique, les systèmes experts, les plate-formes de simulation, etc. La conception et l'implémentation d'un Système d'Information sur l'Environnement doit le plus souvent intégrer plusieurs de ces outils qui ont chacun une contribution spécifique à la finalité de l'ensemble du système (chapitre 3).

L'application SMALL Savannah est en ce sens un véritable SIE tel que défini par les premiers travaux sur les applications de l'informatique à la spécification des observatoires environnementaux (Gayte et al., 1997; Derniame, 1998). Ce système intègre trois principaux modules : 1) un module d'observation et d'analyse spatiale qui repose sur un SIG et permet la représentation des phénomènes à partir des données géographiques de sources variées, 2) un module d'explication et de prédiction qui repose sur un logiciel d'analyse statistique et permet d'expliquer la structure et les dynamiques d'utilisation de l'espace et 3) un module de simulation dynamique qui permet d'explorer les trajectoires des changements d'utilisation de l'espace. Les outils et méthodes utilisés pour le développement de SMALL Savannah ont été décrits au chapitre 3. L'étape de mise en œuvre montre que plusieurs tâches nécessitent une expertise pour interpréter les résultats et faire des choix pour les tâches suivantes. L'intégration des logiciels d'application et le développement des interfaces Homme-Machine pour les SIE exigent une analyse préalable pour identifier les besoins prioritaires de communication et spécifier les structures de données à échanger, ainsi que les composants logiciels qui devront assurer le contrôle des données et leur stockage.

11.3. Résultats mobilisables en faveur du développement rural

On peut distinguer deux principaux types de résultats substantiels issus de cette recherche et qui sont utilisables pour un développement de la zone d'étude. Le premier type concerne les connaissances produites lors de l'analyse préalable du système réel (chapitre 5) ou par les applications de SMALL Savannah développées. Le deuxième type de résultat concerne les données et les outils logiciels qui peuvent être exploités à d'autres fins (les bases de données, les outils de simulation et d'exploration des dynamiques agraires).

11.3.1. Connaissances sur la structure et les dynamiques du système d'utilisation de l'espace

La figure 11.4 illustre la succession de connaissances thématiques produites à l'issue de la mise en œuvre du SIE SMALL Savannah. Ces connaissances portent principalement sur les structures et dynamiques agraires à différentes échelles, les relations entre l'utilisation de l'espace et facteurs déterminants, et les dynamiques spatiales correspondant aux différentes trajectoires d'évolution des changements.

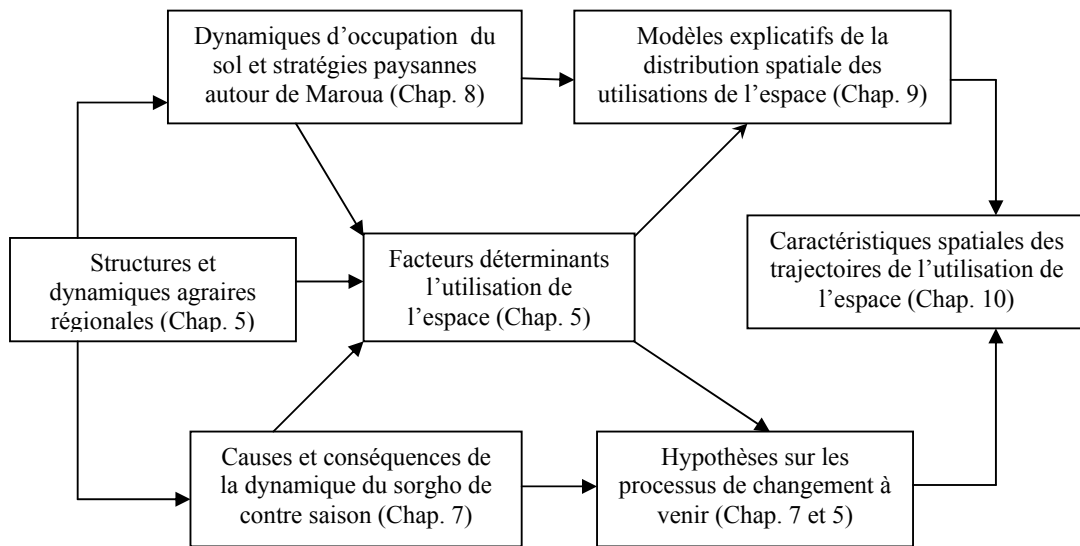


Figure 11.4. Succession des résultats thématiques produits par l'analyse et la mise en œuvre du SIE SMALL Savannah. Les flèches indiquent que l'information au départ de la flèche est utilisée pour produire l'information à l'arrivée.

Principales dynamiques agraires aux échelles régionales et locales

Les données et informations produites par SMALL Savannah fournissent un état des lieux de l'occupation du sol, de l'évolution des différentes formes d'utilisation de l'espace et des facteurs déterminants potentiels (chapitres 5, 7 et 8). Ces connaissances constituent une base importante utilisable pour identifier les thèmes prioritaires et les échelles d'action appropriées dans le cadre de tout projet de développement orienté vers l'utilisation et la gestion durable de l'espace. Les grandes dynamiques agraires de la zone d'étude se présentent comme une conséquence de la croissance démographique, combinée avec la diversité et de la dynamique du peuplement humain. L'expansion agricole a été identifiée comme un processus central qui présente d'importantes interactions avec, les dynamiques du système d'élevage et d'approvisionnement en bois de feu. Les aires protégées sont également soumises à des évolutions qui dépendent de ces processus. L'activité de pêche dans les zones inondables a connu une nette augmentation avec une forte généralisation des canaux de pêche, cette évolution soulève le problème de partage de l'espace avec l'élevage. Une première réflexion a été initiée sur l'ensemble de ces interactions qui devraient être étudiées de façon plus détaillée et prises en compte dans le cadre de toute intervention dans le milieu rural de cette région (chapitre 5). Une analyse des interactions entre les différents groupes d'utilisateurs et d'acteurs est également nécessaire dans cette perspective. L'étude spécifique menée sur la culture du sorgho de contre saison a permis de mettre en exergue son rôle central dans le maintien de la sécurité alimentaire et ses interactions avec les autres formes d'utilisation de l'espace. L'analyse multi-niveau a permis d'explicitier la diversité des situations et de montrer quelles sont les stratégies paysannes face aux mutations liées à l'extension de la culture (chapitre 7). L'influence du comportement de l'élite urbaine, des autorités traditionnelles et des règles d'accès à la terre sur ces stratégies mérite des études plus approfondies. Un tel diagnostic devrait fournir des éléments pour initier des actions allant dans le sens de l'accompagnement des producteurs. Les études spécifiques menées à l'échelle locale (territoire villageois) ont permis de contribuer à construire deux problématiques régionales qui méritent des études complémentaires et des

actions concrètes (chapitre 8). La première concerne l'occupation ou l'utilisation anarchique des aires protégées par les populations riveraines pour l'agriculture ou pour l'alimentation du bétail. La deuxième est relative à la gestion durable de l'espace dans les zones interstitielles entre villages encore appelées brousses. En effet, ces espaces sont le siège de la plupart des dynamiques de défrichement des savanes boisées pour l'extension agricole, pour l'approvisionnement en bois ou l'alimentation du bétail. Ce sont également sur ces espaces que se posent avec plus d'acuité les problématiques d'appropriation foncière.

Interactions entre l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants

Une exploration de l'ensemble des facteurs déterminant les changements d'utilisation de l'espace a été réalisée sous forme de revue de la littérature et des données secondaires à l'échelle régionale (chapitre 5). Ce travail a permis d'émettre des hypothèses sur les interactions possibles entre chaque facteur et la structure ou les changements d'utilisation de l'espace. Compte tenu des contraintes liées à la disponibilité des données sur l'ensemble de la région, une analyse quantitative a permis d'identifier et évaluer ces relations de façon spatiale explicite sur une zone autour du principal centre urbain de la région (chapitre 9). Les résultats de l'analyse spatiale et quantitative indiquent que chaque utilisation a son propre ensemble de facteurs déterminants qui change d'une utilisation à l'autre. L'accessibilité au principal centre urbain, les potentialités des terres agricoles et la pression humaine sur l'espace évaluée à partir d'un indice de population potentielle expliquent mieux les structures et les changements. Les connaissances détaillées fournies par cette analyse peuvent être utilisées comme hypothèse de départ pour une étude sur un thème spécifique. Sur le plan pratique, il est important pour tout projet de développement qui intervient dans la gestion de l'espace de connaître sous quelles conditions s'établissent les différentes formes d'utilisation de l'espace. Cette caractérisation du système d'utilisation de l'espace et de ses variations spatiales en fonction des conditions biophysiques, sociodémographique, géoéconomique et politique est donc d'une importance essentielle pour un développement rural durable. Les hypothèses formulées pour les développements futurs envisagent que les dynamiques vont continuer à dépendre de ces facteurs mais davantage de l'implication des acteurs urbains et de l'investissement que les acteurs locaux vont consentir pour l'aménagement et la gestion de l'espace. Les simulations effectuées pour la période 1999-2010 indiquent les zones où des changements peuvent survenir, offrant ainsi la possibilité d'évaluer l'impact d'une politique donnée de gestion et d'utilisation de l'espace.

11.3.2. Les outils logiciels et les bases de données développés

Les outils logiciels et les bases de données issus de cette recherche peuvent être mis au service des chercheurs et acteurs impliqués pour contribuer à des projets de recherche et des actions de développement orientés vers la gestion et l'utilisation de l'espace. Il s'agit notamment de la base de données portant sur l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants potentiels et le modèle simulation développée. L'extension de cette base de données spatiale explicite avec des données socio-démographiques et des données concernant les processus d'intensification est requise pour les études ultérieures sur les changements d'utilisation de l'espace. L'expérience menée dans le cadre de cette thèse montre que la combinaison des outils de cartographie classique avec la cartographie participative à différentes échelles peut aider à résoudre le problème du manque de données observé dans les régions de savanes d'Afrique. Il s'agit d'impliquer les différents acteurs dans la production de l'information dont ils devraient s'approprier dans la perspective d'une contribution active à la gestion de l'espace.

Le modèle de simulation se présente également comme un outil approprié pour un observatoire des dynamiques agraires et du développement rural. Il peut être utilisé par les scientifiques et les acteurs impliqués dans la planification pour la prise de décision et une gestion adaptative de l'espace. Une utilisation peut également être envisagée avec les acteurs locaux pour susciter les discussions et préparer la concertation ou la négociation dans le cadre de démarches participatives d'utilisation et de gestion de l'espace. Les résultats du modèle peuvent être utilisés par les scientifiques pour tester des hypothèses sur les trajectoires du système d'utilisation de l'espace. Un exemple d'utilisation consisterait à comparer les résultats du modèle avec ceux des travaux de Njomaha (2004) qui s'est également appuyé sur les trois théories de Malthus, Boserup et Von Thünen pour caractériser les dynamiques agraires au niveau de 20 villages de la région de l'Extrême Nord du Cameroun. Parmi ces sites seuls deux se retrouvent dans la zone étudiée (Meskine et Laf). La perspective d'appliquer le modèle à l'ensemble de la région permettrait une comparaison plus fine des résultats de simulation avec ces résultats d'analyse socio-économiques et historiques à l'échelle des villages. Avec les structures chargées de la planification de l'utilisation de l'espace de la région, des scénarios peuvent être adaptés au contexte de la prise de décision. Les résultats des simulations pourront susciter la discussion autour de l'allocation des terres et assister ainsi dans les choix de zonage de l'utilisation l'espace. Cette forme d'utilisation peut être envisagée dans le cadre d'un observatoire des dynamiques agraires et du développement rural. Les institutions concernées au premier plan sont, les ministères de l'aménagement du territoire, de l'agriculture, de l'élevage, des forêts et de l'environnement. Une autre utilisation du modèle est envisageable dans le cadre d'une démarche concertée ou d'une démarche participative avec les acteurs locaux impliqués dans l'utilisation de l'espace pour évaluer l'impact de certaines mesures ou choix de gestion de l'espace. Les résultats de simulations peuvent être partagés avec les différents acteurs impliqués dans l'utilisation de l'espace pour préparer la concertation et la négociation autour des actions de développement. Différents scénarios peuvent être exécutés pour évaluer et analyser l'impact de leur choix de gestion ou d'aménagement. Un exemple concret concerne la création d'une forêt communautaire ou encore l'adoption des mesures de conservation d'une aire protégée. Les choix pourront être inclus dans la simulation comme des règles de gestion et les impacts pourront être appréciés dans l'espace. Une telle utilisation du modèle de simulation pourrait susciter de nombreux échanges, en particulier lorsque ces derniers ont participé à la cartographie de l'utilisation de l'espace. L'élaboration des scénarios d'évolution et leurs simulations proposent un cadre pour susciter la discussion autour de l'utilisation et la gestion de l'espace, le modèle devenant ici un objet intermédiaire de cognition collective.

11.4. Conclusions et orientations pour les travaux de recherche futurs

Les discussions des résultats présentés dans les deux sections précédentes mettent en exergue des limites et des possibilités d'amélioration du Système d'Information développé. Cette dernière section présente ces limites et dégage les perspectives de recherche ultérieures. Les principales leçons portent sur les aspects suivants: le changement et l'intégration des échelles, la modélisation intégrée, l'intégration des composants logiciels et la spécification formelle des SIE.

11.4.1. Le changement et l'intégration des échelles d'opération des processus environnementaux

Compte tenu des contraintes liées à l'indisponibilité des données, tous les résultats substantiels présentés dans cette thèse ne s'appliquent pas à l'ensemble de la région. La base de données de

SMALL Savannah devrait être étendue à l'ensemble de la région de l'Extrême Nord du Cameroun et mise à jour en intégrant des données relatives aux processus de changement d'utilisation de l'espace tel que les indicateurs d'intensification et d'investissement dans la gestion et l'aménagement de l'espace. L'application des questions de changement d'échelle n'a pas été abordée explicitement au chapitre 9 mais, les fonctions d'analyse spatiale du SIG y ont été par exemple utilisées pour dériver des variables représentant la pression humaine sur l'espace environnant et l'accessibilité aux centres urbains. Une technique de choix de la plage de résolution appropriée pour représenter les données d'utilisation de l'espace a été introduite. Elle s'appuie sur des agrégations spatiales successives suivies de la comparaison des structures d'utilisation de l'espace avec celles de la carte initiale. Les résultats indiquent qu'avec les résolutions de 250, 500 et 750 m, les structures de la carte initiale sont relativement bien conservées. Les modèles de régressions ont été développés pour une seule résolution (250 m). L'échelle de représentation des données et le changement de résolution pourraient affecter la modélisation de l'utilisation de l'espace dans la mesure où les pixels ne représentent pas des objets spatiaux, parcelles gérées individuellement. En effet, les relations quantifiées à une résolution donnée pourraient ne pas être valides à d'autres résolutions parce que d'autres facteurs pertinents seraient dominants à ces échelles. D'autre part, ces relations pourraient changer de nature à cause des interactions, des émergences, sociales notamment ou des effets d'agrégation des niveaux au-dessous du niveau d'analyse considéré.

L'analyse spatiale et statistique effectuée permet déjà d'inclure aussi bien les facteurs dominant à l'échelle locale comme l'aptitude des sols et les facteurs déterminants à l'échelle régionale comme l'accessibilité ou la pression humaine potentielle. Toutefois, une approche entièrement multi-échelle nécessiterait une meilleure compréhension des relations et interactions entre les facteurs déterminants et l'utilisation de l'espace aux différentes échelles (De Koning et al, 1998). Les perspectives d'amélioration des performances du modèle dynamique devraient également s'orienter vers l'analyse statistique au niveau des zones agroécologiques, et la prise en compte des relations spécifiques à chaque zone dans le modèle de simulation. La perspective d'application du modèle à l'ensemble de la région des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun soulève également des questions de changement d'échelle. Ce projet devra exiger l'acquisition de nouvelles données et une meilleure articulation entre le niveau régional, où se calcule la demande, le niveau des zones agroécologiques qui définissent les contraintes des différentes situations agraires et enfin, le niveau local d'allocation des changements.

11.4.2. Vers des approches de modélisation plus intégrée des systèmes environnementaux

L'approche de modélisation la plus appropriée pour l'analyse des systèmes environnementaux et le développement des SIE devrait être hybride ou intégrée en ce sens qu'elle tire profit de différentes approches (Lambin et al. 2003). Ce choix garantit une certaine flexibilité compte tenu de la diversité des thèmes abordés dans les SIE. L'intégration fait référence aussi bien aux approches, qu'aux thèmes abordés dans le système et aux échelles d'analyse.

Les limitations du modèle construit sont inhérentes aux techniques de SIG et télédétection. Comme la plupart des études qui utilisent les données des SIG, le modèle développé représente mieux les interactions de type biophysique (Gimblet, 1996). Les interactions humaines restent faiblement intégrées pour plusieurs raisons notamment les contraintes d'acquisition de certaines données spatiales

explicites, la difficulté de spatialiser certaines données (spatialiser le social) et le fait que la méthode de modélisation ne soit pas adaptée à la manière dont la variable influence l'utilisation de l'espace. Les dynamiques ne sont pas nécessairement linéaires et relèvent souvent du fait des difficultés et incertitudes liées à la définition, la délimitation et l'étude du fonctionnement des niveaux sociaux et spatiaux multiples, en intersection et interaction, et qui deviennent les lieux d'émergence de nouveaux processus collectifs. A titre d'exemple, les variables représentant les principales ethnies dominantes ont été calculées pour traduire l'influence de la composition sociodémographique sur l'organisation de l'espace et ses dynamiques d'utilisation qui est indéniable. Mais l'analyse statistique a fourni des relations non significatives et ces variables n'ont pas été incluses dans le modèle de simulation. Dans le modèle, on ne connaît qu'une résultante des changements et non des trajectoires individuelles ou de groupes. Les stratégies de mise en valeur de l'espace et les perceptions des acteurs qui sont pourtant multiples ne sont pas prises en compte, ce qui peut rendre les dynamiques difficiles à reproduire. De plus, les résultats des modèles de type spatio-statistique ne sont pas faciles à communiquer aux acteurs parce que les relations font référence aux unités spatiales plutôt qu'aux unités de gestion comme les individus, les ménages, les parcelles ou les exploitations. Il est donc nécessaire de développer des approches abordant mieux les acteurs et leurs activités dans le territoire, les réseaux sociaux qui se projettent dans l'espace et leurs interactions. L'association des phénomènes sociaux avec les dynamiques spatiales qu'ils gouvernent reste un défi majeur dans les sciences de gestion de l'espace. L'approche suivie dans cette thèse a principalement consisté à expliquer les dynamiques spatiales en les rapprochant des données socio-économiques (socialiser le pixel). La pixellisation du social, c'est à dire la spatialisation des aspects socio-économiques et culturelles liés à l'utilisation et l'aménagement de l'espace devrait conduire à mieux saisir les différents processus liés aux changements d'utilisation étudiés. Le modèle de Von Thünen par exemple dans sa formulation initiale était statique et non explicitement spatial. Mais, avec l'avènement et la maturation des SIG et des outils de simulation on commence à voir des applications proposant des formulations spatiales et dynamiques de cette théorie. Les résultats de l'exploration des facteurs déterminant les dynamiques menées au chapitre 9 ont confirmé les hypothèses concernant l'influence de l'accessibilité à la ville sur l'organisation spatiale de quelques utilisations de l'espace. Les travaux de modélisation ultérieurs devraient tirer profit des résultats du modèle de type inductif développé pour s'orienter vers un modèle qui intègre les aspects de raisonnement déductif (Overmars et al, 2006).

Une autre limite de l'utilisation du modèle développé pour la négociation et la concertation est liée au fait qu'il ne prend pas explicitement en compte la perception, la représentation et les décisions individuelles ou de groupes d'acteurs. Cette limite peut être comblée par une modélisation centrée individu qui est l'une des approches les plus utilisées pour la modélisation spatiale explicite des phénomènes écologiques. Cette approche repose sur deux principes : les organismes pris individuellement sont distincts physiologiquement et de par leur comportement à cause des influences génétiques et environnementales; les interactions entre individus, sont localisées de façon contextuelle, c'est-à-dire que les individus sont le plus souvent influencés par les individus voisins. Les avantages de cette approche incluent, la prise en compte des différences de comportement entre individus ou groupes, la simulation des décisions complexes opérées par les individus, l'émergence de décisions et stratégies collectives, enfin la prise en compte des interactions locales entre les individus et leur l'environnement. Les systèmes multi-agents fournissent des concepts et des outils appropriés à ce type de modélisation (Parker et al., 2003). Les modèles multi-agents constituent donc de très bons outils d'aide à la discussion mais ne sont pas adaptés pour élaborer des scénarios de simulation sur de vastes régions car ils nécessitent dans ce cas de nombreuses données et une meilleure compréhension des

logiques de prise de décision individuelles qui ne sont pas toujours disponibles. Ces modèles sont donc utilisés le plus souvent pour de petits territoires avec un problème assez clair et un nombre limité de facteurs. Ils apparaissent de plus en plus fréquemment dans une position « d'objets intermédiaires », au sein de démarches participatives qui visent la construction de représentations partagées des problèmes (Bousquet et al, 1998, voir site web CORMAS). De plus, la plupart des environnements de modélisation multi-agents ne gèrent pas explicitement les données spatiales et ne disposent pas de capacités d'analyse spatiale. Les efforts de recherche sur le plan méthodologique devraient donc s'orienter vers le développement d'un sous modèle centré individu et son intégration avec le SIG existant. Quelques travaux pionniers ont été consacrés à cette forme d'intégration (Dibble, 1996 ; Zunga et al., 1998; Gimblet et al., 2002; Bonin, 2003; Bakam, 2003). L'utilisation de l'espace étant dynamique, le SIG peut être utilisé pour mettre à jour les conditions des scénarios développés pour la simulation. Des classes spatiales concernant le temps de déplacement, la pente, la mesure de la distance, pourront être programmées au sein de l'agent et lui fournir ainsi des capacités de raisonnement spatial. Dans la perspective de contribuer à la gestion durable de l'espace dans la zone d'étude, il serait possible de proposer une plate-forme de concertation et de négociation basée sur les jeux de rôles couplés aux simulations de type multi-agents et aux SIG (Barreteau et al., 2001).

11.4.3. Vers des méthodes de conception et de développement de SIE plus adaptés

Sur le plan méthodologique, le développement du SIE SMALL Savannah est une contribution à la définition et la spécification de la structure d'un SIE. La structure du SIE proposée dans cette thèse est exemple qui peut être utilisé dans le cadre de travaux ultérieurs pour une spécification plus formelle. Les éléments de démarche proposés constituent des axes pour guider l'adaptation et l'enrichissement des méthodes de conception existantes afin de prendre en compte les contraintes de cette nouvelle génération de SI. Une attention particulière devrait également être portée vers les aspects organisationnels du SIE qui n'ont pas été abordés explicitement dans ce travail. On constate que l'utilisation cloisonnée de plusieurs outils logiciels dans les SIE ne permet pas de fournir une vision d'ensemble des données et des traitements, conduisant ainsi au développement d'applications lourdes ou inadaptées (Gayte et al., 1997). Les SIG par exemple, qui sont le plus souvent assimilés aux SIE présentent l'inconvénient de se consacrer exclusivement à la gestion de l'information spatiale et les autres notions comme le temps et les données complexes sont faiblement prises en compte. Le risque d'utiliser un seul outil pour développer l'ensemble du SIE est de réduire la solution du problème aux possibilités offertes par l'outil informatique. Toutefois la multiplication des outils et le manque de cohésion entre eux posent les problèmes de parcellisation des données et d'interopérabilité entre les applications.

Références bibliographiques

- Abakachi, 2000. *Analyse et Diagnostic de la sécurité alimentaire des exploitations agricoles de l'Extrême Nord du Cameroun*. Mémoire de DESS en Développement agricole, Université de Paris I, INAPG.
- Agresti, A. and Finlay B., 1997. *Statistical methods for the social sciences (3rd edition)*. Upper Saddle River, New Jersey. Prentice-Hall.
- Allen T.F.H. et Starr T.B., 1982. *Hierarchy : perspectives for ecological complexity*. University of Chicago Press, Chicago, 253 pages.
- Allen T.F.H. and Roberts D. W.(Eds), 1997. *Complexity in ecological systems*. Columbia University Press, 599 pages.
- Allen T.F.H. et Hoekstra, T. W., 1990. The confusion between scale –defined levels and conventional levels of organisation in ecology. *Journal of Vegetation science 1 : 5 – 12, 1990*.
- Ankogui-Mpoko G.F., 2002. *Sociétés rurales, territoires et gestion de l'espace en RCA, la difficile intégration de l'élevage et de l'agriculture au Nord Est de Bambari*. Thèse de Doctorat en Géographie de l'Université de Montaigne-Bordeaux 3. 377 pages + annexes.
- Assan G., 1991. *La problématique du bois de feu à Maroua*. Mémoire d'ingénieur des Eaux et forêt, Université de Dschang, 64 pages.
- Baeijs C., Demazeau Y, et Alvares L., 1996. SIGMA : Application of multi-agent systems to cartographic generalisation. 7th *European Workshop on modelling Autonomous Agents in a multi-agent World*, Eindhoven, January 1996.
- Bailly A. et Beguin H., 1996. *Introduction à la géographie humaine*. Edition Armand Colin, 201 pages.
- Bailly A. et Ferras R., 1997. *Eléments d'épistémologie de la géographie*. Edition Armand Colin, 191 pages.
- Bakam I., 2003. *Des systèmes multi-agents aux réseaux de pétri pour la gestion des ressources naturelles : le cas la faune sauvage à l'Est Cameroun*. Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé 1, 139 pages.
- Baker W.L., 1989. A review of models of landscape change. *Landscape ecology 2:11-133*.
- Bakis H., et Bonin M., 2000. *La photographie aérienne et spatiale*. Presses Universitaires de France, 127 pages.
- Bannari A., Che D. C., Morin D. et Anys H., 1998. Analyse de l'apport de deux indices de végétation à la classification dans les milieux hétérogènes. *Journal Canadien de Télédétection*, pp. 233-239.
- Bannari A., Royer A. and Morin D., 1997. L'indice de végétation TSARVI : Transformed soil atmospherically resistant vegetation index. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Physical Measurements and Signatures In Remote Sensing*, pp. 667-684.
- Barreteau O., Bousquet F., and Attonaty J.M., 2001. Role playing games for opening the black box of multi-agent systems : method and lessons of its application to Senegal river valley irrigated systems. *Journal of artificial societies and social simulation 4 (2): article 5* available on line at <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/4/2/5.html>.
- Bariou R., Lecamus D. et Le Henaff F., 1985. *Les Indices de végétation*. Dossiers de Télédétection, Centre Régional de télédétection, Université de Rennes 2, 121 pages.
- Barrault J., Eckebil J.P. et Vaille J., 1972. Point des travaux de l'IRAT sur les sorghos repiqués du Nord Cameroun. In *Agronomie tropicale*, vol 27, n°8, pp. 791-814.
- Baret F. et Guyot G., 1991. Potentials and limits of vegetation index for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.*, **35**, 161-173.
- Belghith A., 1990. *Apport des données satellitaires pour la caractérisation et la cartographie des états de surface en régions arides méditerranéennes. (La région de Menzel-Habib, Tunisie)*. Mémoire de DESS en télédétection, GDTA, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, 65 pages.
- Beauvilain A., 1989. Nord Cameroun : *Crises et peuplement*. Thèse de doctorat es-lettres, Université de Paris X, 2 tomes, 625 pages.

- Beauvilain A., 1995. *Tableau de la pluviométrie dans les bassins du Tchad et de la Bénoué : de la création des stations à Décembre 1994*. Centre National d'Appui à la Recherche, Travaux et documents scientifiques du Tchad, 103 pages.
- Beclier D., 1997. *Etude de faisabilité d'un SIG dans le cadre du Pôle Régional de Recherche Appliquée au développement des Savanes d'Afrique Centrale (PRASAC)*. Rapport de fin d'étude, 3^{ème} année ENSA de Toulouse, 50 pages + Annexes.
- Bell E.J., and Hinojosa R.C., 1977. Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes. *Socio-economic Planning Science* 11 13-17.
- Berghausser P. L., 1996. *A study on rural-urban network of group of Mada migrants in North Cameroon*. Student report, Department of human geography, University of Amsterdam, 111 pages.
- Bertoli J. A., et Le Moigne, J. L., 1996. *Organisation intelligente et Système d'Information Stratégique*. Edition Economica Paris, coll. Gestion, 284 pages.
- Bian L., 1997. Multi-scale nature of spatial data in scaling up environmental models. In Dale A. Q., et Michael F. G., 1997(Eds). *Scale in remote sensing and GIS*. Lewis Publishers, pp. 13-26.
- Bisson P. et Cretenet M., 1997. Introduction au Zonage. In *Diversité des situations agricoles et problématiques de développement de la zone cotonnière*. Rapport IRA/Projet Garoua II, Garoua, Cameroun.
- Bisson P. et Dugué P., 1999. Contribution de la recherche agricole au développement régional. Le cas des zones de savanes d'Afrique centrale. *Les Cahiers de la Recherche Développement* n° 45-1999, pp.106-113.
- Blanc-Pamard C. et Lericollais A. (Eds), 1991. *Dynamique des systèmes agraires : A travers Champs, Agronomes et géographes*. Ed ORSTOM, collection colloques et séminaires, 297 pages.
- Blandin P., et Lamotte M., 1985. *Fondements rationnels de l'aménagement d'un territoire*. Ed Masson, 175 pages.
- Bobo-Kadiri S., et Boukar B., 1997. *Estimation de la production pêchée dans la plaine d'inondation du Logone, octobre 1996 à août 1997*. Rapport du projet Waza Logone, IUCN.
- Bocco G. and Toledo V. M., 1997. Integrating peasant knowledge and Geographic Information Systems : a spatial approach to sustainable agriculture. In *Indigenous Knowledge and Development Monitor*, Volume 5, Issue 2, 10-13.
- BONIFICA, 1992. *Schéma d'aménagement de la région soudano-sahélienne. Bilan Diagnostique*. CCE, FED/MINPAT, Cameroun.
- Bonin M., 2003. *Inscription territoriale des recompositions agricoles. Caractérisation et modélisation dans les Monts d'Ardèche*. Thèse de doctorat en géographie, Université d'Avignon.
- Bonn F. et Rochon G., 1996. *Précis de télédétection, volume 1 : principes et méthodes*. Presse de l'Université du Québec/AUPELF, 485 pages.
- Boserup E., 1965. *The conditions of Agricultural Growth : the economic of agrarian change under population pressure*. (Ed) George Allenand Unwin LTD London, Aldine Publishing company, Chicago, 122 pages.
- Boubaoua A., 2001. *Etat de la réserve forestière de Laf dans l'Extrême Nord du Cameroun*. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur des Eaux et forêt, Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles, Université de Dschang, 63 pages.
- Bouchy S., 1994. *L'ingénierie des Système d'Information Evolutifs*. Edition Eyrolles, Paris, 330 pages.
- Bousquet F., 1994. *Des milieux, des poissons, des hommes: étude par simulations multi agents. Le cas de la pêche dans le delta central du niger*. Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard de Lyon 1, 175 pages.
- Bousquet F., Bakam I., Proton H., Le Page C., 1998. CORMAS : COMmon pool Resources and Multi-Agent Systems. *Lecture Notes in artificial intelligence*, 1416 : 826-837.
- Boutrais J., Boulet J., Beauvilain A., Gubry P., Barreateau D., Dieu M., Breton R., Seignobos C., Pontie G., Marguerat Y., Hallaire A. et Frechou H., 1984. *Le Nord du Cameroun: des hommes, une région*. Edition ORSTOM, 551 pages.
- Bouzeghoub M., Gardarin G., et Valduriez P., 1997. *Les Objets*. Edition Eyrolles, 450 pages.
- Brabant P. et Gavaud M., 1985. *Les sols et les ressources en terres du Nord Cameroun : Cartes et notice explicative n° 103*. 6 cartes en couleur hors texte, au 1/500 000, Paris – ORSTOM - MESRES – IRA, 285 pages.

- Breedveld et Joosten V., 1994. *Vegetation changes in Waza National Park*. CML Leiden University, 27 pages.
- Briassoulis H., 2000. Analysis of Land use change: Theoretical and modelling approaches. In S. Loveridge (Editor), *The Web book of Regional Science* at <http://www.rri.wvu.edu/regscweb.htm>. West Virginia University, Morgantown.
- Brunet R., 1990. *Le territoire dans les turbulences*. Coll. Géographiques RECLUS.
- Burel F., et Baudry J., 2003. *Ecologie du paysage : concepts, méthodes et applications*. Edition Tech & Doc, 359 pages.
- Caron C. et Bédard Y., 1993. Un formalisme individuel adapté pour les Systèmes d'Information à Référence Spatiale : MODUL-R. In *Revue de Géomatique* vol n°3-n°3/1993, pp. 265-281.
- Cerna, 1986. *Putting people first*. World Bank/Oxford University press.
- Chambers R., 1983. *Rural development: Putting the last first*. Longman Harlow.
- Cheylan J-P., Gautier D., Lardon S., Libourel T., Mathian H., Motet S., Sanders L., 1999. Les mots du traitement de l'information spatio-temporelle. In *Revue internationale de géomatique* Vol 9 n° 1/1999.
- CIRAD, 2000. *Processus de transformation des paysages dans les zones rurales soumises à des fortes dynamiques sociales*. Projet d'une ATP Paysages, CIRAD-TERA Document de travail.
- Conway G.R., 1987. The properties of agroecosystems. *Agricultural Systems* 24:95-117
- Costanza R., 1989. Model Goodness of fit: a multiple resolution procedure. In *Ecological modelling* 47 (1989) 199-215.
- Coster M., Chermant J. L. , 1985. *Précis d'Analyse d'Images*. Edition du Centre National de la Recherche Scientifique 15, quai Anatole- France- 75700 Paris, 493 pages.
- Courade G., 1997. L'observation en temps réel du changement social dans le milieu rural africain : l'approche développée au sein d'OCISA au Cameroun." In: *Thème et variations : nouvelles recherches rurales au sud*. Edition ORSTOM Paris, pp. 143-162.
- De Groot W.T., 1992. *Environmental science theory : concepts and methods in a one-world, problem-oriented paradigm*. Elsevier, 583 pages.
- De Groot W.T. and Kamminga E. M., 1996. *Forest, People, Government: A policy-oriented analysis of the social dynamics of tropical deforestation*. Main report of the project 'Local actors and global treecover policies', CML report n° 120, Leiden University, 94 pages.
- De Groot, W. T., 1999. *A Future for the Mountains : a policy-oriented synthesis of three recent dissertations on the Mandara Mountains, North Cameroon*. Scientific report of the project "Local Knowledge and Local Action in the Mandara Mountains, North Cameroon", NIRP/CML/CEDC, 50 pages.
- De Groot W. T., 2003. Thunian land use theory, visions of nature, and the future of the sierra Madre, Philippines. In : J. van der Ploeg, A. B. Masipiquena and E.C. Bernardo (Eds) 2003. *The Sierra Madre Mountain Range: Global Relevance, Local Realities*. CVPED/Golden Press, Tuguegarao, pp. 381- 408.
- De Koning, A. Veldkamp, Fresco L.O., 1998. Land use in Ecuador: a statistical analysis at different aggregation levels. *Agriculture, ecosystems and environment* 70: 231-247.
- De Koning G.H.J., Verburg P.H., Veldkamp A., Fresco L.O., 1999a. Multi-scale modelling of land use change dynamics in Ecuador. *Agricultural Systems* 61(2) (1999): 77-93.
- De Koning, G.H.J., Veldkamp, A. and Fresco L.O., 1999b. Exploring changes in Ecuadorian land use for food production and their effects on natural resources. *Journal of Environmental Management* 57(4) (1999): 221- 237.
- Debaine F., Mering C., et Poncet Y., 1988. La morphologie mathématique en teinte de gris appliquée à la mise en évidence de réseaux. *Photo-interprétation*, 5 (2), p 17-26.
- Deichmann U., 1997. *Accessibility indicators in GIS*. New York : United Nation Statistics Division, Department of Economic and Policy Analysis.
- Derniame J.C., 1998. *Spécification de l'Architecture du Système d'Information SIMES*. Rapport d'avancement du projet SIMES/WISE-DEV, Deliverable number : D1.1, 21 pages.
- Dibble C., 1996. Representing individuals and societies in GIS. In *Proceeding of the third international Workshop/Conference on integrating GIS and environmental modelling*, January 21-25, 1996, Santa Barbara,

- CA : National Center for Geographic Information Analysis (http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/main.html).
- Diday E., 1971. La méthode des nuées dynamiques. *Revue des statistiques appliquées*, vol. 19, pp. 19-34.
- Diday E., 1978. *La méthode des nuées dynamique et la reconnaissance des formes*. Fascicule D.I.A IRIA Rocquencourt.
- Domga C., 1997. *L'approvisionnement en bois de feu de la ville de Maroua*. Rapport d'étude, DPGT/CEDC/MINEF, 18 pages.
- Donfack P. et Seignobos C., 1996. Des plantes indicatrices dans un agrosystème incluant la jachère : les exemples des Peuls et des Guizigas du Nord Cameroun. *Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée*, vol 38 pp 231-250.
- Dugué P., Koulandji J., et Moussa C., 1994. *Diversité et zonage des situations agricoles et pastorales de la zone cotonnière du Nord Cameroun*. IRA/Projet Garoua II, Garoua, Cameroun, 84 pages.
- Dugué P., Koulandji J., et Moussa C., 1997. Diversité des situations agricoles et problématiques de développement de la zone cotonnière. In L. Seiny Boukar, J.-F., Poulain, G. Faure, (eds) *Agricultures des savanes du Nord Cameroun : vers un développement solidaire des savanes d'Afrique centrale*. Actes de l'atelier d'échange, 25-29 novembre 1996, Garoua, Cameroun. Montpellier, France, CIRAD-CA, pp. 43-57.
- Dzeakou P., Morrand P., et Mullon C., 1998. *Méthodes et architectures des Systèmes d'Information sur l'Environnement*. Document de travail, Projet SIMES, 14 pages.
- Eckebil J. P., 1968. Amélioration des espèces. Sorghos repiqués. In *Collection testée Muskuwaari, Essai inter-variétal Muskuwaari. Etude biologique des sorghos repiqués* (Maroua), Yaoundé (CMR), IRAT, pp. 82-91.
- Efron B., 1982. *The jackknife, the bootstrap, and other resampling plan*. Volume 38 of BBMS-NSF Regional Conference series in applied mathematics. SIAM.
- Fotsing E. et Madi A., 1997. *Evaluation et suivi de la Dynamique de la Biomasse Ligneuse par Images Satellites* : Rapport de Recherche n° 13, Yaoundé University and United Nations University, 38 pages.
- Fotsing E., 1996. *Modélisation des Données Géographiques : Réalisation d'un SIG de Gestion des Réseaux d'Eau et d'Electricité*. Mémoire de Maîtrise Spécialité Informatique, Université de Yaoundé I, 70 pages + Annexes.
- Fotsing E. et Legeley A., 1999. Contribution de la Morphologie Mathématique à la cartographie de l'occupation du sol à partir d'images SPOT (Région de l'Extrême Nord Cameroun). *8^{ème} Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUFELF UREF*, Lausanne, Suisse.
- Fotsing E. and Verburg P.H., 2001. A spatially explicit and empirical approach for analysing land use change in the Far North region of Cameroon. In Madi A., Loth P., Bauer H. And De Iongh H. (eds), 2001. *Proceedings of the International Conference on the Management of fragile Ecosystem*, 13-16 November 2000, Maroua-Cameroon, pp 105-119.
- Fotsing E. et Mainam F., 2003. Les potentialités des sols et la dynamique du sorgho de contre saison dans l'Extrême Nord du Cameroun. In Jamin J.-Y., Gounel C., Bois C., 2003. *Atlas, Agriculture et développement rural des savanes d'Afrique centrale*, pp. 97-99.
- Fotsing E., Cheylan J.-P., DeGroot W.T. et Verburg P.H., 2003. Un dispositif multi échelle d'analyse des dynamiques agraires en zone des savanes de l'extrême Nord du Cameroun. *6^{ème} rencontre de Théoquant sur les nouvelles approches en Géographie théorique et quantitative*, Besançon, France : <http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/>, 16 pages.
- Fotsing E., Ntoupka M., et Boubaoua A., 2003. Etat de la réserve forestière de Laf et perspectives d'aménagement et de gestion de l'espace. In Jamin J.Y., Seiny Boukar L. et Floret C. (Eds), 2003. *Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque*, mai 2002, Garoua, Cameroun. Prasac, 10 pages.
- Fotsing E., Cheylan J.-P., and Verburg P.H., 2006. From images to patterns: a step toward the identification and modelling of land change processes in a savannah landscape. *Proceedings of the 6th AARSE International Conference on Earth Observation & Geoinformation Sciences for Africa's Development*, Cairo-Egypt, 30 October - 2 November 2006.
- Fotuis G., 2000. Phytogéographie. In Seignobos C., et Iyébi-Mandjek O., 2000 (Eds). *Atlas de la province de l'Extrême Nord du Cameroun*. MINREST/INC/ORSTOM, pp. 30-37.

- Fouda M., and Moore R., 1998. *Formal modelling of spatial Information Systems*. UNU/IIST Report N° 132, February 1998, 45 pages.
- Franklin J. and Woodcock C. E., 1997. Multiscale vegetation data for the mountains of southern California : spatial and categorical resolution. In Dale A. Q., et Michael F. G., 1997. *Scale in remote sensing and GIS*. Lewis Publishers, pp. 141-168.
- Fresco L., Leemans R., Turner II B.L., Skole D., vanZejil-Rosema and Haarmann V., 1996. *Land Use and Cover Change (LUCC)*. Open science meeting proceedings. LUCC Report Series n° 1, 135 pages.
- Gardarin, G., 1998. *Base de données : les systèmes et leurs langages*. Edition Eyrolles, Quatrième édition, 265 pages.
- Gayte O. Libourel T., Cheylan J.P et Lardon S., 1997. *Conception des Systèmes d'Information sur l'Environnement*. Editions Hermes, Paris, 153 pages.
- Geny P., Waechter P., Yatchinowsky A., 1992. Environnement et développement rural ; Guide de la gestion des ressources naturelles. Paris, Ed. Frison-Roche, 417 pages.
- Gibson C. C., Ostrom E., et Ahn T.K., 2000. The concept of scale and the human dimensions of global change: a survey. *Ecological economics* 32: 217-239.
- Gimblet H.R., Itami R.M., and Durnota D., 1996. Some practical issues in designing and calibrating artificial human agents in GIS based simulation Worlds. *Complex. Int. J.* 3.
- Gimblet H. R. (Eds), 2002. *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling techniques for Simulating Social and Ecological Processes*. Oxford university press, 313 pages.
- Girard M. et Girard C. M., 1999. *Traitement des données de télédétection*. Edition DUNOD, 529 pages.
- Goudet J.P., 1990. Les productions arborées ligneuses et non ligneuses. In Actes du colloque, *Savanes d'Afrique, terres fertiles*, Montpellier, septembre 1990, CIRAD, pp. 195-214.
- Gounel C., et Jamin J.Y., 2002. L'élevage. In Jamin J.-Y., Gounel C., Bois C., (Eds) 2003. *Atlas, Agriculture et développement rural des savanes d'Afrique centrale*. PRASAC, CIRAD, pp. 65-71.
- Hal M., 1994. *Recherche agricole orientée vers le Développement*. Cours du centre International pour la recherche agricole orientée vers le développement. ICRA, Wageningen, Pays Bas, 288 pages.
- Harriss J., (Eds) 1982. *Rural development: theories of peasant economy and agrarian change*. Routledge, London EC4P 4EE, 409 pages.
- Havard M., et Abakar O., 2002. *Caractéristiques des exploitations agricoles des terroirs de référence du PRASAC au Cameroun*. PRASAC/IRAD, Délégation Nationale du Cameroun. Rapport, 27 pages.
- Hommer Dixon T. F., 1999. *Environment, scarcity and violence*. Princeton University Press, 253 pages.
- Hoock J., 1971. *Les savanes guyanaises : Kourou*. Essai de phyto-écologie numérique, ORSTOM, 251 pages.
- Hoshino S., 2000. Multi-level modeling on farmland distribution in Japan. *Land use policy* 18 (2001), 75-90.
- Huigen M. G. A., 2004. First principles of the MameLuke multi-actor modelling framework for land use change, illustrated with a Philippine case study. *Journal of Environmental Management*, Vol. 72, Issues 1-2, August 2004, 5-21.
- IGN, 1977. *Cartes topographiques au 1/200 000, Maroua, Extrême Nord du Cameroun*. Editeur, Institut Géographique National de Paris, Centre de Yaoundé.
- Imbernon J., 1999. Approche écorégionale et approche spatiale. *Les Cahiers de la Recherche Développement* n° 45-1999, pp. 85-105.
- Ingram D. R., 1971. The concept of accessibility: a search for an Operational Form. *Regional studies* 5 : 101-107.
- Irwin E., and Geoghegan J., 2001. Theory, Data, methods: developing spatially-explicit economics models of land use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85 (1-3): 7-24.
- IUCN, 1996. *Rehabilitation of the Waza Logone Floodplain, Republic of Cameroon*. Project description, prepared by IUCN and MINEF, December 1996, 51 pages + 7 Appendices.
- Iyebi-Mandjeck O., 1997. Les stratégies des migrants de la zone cotonnière du Nord Cameroun ou la recherche d'un optimum de sécurité. In *Diversité des situations agricoles et problématiques de développement de la zone cotonnière*. Rapport IRA/Projet Garoua II, Garoua, Cameroun.

- Iyebi-Mandjeck O., 2000. Cultures Maraîchères. In Seignobos C., et Iyébi-Mandjeck O., 2000 (Eds). *Atlas de la province de l'Extrême Nord du Cameroun*. MINREST/INC/ORSTOM, pp. 102-106.
- Jamin J.-Y., Gounel C., Bois C., (Eds) 2003. *Atlas, Agriculture et développement rural des savanes d'Afrique centrale*. PRASAC, CIRAD, 100 pages.
- Kamuanga M., 1997. Zonage de l'Extrême Nord du Cameroun. In *Diversité des situations agricoles et problématiques de développement de la zone cotonnière*. Rapport IRA/Projet Garoua II, Garoua, Cameroun.
- Kergreis A., 1992. Conférence inaugurale de l'Observatoire du Sahara et du Sahel. *Sécheresse n° 4, vol. 3, décembre 1992*, pp. 265.
- Kok K., 2001. *Scaling the land use systems : A modelling approach with case studies for Central America*. PhD dissertation, Wageningen Agricultural University, 153 pages.
- Kok K. et Winograd 2002. Modelling land use change for central America, with special reference to the impact of hurricane Mitch. *Ecological Modelling* 149 : 53-69.
- Kouamou G., et Fotsing E., 1995. *L'application R+/Arcview, Indicateurs d'accessibilité aux ressources renouvelables au Cameroun*. Rapport de recherche, IFORD, Yaoundé, 26 pages.
- Koulandi J., 1997. Brève histoire des migrations des Toupouris ou les vicissitudes d'une stratégie de départ. In *Diversité des situations agricoles et problématiques de développement de la zone cotonnière*. Rapport IRA/Projet Garoua II, Garoua, Cameroun.
- Lambin E. F., 1994. *Modelling deforestation processes : A review*. Research report n° 1, TREES Series. 113 pages.
- Lambin E. F., Baulies X., Bockstael N., Günter F., Krug T. Leemans R., Moran E. F., Rindfuss R. R., Sato Y., Skole D., Turner II B. L., Vogel C., 1999. *Land-Use and Land-Cover change: Implementation strategy*. IGBP report N°48, IHDP Report N°10, 132 pages.
- Lambin F. E., Geist H. J., and Lepers E., 2003. Dynamics of Land use and Land cover change in tropical regions. *Annu. Rev. Environ. Ressour.* 2003. 28:205-41.
- Laurini R. and Thompson D., 1996. *Fundamentals of Spatial Information Systems*. The APIC series number 37, Academic Press, 680 pages.
- Le Fur A., 2000. *Pratiques de la cartographie*. Edition Armand colin, 95 pages.
- Legeley A., et Mering, C. 1997. Apport des opérateurs de morphologie mathématique à l'extraction des failles à partir d'images Spot panchromatique. *Photo-interprétation*, 3-4, pp. 209-223.
- Legeley A., Mering C., Guillande R., et Huaman D., 1995. Méthode de cartographie des coulées de lave par traitement des images Spot : L'Exemple du Sabancaya (Perou). *Photo-interprétation*, 1, pp. 3-17.
- Le Moigne, J.L., 1977. *La théorie du système général. Théorie de la modélisation*. PUF, 4^{ème} édition complète, 1994.
- Letouzey R., 1968. *Etude phytogéographique du Cameroun*. Ed Le chevalier, Paris, 513 p + 28 cartes.
- Letouzey R., 1985. *Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1 :500 000*. Toulouse, Institut de la carte internationale de la végétation, 240 pages.
- Levin S.A., 1992. The problem of pattern and scale in ecology. In *Ecology* 73 (6) pp 1943-1967.
- Levy J., et Lussault M., 2003. *Dictionnaire de Géographie et des sciences de l'espace*. Ed Belin, 1033 pages.
- Ligthart, S., 1993. *Overgrazing in the Diamaré that is the question: Studying social indications of overgrazing in the Diamaré with help of a problem oriented approach*. Environmental and development student report, University of Leiden.
- Lissandre M., 1990. *Maîtriser SADT*. Edition Colin.
- Loireau M., 1998. *Espaces – Ressources – Usages : Spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien*. Thèse de doctorat de l'Université Paul Valéry, Montpellier III, France, 393 pages.
- Loth P., (Ed) 2004. The return of water: restoring the Waza Logone floodplain in Cameroon. IUCN Gland, Switzerland and Cambridge, UK. Xvi+156 pages.

- Madi A., 1994. *Politique agricole et élasticité de l'offre dans les exploitations de la zone cotonnière au Cameroun*. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier.
- Madi, A. Huub P. et Sali B., 2003. La demande urbaine en bois énergie et nécessité d'une gestion rationnelle des ressources naturelles : le cas de la ville de Maroua à l'Extrême Nord du Cameroun. In Jamin J.Y., Seiny Boukar L. et Floret C. (Eds), 2003. *Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis*. Actes du colloque, mai 2002, Garoua, Cameroun. PRASAC, 9 pages.
- Mapedza E., Wright J., Fawcett R., 2003. An investigation of land cover change in Mafungautsi Forest, Zimbabwe, using GIS and participatory mapping. In *Applied Geography* 23 (2003) 1–21.
- Mathieu B., 2000. *Le sorgho repiqué au Nord Cameroun : de l'analyse des pratiques culturelles à l'accompagnement technique des producteurs*. Mémoire de DEA, ETES, 103 pages.
- Mathieu B., Fotsing E., et Gautier D., 2003. L'extension récente du Muskuwaari au Nord Cameroun : Dynamique endogène et nouveaux besoins de recherche. In Jamin J.Y., Seiny Boukar L. et Floret C. (Eds), 2003. *Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis*. Actes du colloque, mai 2002, Garoua, Cameroun. PRASAC, 12 pages.
- Mazzucato V., Niemeijer D., 1996. *Coping with changes in an agricultural system in eastern Burkina Faso*. research report, Wageningen Agricultural University.
- Mazzucato V., Niemeijer D., 2000. *Rethinking soil and water conservation in a changing society*. PhD dissertation, Wageningen Agricultural University.
- Niemeijer D., and Mazzucato V., 2002. *Population growth and the environment in Africa: local informal institutions, the missing link*. Amsterdam Research Institute for Global Issues and Development Studies. pp. 171-193.
- Meentemeyer V., 1989. Geographical perspectives of space, time and scale. *Landscape ecology*. 3 (3/4), 163-173.
- Milleville P., et Serpantié G., 1994. Intensification et durabilité des systèmes agricoles en Afrique soudano-sahélienne. In Actes du séminaire sur la promotion de systèmes agricoles durables dans les pays de l'Afrique soudano-sahélienne, FAO/CIRAD, 10-14 janvier 1994, Dakar, Sénégal, pp. 33-45.
- MINAGRI, 1999. Evolution annuelle des productions, superficies et rendements des principales cultures vivrières de la province de l'Extrême Nord (1983/84 – 1998/99). Ministère de l'Agriculture, Cameroun.
- MINEF, 1993. *Gestion de l'espace et utilisation des ressources dans la région soudano-sahélienne*. Plan d'action de lutte contre la désertification, PNUD/UNSO, 126 pages.
- MINEF, 1998. *Recueil de textes officiels relatifs à la gestion des forêts et de la faune au Cameroun*. Ministère de l'Environnement et des Forêts, Cameroun, 185 pages.
- MINEPIA, 2002. *Fiche récapitulative du recensement général des cheptels dans la province de l'Extrême Nord*. Ministère de l'Élevage, des Pêches et industries Animales, Cameroun.
- Mondain M. J-F., 1993. *Diagnostic rapide pour le développement agricole. Le point sur les technologies*. Coopération Française-ACCT-GRET, 128 pages.
- Montagne P., 1997. Rapport de mission d'identification, stratégie énergie domestique pour l'Extrême Nord Cameroun, Projet DPGT.
- Moritz, M., 1994. *Pastoralists perceptions of pastures in North Cameroon*. Student report, Leiden University.
- Mouafo D., Fotsing E., Sighomnou D., et Sigha L., 2000. Management of floodplain and regional environmental change : the case of the Logone river floodplain in Northern Cameroon (Das Logone-Tal in NordKamerun : Entwicklungsmaßnahmen und Umweltfolgen). In *Geographische Rundschau*, GR 52 (2000) H.11, pp. 35-41.
- Mouafo D., Fotsing E., Sighomnou D., et Sigha L., 2002. Dam, Environment and Regional development: Case study of the Logone Floodplain in Northern Cameroon. In *Water Resources Development*, Vol. 18, No. 1, 209-219, 2002.
- Mullon C., 1992. *L'ORSTOM et les Systèmes d'Information Géographique*. Rapport au Conseil scientifique de l'ORSTOM, Avril 1992, 25 pages.
- Musa M. G., 1995. *The fuelwood problem in Maroua and its environment: socioeconomic considerations*. Professional internship report. University of Dschang, Cameroun, 84 pages.

- Mvondo A., Halidou D., Oyo P., et De Iongh H., (Eds) 2003. *Inondation et fonctionnement d'un écosystème ; besoins de recherches pour la plaine du Logone*. Rapport du séminaire Plan Directeur de Recherche pour la Plaine d'inondation du Logone, Nord Cameroun, Maroua du 23 au 25 janvier 2002 CEDC-CML-IUN.
- Mvondo J-P., 2003. *Plan Directeur de Recherche pour la plaine d'inondation du Logone*. IUCN Gland Suisse, 110 pages.
- Nancy D., Espinasse B., Cohen H., et Heckenroth H., 1992. *Ingénierie des systèmes d'information avec Merise : Vers une deuxième génération*. Ed Sybex, 650 pages.
- [Niemeijer](#) D., et [Mazzucato](#) V., 2002. Population growth and the environment in Africa: local informal institutions, the missing link. *Amsterdam Research Institute for Global Issues and Development Studies*, pp. 171-193.
- Njiti C. F., and Sharpe D.M., 1994. A goal Programming Approach to the management of competition and conflict among land uses in the tropics : the Cameroon Example. In *Ambio, A journal of the human Environment* vol N° 2 March 1994, pp. 112-119.
- Njomaha C., 2004. *Agricultural change, food production and sustainability in the far North of Cameroon*. Phd Thesis, Leiden University, 245 pages.
- Njomaha, C., 2001. Farmer's actions and constraints towards alleviating cotton soils degradation in the Far north of Cameroon. In Madi A., Loth P., Bauer H., and De Iongh H., (Eds) 2001. *Proceedings of an International Conference: Management of Fragile Ecosystems in the North of Cameroon, the need for an adaptive approach*. CEDC, Maroua, 13-16 novembre 2000, (12) 99-104.
- Ntoupka M., 1999. *Impacts des perturbations anthropiques sur la dynamique de la savane arborée en zone soudano-sahélienne Nord du Cameroun*. Thèse de doctorat de l'université Paul Valéry de Montpellier III, France, 260 pages.
- O'Kelly M and Bryan D., 1996. Agricultural location theory: Von thünen's contribution to economic geography. In *Progress in Human Geography* 20,4 (1996) pp. 457-475.
- Obale-Ebanga F., 2001. *Impacts of agricultural Land use histories on soil organic matter dynamics and related properties of savannah soils in north Cameroon*. Phd thesis, Amsterdam University, 181 pages.
- O'Neill R. V., Deangelis D. L., Waide J. B., and Allen T. F., 1986. *A hierarchical concept of ecosystems*. Monographs in population biology, vol 23, Princeton University Press, Princeton, NJ, 253 pages.
- Overmars K.P., De Koning G.H.J., and Veldkamp A., 2003. Spatial autocorrelation in multi-scale land use models. In *Ecological Modelling* 164 (2003) 257-270.
- Overmars K. P., De Groot W. T., and Huigen M. G.A., 2006. Comparing Inductive and Deductive Modeling of Land Use Decisions: Principles, a Model and an Illustration from the Philippines. *Human Ecology*, 35, 439-452.
- PALCD, 1992. *Rapport de synthèse du Plan d'Action de Lutte contre la Désertification au Cameroun*. MINPAT/UNSO, 91 pages.
- Pantazis D., et Donnay J. P., 1996. *La conception de SIG : méthode et formalisme*. Paris, Ed. Hermès, coll. Géomatique, 1996, 343 pages + index, bibliogr., tabl.
- Parker D.C., Manson S.M., Janssen M.A., Hoffman M. and Deadman P., 2003. Multiagent systems for the simulation of Land-Use and Land-Cover Change : A review. *Annals of the Association of American Geographers* 93 (2) : 314-337.
- Parker D. C. P., Berger T., and Manson S., M. (Eds), 2002. *Agent-based models of land use and land cover change*. Report and review of an international Workshop, Irvine, California, USA, LUCC report series N° 6, 124 pages.
- Pearse J., and Ferrier S., 2000. Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression. In *Ecological modelling* 133 (0000) 225-245.
- Pelissier P., 1995. Transition foncière en Afrique noire : Du temps des terroirs au temps des finages. In *Dynamique des systèmes agraires. Terre, Terroir, territoire : Les tensions foncières*. Edition ORSTOM, collection colloques et séminaires, pp. 19-34.
- Peterson, G.D., 2000. Scaling ecological dynamics : self-organization, hierarchical structure, and ecological resilience. *Climatic change* 44 : 291-309.

- Pettang C., Tamo T. T., Fotsing E., Kouamou G., 1997. SIGSADRE: un système d'aide à la planification et la gestion du réseau d'eau dans les quartiers à habitat spontané. *Revue Internationale de Géomatique*. Volume7-n° 2/1997, pp. 141-157.
- Pettang C., Tamo T. T., Kouamou G. E., Mbumbia L., Simeu P., Tchamba B. H., Tchuente M., Njock C., Fotsing E., Nsangou A., Noumedem A. L., 1996. *Pour un système interactif d'aide à la décision pour la résorption de l'habitat spontané en milieu urbain : Rapport de Recherche n°7*. Yaoundé University and United Nations University, 42 pages.
- Pieri C., 1989. *Fertilité des terres de savanes : bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara*. CIRAD, 444 pages.
- Poncet Y., 1986. *Images Spatiales et Paysages Sahéliens*. Edition de l'ORSTOM, 255 pages.
- Pontius G. R. et Schneider L. C., 2001. Land cover Change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85 (2001) 239-248.
- Pontius R.G.J., Huffaker D. and Denman K., 2004. Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecological Modelling* 179(4): 445-461.
- Pontius G. R., and Malizia N. R., 2004. Effect of category aggregation on map comparison. Lecture Notes in Computer Science 3234 p.251-268. in M J Egenhofer, C Freksa, and H J Miller (eds): GIScience2004.
- Pontius G. R., and Malanson J., 2005. Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 19, No. 2, February 2005, 243-265.
- Pontius Jr. R. G., Wideke B., Castella J-C., Keith C., Ton de Nijs, Dietzel C., Zengqiang D., Fotsing E., Goldstein N., Kok K., Koomen K., Lippitt C. D., McConnell W., Pijanowski B., Snehal P., Sood A. M., Sean Sweeney, Tran Ngoc T., Veldkamp A. T., and Verburg P. H., 2007a. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *Annals of Regional Science*, DOI 10.1007/s00168-007-0138-2.
- Pontius Jr. R. G., Wideke B., Castella J-C., Keith C., Ton de Nijs, Dietzel C., Zengqiang D., Fotsing E., Goldstein N., Kok K., Koomen K., Lippitt C. D., McConnell W., Pijanowski B., Snehal P., Sood A. M., Sean Sweeney, Tran Ngoc T., Veldkamp A. T., and Verburg P. H., 2007b. Lesson and challenge for land change modellers as revealed by a comparison of thirteen case studies. *Conference on the science and education of land use*.
- Pornon H., 1993. Quelques réflexions sur la difficulté d'utiliser Merise pour la modélisation des bases de données géographiques. In *Revue de géomatique*. Vol 3-n°3/1993 pp. 255-263.
- Pourtier R., 2003. Les savanes africaines entre local et global : milieux, sociétés espaces. In *Cahiers d'Agriculture* 2003 ; 12 : 231-8.
- PRASAC, 1998. *Programme scientifique de recherche et développement du PRASAC*. Rapport de la première réunion du comité directeur, 7-8 mai à N'Djamena (Tchad), PRASAC, 58 pages.
- PRASAC, 1999. *Synthèse du diagnostic global au Nord Cameroun*. Délégation nationale du Cameroun, PRASAC, 39 pages.
- PRASAC, 2002. Mille et une photos des savanes d'Afrique centrale. CDROM Interactif,
- Pumain D., et Saint-Julien T., 1997. *L'analyse spatiale. Localisation dans l'espace*. Ed Armand Colin, 167 pages.
- Quattrochi D.A., and Goodchild M.F., 1997. *Scale in Remote Sensing and GIS*. Lewis Publishers 406 pages.
- Raffestin C., 1982. Remarques sur les notions d'espace, de territoire, et de territorialité. *Espace et Société*, 41: 167-171.
- Raimond C., 1999. *Terres inondées et sorgho repiqué. Evolution des espaces agricoles et pastoraux dans le bassin du Lac Tchad*. Thèse de Doctorat en Géographie, Université de Paris, Panthéon Sorbonne 543 pages+annexes.
- Regis C., Jacynthe P. et Blumer C., 1999. Images de télédétection et SIRS : une intégration encore attendue. In Actes du *Colloque Internationale sur la télédétection optique et radar et la géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux*, 67 Congrès de l'ACFAS, Ottawa, Canada.
- Reounodji F., 2003. *Espaces, sociétés rurales et pratiques de gestion des ressources naturelles dans le sud-ouest du Tchad : Vers une intégration agriculture-élevage*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Paris I Panthéon-Sorbone, 406 pages+annexes.

- Resquier-Desjardin M., 2001. *Elevages et transhumances à l'Extrême Nord du Cameroun, une étude des contrats d'accès aux pâturages communs: enquêtes en milieu pastoral et essai de modélisation contractuelle*. Thèse de Doctorat en sciences économique, Université de Versailles, France. 465 pages + Annexes.
- RGPH, 1987. *Demo 87 : Deuxième recensement général de la population et de l'habitat du Cameroun*. Volume II, Résultats Bruts, 838 pages.
- Rhind D., and Hudson R., 1980. *Land use*. Edited by Methuen & Co. Ltd, London and New York, 272 pages.
- Riebsame W.E., Parton W.J., Galvin K.A., Burke I.C., Bohren L., Young R. and Knop E., 1994. Integrated modeling of land use and cover change : A conceptual scheme for applying an integration strategy to agricultural land use on the U.S great plains. In *Biosciences* vol.44. No.5, pp. 350-356.
- Roetter R.P., Hoanh C.T., Diepen C.A., De Ridder N. and Van Laar H.H., 2005. Integration of systems Network (SysNet) tools for regional land use scenario analysis in Asia. *Environmental Modelling & software* 20(3): 291-307.
- Roupsard M., 1985. La culture du coton au Nord Cameroun : modernisation agricole et développement régional. *Coton et fibres tropicales*, 40 (1) pp. 39-59.
- Roupsard M., 1987. *Nord Cameroun, Ouverture et Développement*. Coutances, impr. C. Béliée, 516 pages.
- Sanders L., (Eds), 2001. *Modèles en analyse spatiale*. Edition Hermes Lavoisier, 333 pages. 437 pages.
- Schowengerdt R. A., 1983. *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*. Academic Press Inc, 249 pages.
- Scholte P., Kari S., and Moritz M., 1996. *The involvement of nomadic and transhumant pastoralist in the rehabilitation and management of the Logone floodplain, North Cameroon*. Issues paper 66, Drylands programme, IIED, London.
- Scholte P.T., 2005. *Floodplain rehabilitation and the future of conservation & development : adaptive management of success in Waza-Logone, Cameroon* PhD dissertation, Leiden University, 339 pages.
- Seignobos C., Iyebi-Mandjeck O. et Abdourahman N., 1995. *Saturation foncière et Muskuwari : Terroir de Balaza-Domayo*. Rapport DPGT, 62 pages+Annexes.
- Seignobos C., 1998. *Le pays Mundang : du progrès au développement durable*. DPGT/IRD/MINAGRI/SODECOTON, 121 pages.
- Seignobos C., 1993. Hardé et Karal du Nord Cameroun, leur perception par les populations agropastorales du Diamaré. In *Terres hardé, caractérisation et réhabilitation dans le bassin du lac Tchad*, CIRAD-Forêt, Cahiers Sc. N° 11 : 9 -28.
- Seignobos C., et Teyssier A., 1997. *Enjeux fonciers dans la zone cotonnière du Cameroun*. DPGT-SODECOTON-ORSTOM, 121 pages.
- Seignobos C., 2000. Sorghos et civilisations agraires. In Seignobos C., et Iyébi-Mandjeck O., 2000 (Eds). *Atlas de la province de l'Extrême Nord du Cameroun*. MINREST/INC/ORSTOM, pp. 82-87.
- Seignobos C., et Iyébi-Mandjeck O., 2000 (Eds). *Atlas de la province de l'Extrême Nord du Cameroun*. MINREST/INC/ORSTOM, 171 pages.
- Serra J., 1988. *Image analysis and Mathematical morphology, Vol 2*. London Academic Press, 411 pages.
- Simonneaux V., 1995. Généralisation d'images satellites classées en vue de leur intégration à un SIG. In *Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et systèmes d'information géographiques*. Actes d'un Symposium International organisé par l'International Soil Science society, Ouagadougou, Burkina Faso, 6-10 février 1995 ORSTOM Paris, pp. 231-246.
- Sklar F.H. and Costanza R., 1991. The development of dynamic spatial model for landscape ecology : a review and prognosis. In Turner, M.G. and Gardner R.H. (Eds). *Quantitative method in landscape ecology*. Ecological studies vol 82, New York : Springer Verlag, 239-288.
- SODECOTON, 2001. *Rapport annuel et statistiques agricoles*. SODECOTON.
- Suchel J.B., 1972. *La répartition et les régimes pluviométriques au Cameroun*. Travaux et Documents de géographie tropicale, n° 5, CEGET/CNRS Bordeaux, France, 283 pages.
- Teicheugang B. P., 2000. *Etat et perspectives de la réserve forestière de Zamay*. Mémoire d'ingénieur des Eaux et Forêt, Université de Dschang, 62 pages.

- Teyssier A., Hamadou O., Bachirou S., et Toukrou A., 2003. Expérience de médiation foncière entre pratiques coutumières et code foncier. In Jamin J.Y., Seiny Boukar L. et Floret C. (Eds), 2003. *Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis*. Actes du colloque, mai 2002, Garoua, Cameroun. Prasac, 10 pages.
- Tiffen M., Mortimore M., and Gichuki F., 1994. *More people Less Erosion: Environmental recovery in Kenya*. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, England.
- Timmermans D., 1998. *Evolution of cotton and Mouskouari sorghum area in the Diamaré Plain of the Far North Cameroon : Farmer's motivation towards land use in the context of increasing land scarcity* Environmental Development student Report n°96, 73 pages + Annexes.
- Timmermans D., et Degroot W. T., 2001. 'One tree is better than three cows' Motivations to invest in fruit orchards, North Cameroon. In Madi A., Loth P., Bauer H., and De Iongh H., (Eds) 2001. *Proceedings of an International Conference: Management of Fragile Ecosystems in the North of Cameroon, the need for an adaptive approach*. CEDC, Maroua, 13-16 November 2000, (17) 151-167.
- Toxopeus A., 1996. *ISM : An interactive spatial and temporal modelling system as a tool in ecosystem management*. Phd dissertation, ITC publication, n 44, 250 pages.
- Trebuil G., Kaojaern S., Traimongkongkool P., Ngermprasertsri N. and Castella J.C., 1994. *Dynamics of agrarian landscapes in western Thailand .Agro: ecological zonation and Agricultural transformations in Kaanjanaburi province: Hypotheses for improving Farming Systems Sustainability*. Doras project report, 86 pages.
- Triboulet C., 1995. *Les transformations des paysages du Diamaré et du bassin de la Bénoué (Nord Cameroun). Etude a l'aide de l'imagerie SPOT*. Thèse de doctorat de l'école des hautes études en sciences sociales, 629 pages.
- Turner II B.L., Skole D., Sanderson S., Günter F., Fresco L. and Leemans R., 1995. *Land –Use and Land-cover change: Science/Research Plan*. IGBP report N°35, HDP Report N°7, 132 pages.
- Turner II B. L., and Moss R.H., and Skole D.L., 1993. *Relating Land-use and Global Land-cover change : A proposal for an IGBP-HDP project*, 65 pages.
- Turner M. G., 1987. Spatial simulation of landscape changes in Georgia: a comparison of three transition models. *Landscape Ecology* 1: 29-36.
- USGS, 1998. *Elevation data*. US geological Survey, Hydro database at 1km for Africa., Sioux Falls, USGS.
- Van der Berg J., and Van Est D., 1991. *It is easier to handle 100 cows than 10 peoples : Evaluation of the agropastoral project Mindif-Moulvoudaye*. Student report, Leiden University, 55 pages + annexes.
- Van Well E., 1998. *A fuelwood model for North Cameroon: analyses of factors influencing demand and supply*. Wageningen Agricultural University, Department of Development Economic, 42 pages.
- Veldkamp A., and Fresco L.O., 1996. CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. *Ecological Modelling* 91 (1996) 231-248.
- Veldkamp A., and Fresco L. O., 1997. Exploring Land use scenarios, an alternative approach based on actual land use. *Agricuktural systems*, 55. No 11. pp 1-77.
- Veldkamp A., Verburg P.H., Kok K., De Koning G.H.J., Priess and Bergsma A.R., 2001. Environmental Modelling and Assessment 6 : 111-121, 2001.
- Verburg P.H., De Koning G.H.J., Kok K., Veldkamp A., and Bouma J., 1999. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of landuse change based upon actual landuse. In *Ecological modelling* 116, pp. 45-61.
- Verburg P.H., 2000. *Exploring the spatial and temporal dynamics of land use. With special reference to China*. Phd dissertation, Wageningen Agricultural University, 148 pages.
- Verburg P.H., Soepboer W., Veldkamp A., Espaldon V., and Sharifa M., 2002. Modelling the spatial dynamics of regional land use : the CLUE-S model. *Environmental Management* vol 30 No 3 pp. 391-405.
- Verburg P.H., Overmars K. P., and Witte N., 2004. *Accessibility and land use patterns at the forest fringe in the North Eastern part of the Philipines*. The Geographical Journal, Vol. 170, 2004.
- Von Thünen J. H., 1826. *Der isolierte Staat in Beziehung der Landwirtschaft und Nationalökonomie (The Isolated state)*, Ed. P. Hall, translated by Wartenberg C. M., Pergamon press Oxford, 299 pages.

Waffo J.C., 1996. *Impacts socio-économiques de l'exploitation du bois de feu dans quelques villages riverains au sud du Parc National de Waza*. Rapport de stage d'insertion professionnelle. Université de Dschang, Cameroun. 77 pages.

Wassouni, 2006. *Bushland in the Mindif region, Cameroon : functions, decline, context and prospects*. PhD dissertation, Leiden University, 213 pages.

Yengue J.L., 2000. *L'évolution du couvert ligneux dans l'Extrême Nord du Cameroun. Utilisation de la photographie aérienne et de l'imagerie satellitaire*. Thèse de doctorat de l'université de Paris I, 392 pages.

Yonta C., 2001. *Interface d'accès aux données de population et de statistiques agricoles : Province de l'Extrême Nord du Cameroun*. Mémoire de fin d'Etude pour le Diplôme Universitaire de Technologie, à l'IUT Fotso Victor de Bandjoun, Université de Dschang, 59 pages + cartes.

Zuiderwijk A., 1998. *Farming Gently, Farming Fast : Migration, incorporation and agricultural change in the Mandara Mountains of Northern Cameroon*. PhD thesis, Leiden University, 385 pages.

Zunga Q., Vagnini A., Lepage C., Touré I., Lieurain E., Bousquet F., 1998. Coupler SIG et système multi-agents pour modéliser les dynamiques de transformation des paysages. Le cas des dynamiques foncières de la moyenne vallée du zambèze (zimbabwe) *Actes du Colloque SMAGET sur les modèles et Systèmes Multi-agents pour la gestion de l'Environnement et des territoires*, 5-8 octobre 1998, CEMAGREF/ENGREF, Montpellier France, pp. 193-205.

Liste des figures et tableaux

Figures

- Figure 1.1 : Séquence des recherches contribuant à l'analyse des changements d'utilisation de l'espace
Figure 1.2 : Délimitation des savanes africaines entre le désert du Sahara et la zone tropicale humide
Figure 1.3 : Délimitation des grands ensembles écologiques du Cameroun
Figure 1.4 : Localisation de la région de l'Extrême Nord du Cameroun
Figure 1.5 : Un modèle graphique des dynamiques en cours dans la zone d'étude
Figure 2.1 : Illustration de la différence entre les concepts d'espace, d'occupation du sol et d'utilisation de l'espace
Figure 2.2 : Illustration des trois variantes de la notion d'échelle
Figure 2.3 : Interactions entre les composantes du système agricole et du système rural
Figure 2.4 : Hiérarchie et interaction entre les composantes du système agricole
Figure 2.5 : Trajectoires des changements agricoles selon les théories de Boserup et de Malthus
Figure 2.6 : Modèle de synthèse des différentes théories relatives aux dynamiques agricoles
Figure 2.7 : Modèle d'organisation concentrique de l'utilisation de l'espace d'après Von Thünen
Figure 3.1 : Procédure de traitement et d'analyse des images
Figure 3.2 : Algorithme de reconstruction géodésique
Figure 3.3 : Reconstruction géodésique d'une image binaire.
Figure 3.4 : Le bouchage des trous sur une image par inversion, reconstruction et inversion
Figure 3.5 : Extraction du réseau hydrographique à partir du Chapeau Haut de forme morphologique blanc
Figure 3.6 : Exemple de traitement d'une classe d'occupation du sol
Figure 3.7 : Illustration du résultat de la procédure de généralisation cartographique
Figure 3.8 : Comparaison des structures de la classification brute et de la classification généralisée.
Figure 3.9 : Rôle des outils de SIG dans l'analyse intégrée des dynamiques d'utilisation de l'espace
Figure 3.10 : Algorithme de construction des modèles de prédiction de chaque utilisation de l'espace.
Figure 3.11 : Exemple de courbe ROC du modèle de prédiction de l'utilisation de l'espace « Habitation »
Figure 3.12 : Typologie des modèles de simulation des dynamiques d'utilisation de l'espace
Figure 3.13 : Procédure d'allocation spatiale des changements dans la plateforme CLUE
Figure 3.14 : Echange d'information avec et entre les modules de la plateforme CLUE-S
Figure 4.1 : Illustration de l'influence de l'échelle d'analyse sur l'explication d'un phénomène
Figure 4.2 : Structure hiérarchique des composantes de recherche et des échelles d'analyse
Figure 4.3 : Procédure d'identification des niveaux ou échelles d'analyse des processus
Figure 4.4 : Hiérarchie des niveaux d'organisation de l'espace de la région des savanes d'Afrique Centrale
Figure 4.5 : Zonage de la diversité agroécologique des savanes d'Afrique Centrale
Figure 4.6 : Zonage des situations agroécologiques de la zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun
Figure 5.1 : Localisation des principales utilisations de l'espace de la région d'étude
Figure 5.2 : Une hiérarchie des formes d'utilisation des espaces cultivés
Figure 5.3 : Schéma de synthèse des interactions entre les sous-systèmes d'utilisation de l'espace
Figure 5.4 : Image Landsat MSS de 1975 et Landsat TM de 1984 sur la zone d'installation du barrage de Maga
Figure 5.5 : Interaction entre les potentiels facteurs déterminant les changements dans l'utilisation de l'espace
Figure 5.6 : Cartes de quelques facteurs déterminants d'ordre biophysique
Figure 5.7 : Cartes de quelques facteurs déterminants d'ordre humain
Figure 5.8 : Cartes de quelques facteurs déterminants d'ordre socio-économique
Figure 5.9 : Modélisation du processus de saturation foncière et trajectoires hypothétiques des changements
Figure 6.1 : Structure d'un système environnemental relatif à la gestion de l'espace
Figure 6.2 : Démarche de décomposition d'activité d'un système dans le formalisme SADT
Figure 6.3 : Diagramme fonctionnel de niveau 1 de SMALL Savannah
Figure 6.4 : Diagramme fonctionnel de niveau 2 de SMALL Savannah
Figure 6.5 : Diagramme du module d'observation et analyse spatiale
Figure 6.6 : Diagramme du module de diagnostic et de caractérisation
Figure 6.7 : Diagramme du module d'explication et de prédiction
Figure 6.8 : Diagramme du module de modélisation dynamique et de simulation
Figure 6.9 : Exemples de structure de données sur l'occupation et l'utilisation de l'espace
Figure 6.10 : Exemples de structure de données sur les facteurs biophysiques
Figure 6.11 : Exemples de structure de données sur les facteurs socio-démographiques

Figure 6.12 : Exemple de structure de données sur les facteurs géoéconomiques

Figure 6.13 : Diagramme du système informatique de SMALL Savannah

Figure 7.1 : Cadre conceptuel et outils de SMALL Savannah utilisés pour l'analyse de l'extension du sorgho repiqué

Figure 7.2 : Organisation spatio-temporelle de l'utilisation de l'espace dans un terroir villageois

Figure 7.3 : Niveau d'aptitude des sols à la culture du sorgho repiqué

Figure 7.4 : Evolution des superficies des principales cultures dans la zone cotonnière

Figure 7.5 : Cartes d'utilisation de l'espace à l'échelle des territoires villageois étudiés

Figure 8.1 : Localisation de la zone de référence, des scènes d'images satellites utilisées et des terroirs étudiés

Figure 8.2 : Cadre conceptuel et outils de SMALL Savannah utilisés pour l'analyse des changements d'occupation du sol.

Figure 8.3 : Organigramme des traitements effectués pour l'analyse des conversions de l'occupation du sol.

Figure 8.4 : Occupation du sol sur la région d'étude

Figure 8.5 : Superficie de chaque classe d'occupation du sol en 1987 et 1999 sur la zone d'étude

Figure 8.6 : Importance des principales conversions de l'occupation du sol entre 1987 et 1999

Figure 8.7 : Graphe des conversions d'occupation du sol entre 1987 et 1999 sur la zone d'étude.

Figure 8.8 : Evolution des superficies des principales occupations du sol au niveau des zones agroécologiques

Figure 8.9 : Evolution de la population de quelques villages des cantons de Moutouroua et Midjiving

Figure 8.10 : Carte des principales utilisations de l'espace dans la réserve forestière de Laf

Figure 8.11 : Superposition des usages et pouvoirs des acteurs intervenants dans la gestion de l'espace.

Figure 9.1 : Cadre conceptuel et outils de SMALL Savannah utilisés pour l'analyse des facteurs déterminants

Figure 9.2 : Effets du changement de résolution spatiale sur les structure de l'utilisation de l'espace

Figure 9.3 : Courbe de distribution de l'indice de population potentielle

Figure 9.4 : Cartes de quelques variables représentant les facteurs déterminants

Figure 9.5 : Courbes ROC des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « habitation »

Figure 9.6 : Courbes ROC des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « Maraicher/Verger »

Figure 9.7 : Courbes ROC des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « Culture pluviale »

Figure 9.8 : Courbes ROC des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « Sol nu »

Figure 9.9 : Courbes ROC des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « Sorgho repiqué »

Figure 9.10 : Courbes ROC des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « Brousse »

Figure 10.1 : Flux d'informations entre les modules de SMALL Savannah et de la plate-forme CLUE-S.

Figure 10.2 : Structure du modèle intégré des changements d'utilisation de l'espace autour de Maroua

Figure 10.3 : Carte de probabilité d'allocation de chaque type d'utilisation de l'espace.

Figure 10.4 : Modélisation des processus de changement d'utilisation de l'espace et trajectoires hypothétiques .

Figure 10.5 : Demandes d'allocation ou de récupération pour chaque utilisation de l'espace par scénario formulé.

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

Figure 10.7 : Les cartes de changements observés entre 1987 et 1999, et des changements prédits par le modèle.

Figure 10.8 : Carte de localisation des prédictions correctes et des erreurs de prédiction.

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

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

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

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

Figure 10.13 : Comparaison des performances du modèle de prédiction avec le modèle null à plusieurs résolutions.

Figure 10.14 : Evolution des superficies des 6 types d'utilisation de l'espace pour le scénario 1.

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 pour les trois scénarios considérés.

Figure 11.1 : Aperçu de la démarche d'analyse des dynamiques agraires suivie.

Figure 11.2 : Aperçu de la multiplicité des échelles prises en compte.

Figure 11.3 : Diagramme illustrant la contribution de la modélisation au développement du SIE.

Figure 11.4 : Succession des résultats thématiques produits à l'issue de la mise en œuvre du SIE.

Tableaux

- Tableau 4.1 : Processus et niveaux d'analyse géographique
- Tableau 4.2 : Niveaux d'analyse géographique, données spatiales et méthode d'acquisition
- Tableau 4.3 : Caractéristiques des zones agroécologiques de la région d'étude
- Tableau 7.1 : Description des caractéristiques des classes d'aptitudes de sol à la culture du sorgho repiqué
- Tableau 8.1 : Matrice de confusion entre carte d'occupation du sol et vérité de terrain
- Tableau 9.1 : Caractéristiques des variables décrivant l'utilisation de l'espace et ses changements
- Tableau 9.2 : Caractéristiques des variables décrivant les facteurs biophysiques
- Tableau 9.3 : Caractéristiques des variables décrivant les facteurs sociodémographiques
- Tableau 9.4 : Caractéristiques des variables décrivant les facteurs géoéconomiques
- Tableau 9.5 : Vitesse de déplacement moyenne en km/h pour les différentes catégories de route
- Tableau 9.6 : Facteur de résistance associé aux différentes entités spatiales.
- Tableau 9.7 : Paramètres des régressions simples pour l'utilisation de l'espace « habitation »
- Tableau 9.8 : Paramètres des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « zone d'habitation »
- Tableau 9.9 : Paramètres des régressions simples pour l'utilisation de l'espace « Maraîchers/vergers ».
- Tableau 9.10 : Paramètres des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « maraîcher/verger »
- Tableau 9.11 : Paramètres des régressions simples pour les utilisations Cultures pluviales
- Tableau 9.12 : Paramètres des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « Culture pluviale »
- Tableau 9.13 : Paramètres des régressions simples pour les utilisations « sol nu »
- Tableau 9.14 : Paramètres des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « sol nu »
- Tableau 9.15 : Paramètres des régressions simples pour l'utilisation de l'espace « sorgho de contre saison »
- Tableau 9.16 : Paramètres des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « sorgho de contre saison »
- Tableau 9.17 : Paramètres des régressions simples pour l'utilisation de l'espace « brousse »
- Tableau 9.18 : Paramètres des modèles de régression finaux de l'utilisation de l'espace « brousse ».
- Tableau 9.19 : Combinaisons des variables explicatives et performance des modèles de prédiction
- Tableau 10.1 : La matrice de transition de l'utilisation de l'espace du modèle de simulation développé.
- Tableau 10.2 : Elasticité des différents types d'utilisation de l'espace résultant de la calibration
- Tableau 10.3 : Accroissement observé des superficies de chaque utilisation de l'espace entre 1987 et 1999
- Tableau 10.4. Direction et taux de changement de chaque utilisation de l'espace pour les scénarios 2 et 3

Résumé de la thèse

Problématique et objectif de l'étude

Les systèmes d'utilisation de l'espace comme la plupart des systèmes environnementaux sont très complexes. Cette complexité provient des dynamiques spatio-temporelles, du nombre important d'interactions entre ses composantes et de l'imbrication des échelles auxquelles opèrent les processus. La compréhension de ces liens interactifs et dynamiques est une priorité pour le développement durable des communautés rurales dans la mesure où elle constitue un préalable pour la mise en œuvre d'outils de gestion et d'aide à la décision. Au sein de la communauté scientifique qui étudie les changements environnementaux, il y a une prise de conscience croissante de la nécessité d'adopter des approches plus intégrées et d'élaborer des outils adaptés pour analyser les changements l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants d'ordre biophysique, socioéconomique et politique. Avec l'importance prise par les problèmes environnementaux ces dernières décennies, on a ainsi assisté à la mise en place de nombreux projets internationaux visant à constituer des Systèmes d'Information (SI) pour répondre aux besoins d'analyse et de suivi des phénomènes dans différents secteurs où l'information est au cœur des processus de décision. Toutefois, les méthodes de développement de Système d'Information conçues pour des applications plus simples ne sont pas adaptées pour répondre aux particularités des Systèmes d'Information sur l'Environnement (SIE). L'Extrême Nord du Cameroun est un exemple de région de savanes d'Afrique centrale où on a observé de nombreuses transformations des paysages agraires impulsées par la forte pression démographique et l'importance des mobilités humaine et animale. Ces dynamiques ont conduit dans plusieurs cas à une saturation foncière et à une compétition plus accrue entre les formes d'utilisation de l'espace et des conflits entre utilisateurs. Un enjeu majeur du développement dans ce contexte c'est d'identifier les stratégies que les acteurs impliqués dans la gestion du système d'utilisation de l'espace devront mettre en place pour éviter de basculer dans une spirale de dégradation des ressources et de pauvreté.

La présente thèse a pour objectif de spécifier et le développer SMALL Savannah, un exemple de Système d'Information sur l'Environnement conçu pour l'analyse intégrée de ces dynamiques, en vue de l'exploration des trajectoires d'évolution des changements dans un avenir proche. Les objectifs spécifiques de ce SIE sont : 1) caractériser à différentes échelles, les grandes dynamiques agraires survenues au cours des dernières décennies ; 2) explorer les facteurs déterminants potentiels et identifier les relations avec la structure et les changements d'utilisation de l'espace ; et 3) simuler les dynamiques d'utilisation de l'espace en vue d'explorer les scénarios d'évolution future. Cette thèse devrait à travers cette étude de cas, contribuer à la définition et à la spécification de la structure des SIE que nous considérons comme une étape préalable à la proposition de toute méthode de conception adaptée (**chapitre 1**).

Approche et méthodologie de l'étude

La complexité des systèmes d'utilisation de l'espace exige de recourir à des méthodes d'analyse adaptées pour comprendre les processus qui y opèrent. Les approches et modèles le plus souvent utilisés pour analyser l'utilisation de l'espace sont influencées par les traditions disciplinaires et ne fournissent pas une compréhension complète du système. La démarche proposée dans cette thèse pour atteindre les objectifs fixés ci-dessus, est une démarche interdisciplinaire qui s'articule autour des approches d'analyse spatiale, d'analyse systémique et de modélisation dynamique pour mieux appréhender les caractéristiques clés et la nature complexe du système agraire. La théorie des systèmes fournit des concepts appropriés pour caractériser la structure des systèmes agraires et représenter leur dynamique. Les approches d'analyse spatiale et systémique sont utilisées pour intégrer les connaissances spatiales avec celles fournies par les approches classiques partant d'enquêtes socio-économiques et historiques où l'accent est mis sur les relations entre acteurs et utilisation de l'espace au niveau local. La modélisation intégrée et la simulation des dynamiques d'utilisation de l'espace sont proposées comme une approche scientifique appropriée pour mieux comprendre le fonctionnement de ces systèmes et explorer les trajectoires d'évolution des changements d'utilisation de l'espace (**chapitre 2**).

Les données nécessaires pour représenter ces phénomènes environnementaux sont très hétérogènes et exigent de recourir à une diversité d'outils logiciels et de modèles pour le stockage, le traitement et l'analyse. Les changements d'utilisation de l'espace à l'échelle régionale ont été étudiés en combinant les observations directes, la télédétection et les SIG pour mieux comprendre l'organisation des paysages et suivre leur évolution. Les outils d'analyse statistique ont été utiles pour identifier les principaux facteurs déterminants les changements d'utilisation de l'espace en s'appuyant sur les tendances actuelles et la comparaison de séries de données. Les plateformes de modélisation et simulation sont utilisées pour explorer les trajectoires des changements d'utilisation de l'espace et fournir ainsi des informations utiles à la prise de décision (**chapitre 3**).

Le Système d'Information sur l'Environnement développé dans cette thèse repose sur un dispositif qui prend en compte l'effet des changements d'échelle et l'articulation entre les différentes échelles d'observation ou d'analyse. En effet, l'identification des niveaux appropriés d'analyse et de représentation des données, ainsi que le développement d'approches multi-échelle et surtout multi-niveau d'organisation sont de plus en plus déterminants dans les études sur les écosystèmes. Le dispositif multi-échelle proposé met en exergue les différents niveaux d'analyse et les problématiques dominantes. Les relations entre données disponibles et échelles d'observation sont ensuite abordées. Les besoins de changement d'échelle ou d'articulation entre différents niveaux d'analyse ont été formulés et quelques méthodes appropriées à ces opérations ont été décrites (**chapitre 4**). La démarche de développement du SIE SMALL Savannah couvre les trois principales phases d'une méthode classique de développement d'un SI à savoir l'analyse préalable du système réel, la conception du système d'information organisationnelle et informatisée, et la mise en œuvre des applications.

Analyse préalable du système d'utilisation de l'espace et conception du SIE

La zone d'étude est une région de l'Extrême Nord du Cameroun, en zone des savanes d'Afrique centrale dont le système d'utilisation de l'espace est caractérisé par des fortes densités de population, une diversité du peuplement, d'importants flux migratoires et une grande prédominance des activités agricoles et pastorales. On a observé au cours des deux dernières décennies d'importantes mutations dans les systèmes de mise en valeur de l'espace de cette région. L'état des lieux effectué au **chapitre 5** montre que la pression démographique a contribué au développement d'un système de mise en valeur extensif, conduisant à une saturation progressive de l'espace dans plusieurs terroirs. Ces dynamiques ont également conduit à une compétition importante entre les formes d'utilisation de l'espace et aux conflits entre les différents acteurs. La réponse la plus couramment observée face à cette situation est le déplacement des populations vers des zones plus productives confirmant l'hypothèse d'une trajectoire de type malthusienne. La relative stabilité observée dans plusieurs cas traduit la résilience de l'écosystème naturel de ces régions de savanes. Toutefois, quelques signes d'intensification au sens de Boserup sont perceptibles mais la véritable transition agraire reste attendue. Les hypothèses formulées sur la base de ces observations considèrent que les trajectoires futures vont principalement dépendre des investissements que les acteurs locaux et urbains vont consentir pour la gestion et l'aménagement de l'espace.

Le système d'information SMALL Savannah est donc conçu dans ce contexte pour analyser ces dynamiques d'utilisation de l'espace et explorer les scénarios d'évolution future. SMALL Savannah est un ensemble de concepts, méthodes, outils et données permettant de caractériser la structure et explorer les dynamiques du système d'utilisation de l'espace, en référence aux problèmes environnementaux et de développement auxquels font face les communautés rurales de la zone d'étude. C'est un exemple de SIE qui intègre 1) un module d'observation et d'analyse spatiale qui repose sur un SIG et permet la représentation des phénomènes à partir des données géographiques de sources variées, 2) un module de diagnostic qui s'appuie sur la synthèse des informations de sources variées pour caractériser la structure et le fonctionnement du système agraire, 3) un module de prédiction qui repose sur un logiciel d'analyse statistique et permet d'expliquer la structure et les dynamiques d'utilisation de l'espace, et 4) un module de modélisation dynamique et de simulation qui permet d'explorer les trajectoires des changements d'utilisation de l'espace en vue d'une gestion

durable (**chapitre 6**). Les quatre derniers chapitres de cette thèse (troisième partie) sont consacrés à quatre exemples d'application qui illustrent plus ou moins la mise en œuvre de chacun de ces modules.

Mise en œuvre du SIE SMALL Savannah

L'analyse spatiale de l'extension récente de la culture du sorgho de contre saison présentée au **chapitre 7**, est une application qui illustre le processus de saturation foncière qui est en cours dans la région. Le sorgho de contre saison est une culture vivrière qui joue un rôle important dans le maintien de la sécurité alimentaire en zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. Au cours des deux dernières décennies, on a observé un intérêt croissant des producteurs pour cette culture qui a conduit à la mise en place d'un système extensif avec des conséquences remarquables sur la gestion durable du système d'utilisation de l'espace. Le Système d'Information SMALL Savannah est utilisé comme cadre conceptuel et outil pour analyser les causes et les conséquences de cette dynamique. Les résultats issus de cette application indiquent que la culture a renforcé sa place dans les zones de production traditionnelles et a connu une extension vers de nouvelles zones où la culture n'était pas pratiquée autrefois. Cette extension a été possible grâce aux conditions favorables du milieu physique et une forte demande impulsée par un contexte où la sécurité alimentaire demeure incertaine. Les défrichements importants et la réduction de la jachère ont conduit à une destruction importante du potentiel ligneux, une dégradation des sols, et une réduction de la disponibilité des pâturages. Il s'est développé autour de la production et de la commercialisation du sorgho repiqué une généralisation de la rente foncière et de la spéculation. Les stratégies des acteurs face à ces mutations diffèrent en fonction du contexte local, mais la réponse la plus observée reste principalement dominée par des pratiques extensives et une logique de satisfaction des besoins alimentaires. Toutefois, les signes d'intensification et de passage à une culture de rente sont perceptibles et se traduisent par une complémentarité avec le système d'élevage et l'implication des acteurs urbains. Le contexte agricole régionale porte à croire que le rôle de cette culture dans l'agro système va se renforcer au cours du temps. Prédire les impacts liés à la future expansion de cette culture est d'une importance essentielle pour le développement de cette région. Ceci nécessite une compréhension plus fine des règles d'accès à la terre, des stratégies de mise en valeur de l'espace et des interactions entre les différents acteurs impliqués.

La localisation et les mesures précises des changements d'occupation du sol sont à ces effets très importants pour évaluer les dynamiques agraires et comprendre les processus qui les gouvernent. Toutefois, ces informations sont très difficiles à obtenir ou à suivre sur de vastes régions avec les méthodes d'enquête traditionnelles. Au **chapitre 8**, le Système d'Information SMALL Savannah est utilisé comme outil pour l'observation et l'analyse spatiale des changements d'occupation du sol dans la région autour de Maroua dans l'Extrême Nord du Cameroun. Une analyse diachronique et multi-niveau a été effectuée en utilisant un couple d'images satellites de 1987 et 1999. L'approche d'analyse d'image combine les traitements automatiques et la photo-interprétation pour dériver des structures d'occupation du sol pertinentes. La validation est effectuée sur la carte la plus récente en utilisant les données GPS comme référence. Les informations sur les erreurs de réalisation permettent d'améliorer la précision des cartes obtenues. Le croisement des cartes sous le SIG indique que les savanes boisées ont considérablement diminué (- 31%) au profit de l'extension des zones cultivées qui concerne principalement la culture du sorgho de contre saison (+ 44%) et les zones de cultures pluviales (+36%). Plus récemment, on a également observé une tendance à la récupération des sols nus le plus souvent dégradés pour les activités agricoles (-39%). Les jachères sont de plus en plus rares et les superficies des zones où on observe la reprise de la végétation ligneuse sont assez faibles (4%). L'analyse au niveau local permet d'avoir des connaissances plus pertinentes sur la diversité des situations et de mieux expliciter les stratégies des acteurs face aux différentes mutations. Des propositions d'aménagement et de gestion de l'espace adaptées peuvent ainsi être dérivées.

La connaissance des relations quantitatives entre la structure de l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants d'ordre biophysique et socioéconomique est également une étape très importante dans la construction des modèles spatiaux dynamiques de type empirique. Le choix des variables à inclure

dans ces modèles est le plus souvent difficile du fait de la complexité des processus en jeu dans les systèmes d'utilisation de l'espace. Le **chapitre 9** décrit la mise en œuvre d'une méthode combinant les approches inductive et déductive pour identifier les facteurs les plus pertinents qui expliquent la structure et les changements d'utilisation de l'espace dans la région autour de Maroua dans l'Extrême Nord du Cameroun. A partir des couches d'information extraites de la base de données du SIE SMALL Savannah, l'analyse spatiale a permis de calculer des variables représentant au mieux les processus étudiés. La procédure de sélection des variables s'appuie sur une analyse de type régression logistique. Un modèle de prédiction de la structure et des changements au cours de la période 1987 et 1999 a été construit pour chacune des 6 utilisations de l'espace considérées dans la zone d'étude. Les résultats de cette application confirment la très forte influence du centre urbain et révèlent celle des potentialités des terres agricoles sur les formes d'utilisation de l'espace. La pression sur l'espace évaluée à partir d'un indice de population potentielle explique mieux les structures et les changements que la densité de la population. Sur le plan méthodologique, les résultats illustrent l'intérêt d'une approche d'analyse plus déductive et intégrée qui prend en compte les processus réels et la multiplicité des interactions entre l'utilisation de l'espace et un ensemble de facteurs déterminants. Cette application fournit des éléments de compréhension du système d'utilisation de l'espace de la région et les informations quantitatives obtenues sont utilisées pour la modélisation dynamique et la simulation des changements d'utilisation de l'espace dans un futur proche.

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. Le **chapitre 10** 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 observés et les hypothèses de transition du système d'utilisation de l'espace tels 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.

Conclusion et perspectives

La recherche menée dans le cadre de cette thèse a permis de définir et spécifier les systèmes d'informations sur l'environnement en s'appuyant sur l'exemple du système d'utilisation dans la région de savanes de l'Extrême Nord du Cameroun où on a observé au cours des deux dernières décennies, de nombreuses transformations des paysages agraires impulsées par la forte pression démographique et l'importante mobilité humaine. Le Système d'Information développé pour ce cas et dénommé SMALL Savannah est un ensemble de concepts, méthodes, outils et données permettant de caractériser la structure et explorer les dynamiques du système d'utilisation de l'espace, en référence aux problèmes environnementaux et de développement auxquels font face les communautés rurales de la zone d'étude. Ce travail présente un double intérêt : scientifique et opérationnel (**chapitre 11**). Sur le plan scientifique, les modèles descriptifs proposés mettent en exergue les propriétés complexes des systèmes d'utilisation de l'espace et suggèrent ainsi des éléments pour adapter et enrichir les méthodes d'analyse et de conception existantes. Les conclusions et perspectives suivantes peuvent être dégagées. L'espace est une caractéristique importante des systèmes environnementaux dans la mesure

où elle constitue le support de la plupart des processus étudiés. La conception et la mise en œuvre d'un SIE devraient prendre explicitement en compte la composante spatiale des phénomènes étudiés en proposant des approches appropriées. Un défi important dans cette perspective reste l'association des phénomènes sociaux avec les dynamiques spatiales qu'ils gouvernent. Les questions d'échelle sont très importantes et omniprésentes dans presque toutes les applications environnementales. Une attention particulière devrait y être apportée au cours des différentes phases du développement des SIE. Les questions se posent en terme d'identification et de choix d'échelles appropriées pour l'observation, l'analyse ou pour la représentation des données et en terme d'articulation entre ces différentes échelles. La modélisation et la simulation dynamique se présentent comme des outils indispensables dans le cycle de vie d'un SIE. L'étape de modélisation devrait être prise en compte dans les phases d'analyse, de conception et mise en œuvre des SIE. Compte tenu de la diversité et de la complexité des données environnementales manipulées leur stockage, traitement et analyse font appel à une large gamme d'outils logiciels spécialisés tels que les SIG, les SGBD, les logiciels de traitement d'images, les modules d'analyse statistique, les systèmes experts, les plate-formes de simulation, etc. La conception et l'implémentation d'un Système d'Information sur l'Environnement doit le plus souvent intégrer plusieurs de ces outils qui ont chacun une contribution spécifique à la finalité du système. L'étape de mise en œuvre montre que plusieurs tâches nécessitent une expertise pour interpréter les résultats et faire des choix pour les tâches suivantes. L'intégration des logiciels d'application et le développement des interfaces Homme-Machine pour les SIE exigent donc une analyse préalable pour identifier les besoins prioritaires de communication et spécifier les structures de données à échanger, ainsi que les composants logiciels qui devront assurer le contrôle des données et leur stockage.

Sur le plan opérationnel, le SIE développé fournit des informations et connaissances qui aident à mieux comprendre les dynamiques agraires, à explorer les scénarios d'évolution des changements, à établir les bases d'une planification de l'utilisation de l'espace et à préparer la négociation entre les acteurs impliqués dans la gestion. Les grandes dynamiques agraires de la zone d'étude se présentent comme une conséquence de la croissance démographique, combinée avec la diversité et de la dynamique du peuplement humain. L'expansion agricole a été identifiée comme un processus central qui présente d'importantes interactions avec les dynamiques du système d'élevage et d'approvisionnement en bois de feu. Les aires protégées sont également soumises à des évolutions qui dépendent de ces processus. En particulier, la culture du sorgho de contre saison apparaît comme une composante essentielle du système agricole de la région. Elle joue un rôle important dans le maintien de la sécurité alimentaire et influence fortement la dynamique des autres systèmes de mise en valeur de l'espace. Le contexte agricole de la région porte à croire que le rôle de cette culture dans l'agro-système va se renforcer au cours du temps. Des recherches et des actions concrètes sont nécessaires pour accompagner ce processus et atténuer les impacts négatifs.

Une exploration de l'ensemble des facteurs déterminant les changements d'utilisation de l'espace montre que l'accessibilité au principal centre urbain, les potentialités des terres agricoles et la pression humaine sur l'espace évaluée à partir d'un indice de population potentielle expliquent mieux les structures et les changements. Les connaissances détaillées fournies par cette analyse peuvent être utilisées comme hypothèse de départ pour une étude sur un thème spécifique. Sur le plan pratique, il est important pour tout projet de développement qui intervient dans la gestion de l'espace de connaître sous quelles conditions s'établissent les différentes formes d'utilisation de l'espace. Cette caractérisation du système d'utilisation de l'espace et de ses variations spatiales en fonction des conditions biophysiques, sociodémographique, géoéconomique et politique est donc d'une grande importance pour l'élaboration des outils de gestion de l'espace et d'aide à la décision. Les simulations effectuées pour la période 1999-2010 indiquent les zones où des changements peuvent survenir, offrant ainsi la possibilité d'évaluer l'impact d'une politique donnée de gestion et d'utilisation de l'espace. La base de données portant sur l'utilisation de l'espace et les facteurs déterminants potentiels peut être mise au service des chercheurs et acteurs impliqués dans l'utilisation et la gestion de l'espace. Le modèle de simulation se présente comme un outil approprié pour un observatoire des dynamiques agraires et du développement rural. Il peut être utilisé par les scientifiques et les acteurs impliqués dans la planification pour la prise de décision et une gestion adaptative de l'espace. Une utilisation peut également être envisagée avec les acteurs locaux pour susciter les discussions et préparer la

concertation ou la négociation dans le cadre de démarches participatives d'utilisation et de gestion de l'espace. Le modèle de simulation peut également être utilisé par les chercheurs travaillant dans la zone d'étude pour tester des hypothèses sur l'évolution possible des trajectoires de changement d'utilisation de l'espace.

Les priorités des travaux futurs sur le plan méthodologique devraient inclure le développement d'approches de modélisation centré individu qui abordent mieux les décisions des acteurs, leurs stratégies de mise en valeur de l'espace, les réseaux sociaux qui se projettent dans l'espace et leurs interactions. Le développement de modèles de type multi-agents et leur intégration avec le SIG existant est à cet effet, une perspective prometteuse. SMALL Savannah est un exemple d'application qui met en exergue les problématiques importantes liées au développement des SIE. Les résultats de cette étude de cas fournissent à cet effet des éléments pour guider l'adaptation et l'enrichissement des méthodes de conception existantes.

Summary of the thesis

Problem and objective of the study

Like many environmental systems, land use systems are very complex. The complexity of these systems stems mainly from the existence of spatial and temporal dynamics, the combination of a large number of interactions and cross-scale processes. A better understanding of these interactive linkages is of great importance for the sustainable development of rural communities as this is a preliminary step in the development of management and decision support tools. The scientific community involved in environmental change studies is increasingly aware of the necessity to develop a more integrated approach and to elaborate appropriate tools for the analysis of the complex and dynamic interactions between land use changes and their biophysical, socio-economic and political driving factors. As a consequence of increasing environmental problems, there have been a growing number of international projects with the objective to develop Information Systems (IS) in various domains of environmental management, where information is crucial for decision making processes. However, methods and techniques that were designed for more simple applications are not appropriate to the requirements of Environmental Information Systems (EIS). The Far North of Cameroon is an example of central African savannas regions where an important number of agrarian landscape changes were observed as a consequence of a rapid increasing population with important human and animal mobilities. These changes have led to land saturation with more important competition between land types and conflict between actors. A key to sustainable development in this context is to identify which strategies will prevent the actors involved in land use and management from the natural resource degradation and poverty spiral.

The objective of the present thesis is to specify and develop SMALL Savannah, an example of Environmental Information System, designed for the integrated analysis of these changes in view of the exploration of land use change trajectories in the near future. The specific objectives of this EIS are: 1) to characterize at different scales the main land use changes in the region during the last two decades. 2) to identify the potential driving factors and quantify their relations with land use patterns and changes and 3) to build an integrated model for the simulation of land use dynamics and the exploration of scenarios for future changes. This thesis contributes to the definition and specification of the structure of EIS seen as a preliminary step for any attempt toward the proposition of an appropriate analysis and design method (**chapter 1**).

Approach and methodology of the study

The complexity of land use systems requires appropriate methods for their analysis and understanding of ongoing processes. However, existing approaches and models used for land change analysis are often influenced by disciplinary traditions and provide incomplete explanations of land processes. To reach the objectives stated above, this thesis proposes an interdisciplinary and integrated approach that combines spatial analysis techniques and system theories with dynamic modelling in order to capture key characteristics and the complex nature of agroecosystems. System theory provides appropriate concepts to characterize the structure of agrarian systems and to represent their dynamics. Spatial and system analyses are used to integrate spatial knowledge with those provided by traditional approaches using socio-economic and historical surveys, where the emphasis is placed on relations between actors and land use at a local level. Integrated modelling and dynamic simulation of land use is seen as an appropriate scientific approach for a better understanding of the functioning of these systems and the exploration of different pathways of land use change (**chapter 2**).

Data needed for the representation of these environmental phenomena, are heterogeneous and require the combined use of a wide range of tools and models for their storage, processing and analysis. Land use change at regional scale were analysed by combining direct observations, remote sensing and GIS to better understand landscape organisation and monitor its evolution. Statistical analysis tools were useful to identify the major land use drivers based on actual trends and comparisons of data series. A

modelling and simulation platform was used to explore land use change trajectories and provide key information for decision making (**chapter 3**).

The SMALL Savannah Environmental Information system developed in this thesis is based on a multi-scale framework that takes into account scale effects, cross-scale observation and analysis. The identification of appropriate scales for data representation and the development of multi-scale approaches are crucial issues in ecosystem studies. The multi-scale framework described in **chapter 4** emphasises the different levels of analysis and the corresponding dominant land use change processes or issues. Relations between available data and representation scales are also discussed and a review of different methods for changing scale and undertaking cross-scale analysis is proposed. The approach used to develop SMALL Savannah covers the three main phases of existing IS development methods namely the preliminary analysis of the real system, the design of the organisational and computerized Information System and the implementation of applications.

Preliminary analysis of the land use system and design of the EIS

The study area is a small region in the Far North of Cameroon, and part of the savannas areas of Central Africa. The region is characterised by high demographic pressure combined with increasing human diversity and mobility that have induced many changes in the land use system of the study area during the past two decades. In **chapter 5**, we present an overview of the main land cover types and land use changes that have occurred in different agro-ecological situations. The demographic pressure has led to extensive land use that has resulted in increasing land saturation and competition between land use types and conflict between actors. In most cases, farmers respond to land saturation by migrating to more productive land, confirming a Malthusian perspective. The relative stability in land use indicates the high resilience of savannas ecosystems. Few intensification signs in the sense of Boserup are emerging but the real agrarian transition is still expected. The model further assumes that future trajectories will depend on the investment that local and urban actors will allow to improve land quality and management.

The SMALL Savannah Information System developed in this thesis, is designed in this context in order to analyse these land use dynamics and to explore scenarios for future evolution. SMALL Savannah is a set of concepts, methods, tools and data used to explore land use dynamics with reference to environmental and development issues faces by rural communities of the study area. It is an example of EIS that combines 1) an observation and spatial analysis module based on a GIS for the representation of phenomena from various data sources, 2) a diagnosis module based on the synthesis of various information sources for the characterisation of the structure and functioning of the agrarian system; 3) a prediction module based on a statistical package for the explanation of land use change pattern; and 4) a dynamic modelling and simulation module for the exploration of land use change trajectories geared toward a sustainable management (**chapter 6**). The four last chapters of this thesis are devoted to four application examples that illustrate more or less the implementation of each module.

Implementation of the SMALL Savannah EIS

The spatial analysis of the recent expansion of dry season sorghum in the study area presented in **chapter 7** is an application that illustrates the ongoing land saturation processes observed in the region. Dry season sorghum is a food crop, which plays an important role in maintaining food security in the savannah area in the far North of Cameroon. During the last two decades, there has been an increasing interest of producers for this food crop which led to extensive land use practices with remarkable consequences on the sustainable management of different land uses. SMALL Savannah is used as a conceptual framework and a tool for analysing the causes and consequences of this dynamic. The crop has reinforced its position in traditional production areas and has expanded into new areas where it was not produced in the past. This recent extension has mainly been driven by an environment, which offers favourable growing conditions and generates a high demand for food in a context where food security remains uncertain. The large scale land clearing and the reduction of fallows has led to an

important destruction of woody vegetation, soil degradation and a reduction of pasture availability. The crop's expansion has also encouraged land renting and speculation, in the production and commercialisation process. Actor's strategies to face the ongoing changes vary according to local context but the most observed response is mainly dominated by extensive land use practices and food subsistence as the main production motivation. However, there are emerging signs of intensification characterised by a beneficial integration with livestock and the increased involvement of urban actors. The regional agricultural context favours a more important role of dry season sorghum in the land use system. Predicting the impacts associated with its future expansion is a key to the development of the region. This requires a detail understanding of land tenure rules, land use strategies and interactions between all the actors involved.

In this perspective, the location and accurate measurements of changes in land cover are very important for evaluating land use dynamics and a better understanding the underlying processes. However, this information on land cover is often very difficult to obtain with traditional survey methods for relatively large areas and extended periods of time. In **chapter 8**, the Environmental Information System SMALL Savanna is used as a tool for the observation and spatial analysis of land cover change in the region around Maroua, Far North of Cameroon. A diachronic and multilevel analysis is carried out, using a couple of satellite images from 1987 and 1999. Land cover patterns were derived following an approach that combines automatic image analysis with photo-interpretation. The most recent map was validated using GPS data gathered from field visits; corrections were made based on identified errors. Change analysis with GIS indicates an important decrease of the woody savannas area (-31%) which is replaced by cultivated area consisting largely of dry season agriculture (+44%) and rainfall agriculture fields (+36%). Recently, bare and often degraded land appears to be reclaimed for agricultural activities (-39%). There is an increasing scarcity of fallows and the total area where woody vegetation has recovered is extremely limited (4%). Local analysis helps to get more insight in the diversity of land use change and to explicit actor's strategies to face ongoing changes. Appropriate suggestions for land use management and planning can be derived from the results of our analyses.

The knowledge of quantitative relationships between land use patterns and biophysical as well as socioeconomic driving factors is also an important step in building dynamic GIS-based models. More often, the choice of variables to include in these models is difficult due to the complexity of the system and the underlying processes. **Chapter 9** describes the implementation of a method combining inductive and deductive approaches to identify the most pertinent sets of factors that explain land use patterns and change in a region around Maroua, Far North of Cameroon. Land use and driving factors data were derived from the SMALL Savannah EIS database. Spatial analysis is used to calculate variables that better represent the land use processes. The procedure of variable selection is based on a logistic regression model. A predictive model of land use pattern and change between 1987 and 1999 was built for each of the 6 land use types considered in the region. Results confirm the strong influence of the main urban centre and reveal that of soil suitability on land use types. Population pressure evaluated as a population potential index, explains land use patterns and changes more adequately than population density. This study has provides key elements for understanding the land use system of the study area. Quantitative information derived from this application is used to build a model that simulates spatial dynamics related to different trajectories of land use change.

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. **Chapter 10** 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.

Concluding remarks and prospects

In this research, the case of land use system in the far North of Cameroon was used to illustrate the definition and specification of the structure of Environmental Information Systems. This region is an example of central African savannas regions where an important number of agrarian landscape change were observed as a consequence of a rapid increasing population with important human and animal mobility. The SMALL Savannah Information System developed in this context is a set of concepts, method, tools and data that can be used to characterise land use patterns and to explore trajectories of changes, in reference to environmental and development issues faced by rural communities in the study area. The relevance of this research is twofold: scientific and substantive (**chapter 11**).

Scientifically, the descriptive models presented in this thesis exhibit the complex properties of land use systems that are used as guidelines for propositions related to the adaptation and enrichment of existing Information Systems development methods. A number of methodological conclusions and research perspective can be drawn from this research. We argue that space is an important characteristic of environmental system as it supports almost all land use processes. The design and implementation phases of an EIS should include appropriate approaches to explicitly take into account the spatial component of the studied processes. An important challenge in this perspective is the linkage between social phenomena and the underlying spatial dynamics. Scale issues are very important and can be found in almost all environmental applications. A particular attention should be paid to scale issues during the different phase of the development of an EIS. The major questions are related to the identification of appropriate scales for the representation, observation and analysis and also to implementation of cross-scale analysis that can improve our understanding the process studied. Modelling and dynamic simulations appear to be of great importance in life cycle of an EIS. A modelling step should be included in the different phases of an EIS design and implementation. Given the diversity and complexity of environmental data, the storage, processing and analysis require a wide range of specialised software like GIS, DBMS, image processing or statistical packages, expert systems, simulation platforms, etc. The design and implementation of EIS should integrate these tools in a common environment. The implementation of SMALL Savannah shows that many tasks require a human expertise to interpret results and operate choices for the following tasks. The integration of software applications and the development of interfaces for EIS require a preliminary analysis to identify priority needs for communication between software applications and to specify structure for data exchange and software components in charge of data control and storage.

On an operational point of view, the developed EIS provides useful information and knowledge that help to 1) improve our understanding of land use process; 2) explore scenarios of future evolution; 3) establish the basis of land use planning; and 4) prepare the negotiation between actors involved in land management. The main land use changes in the study area are the result of demographic pressure combined with the diversity and changes of human population. Agricultural expansion appears as a central process with important interactions with changes in other land use like firewood supply or animal breeding. Protected areas are also depending on these agricultural changes. In particular, dry season sorghum appears to be an essential component of the land use system of the Far North region of Cameroon. It plays an important role in maintaining food security and it greatly influences the dynamics of other land uses. The regional agricultural context favours a more important role for this crop in the land use system. Research and concrete actions need to be carried out to monitor the expansion process and mitigate its negative impacts. Results of the quantitative and spatial exploration of land use drivers reveal that the accessibility to the main urban centre, soil suitability on land use types and population pressure evaluated as a population potential index, explains land use patterns and changes more adequately than population density. The detail knowledge provided by this analysis can

be used to guide the formulation of research hypothesis in any specific study. Concretely, it is important for any development project to know under which conditions different land use are establishing. This characterisation of the land use system according to biophysical, socio-demographic, geo-economic and political conditions is of great importance for the implementation of management and decision support tools. The simulations carried out for the period 1999 to 2010 show areas where changes are likely to occur, providing the possibility to evaluate the spatial impact of a given land management policy. The database on land use and its potential driving factors should be extended to other themes and updated in order to support research and development projects.

The simulation model developed is an appropriate tool for a regional monitoring system of land use changes geared towards a more sustainable development of rural communities. Potential users are scientists and actors involved in land use planning for decision-making and adaptive management of land. Additional utilisation should be considered by local actors to discuss and prepare any dialogue or negotiation when dealing with participatory approaches of land use and management. The simulation model can be used by scientist working in the study area to test hypothesis on the possible land use change trajectories. Future research should focus on the development of an individual-based modelling approach that would better address actor decisions, their land use strategies, social networks and their interactions. The development of a multi-agents model and its integration with the existing GIS is a promising perspective in this respect. SMALL Savannah is an example of application that highlights important issues related to the design and implementation of Environmental Information System. Results from this case study provide guidelines to adapt and enrich the existing Information Systems design method.

Samenvatting

Probleemstelling van de studie

Net zoals vele andere mens-milieusystemen is landgebruik onderhevig aan complexe veranderingen. Deze complexiteit wordt veroorzaakt door invloeden die variëren in ruimte en tijd en de combinatie van vele grootschalige en kleinschalige processen. Een beter begrip van deze dynamiek is van groot belang voor duurzame ontwikkeling van rurale gemeenschappen, en staat daarom centraal in vervaardiging van hulpmiddelen voor besluitvorming. De wetenschappelijke gemeenschap die zich bezighoudt met landgebruikverandering is zich steeds meer bewust van de noodzaak om methoden uit te werken voor de analyse van landgebruikveranderingen in relatie tot de biofysische, sociale en politieke oorzaken daarvan. Een toenemend aantal internationale projecten houdt zich bezig met informatiesystemen voor milieubeheer, maar de meeste methoden en technieken daarbinnen zijn nog niet in staat om een bruikbaar Milieu-informatie Systeem te vormen dat bruikbaar is voor besluitvorming.

De provincie 'Extrême Nord' in Kameroen is een voorbeeld van een savannegebied waar een groot aantal landgebruikveranderingen optreedt als gevolg van bevolkingsgroei en grote mobiliteit van mensen en vee. Deze veranderingen hebben geleid tot landschaarste en meer concurrentie en conflict tussen de verschillende actoren. De sleutel tot duurzame ontwikkeling is hier om te bepalen welke stappen nodig zijn om te voorkomen dat mensen in een spiraal van armoede en milieuverval zullen geraken.

Tegen deze achtergrond is de doelstelling van deze dissertatie de ontwikkeling van SMALL Savannah, een Milieu-Informatiesysteem (MIS) voor de analyse van landgebruikveranderingen en de exploratie van ontwikkelingen in de nabije toekomst. De specifieke doelstellingen van dit MIS zijn (1) het op verschillende schal niveaus karakteriseren van de belangrijkste landgebruikveranderingen in de laatste twee decennia, (2) het identificeren en kwantificeren van de belangrijkste oorzaken van die veranderingen en (3) opbouw van een geïntegreerd model voor de simulatie van scenario's van toekomstige veranderingen. Hiermee draagt de dissertatie bij aan de specificatie van een MIS voor deze en andere regio's, als basis voor verdere modellering en besluitvorming (**Hoofdstuk 1**).

Aanpak van de studie

De complexiteit van landgebruiksystemen vergt discipline-overstijgende methoden van analyse. Bestaande methoden zijn echter veelal sterk beïnvloed door disciplinaire tradities, zodat slechts partiële inzichten ontstaan. Daarom wordt in **Hoofdstuk 2** van deze dissertatie een interdisciplinaire benadering voorgesteld die ruimtelijke analysetechnieken combineert met dynamische modellering. Systeemtheorie levert hierbij de concepten om complexiteit te representeren. Ruimtelijke analyses worden gebruikt om ruimtelijke patronen te combineren met sociale en economische data, met een nadruk op het lokale niveau. Geïntegreerde modellering en simulatie wordt vervolgens gebruikt voor begripsvorming rond oorzaken en toekomst van het landgebruik.

De data die nodig zijn voor de representatie van ruimtelijke verschijnselen zoals landgebruikverandering zijn heterogeen en vragen om een veelheid van technieken en modellen voor opslag, bewerking en analyse. In **Hoofdstuk 3** worden de technieken en modellen zoals toegepast in deze dissertatie beschreven. Enerzijds gaat het daarbij om de combinatie van directe observaties, remote sensing en GIS, toegespitst op het begrijpen en monitoren van de patronen in het landschap. Statistische analyses zijn vervolgens bruikbaar om oorzaken van de veranderingen aan te wijzen en besluitvorming te informeren over de toekomst. Deze analyses maken gebruik van een algemeen platform voor modellering en simulatie.

De identificatie van de juiste schaal voor datarepresentatie is van groot belang voor ecosysteemstudies. Daarom is het SMALL Savannah MIS dat in deze dissertatie is ontwikkeld gebaseerd op een multi-

schaal raamwerk. **Hoofdstuk 4** beschrijft dit raamwerk en de methoden die beschikbaar zijn voor schaal-analyses. De methode volgens welke SMALL Savannah is ontwikkeld volgt de drie algemene fasen van de ontwikkeling van informatiesystemen, te weten de verkennende analyse van het empirische systeem, het ontwerp en computerisatie van het informatiesysteem, en het toepassen daarvan.

Verkennende analyse en ontwerp van het MIS

Het onderzoeksgebied is een gedeelte van de Extrême Nord in Kameroen. Het gebied kent een hoge bevolkingsdruk gecombineerd met toenemende menselijke diversiteit en mobiliteit, die vele landgebruikveranderingen hebben veroorzaakt in de afgelopen 20 jaar. **Hoofdstuk 5** presenteert een overzicht van de belangrijkste vormen van landbedekking, landgebruik en de veranderingen daarin. De akkerbouw is nog steeds relatief extensief, zodat toenemende bevolking direct samengaat met toenemend oppervlak van akkerland, hetgeen geresulteerd heeft in schaarste, conflict en migratie naar nieuw land, conform een Malthusiaans ontwikkelingspad. De relatieve stabiliteit van de landgebruikvormen is en teken dat de bodems nog steeds niet geheel zijn uitgeput. Er zijn nog slechts weinig tekenen van intensivering te zien die een aanwijzing zouden kunnen zijn voor een overgang naar een meer Boserupiaans scenario, maar een dergelijke transitie, gekenmerkt door investeringen van rurale en urbane actoren in het land, is nog steeds mogelijk.

Het SMALL Savannah MIS dat in deze dissertatie wordt uiteengezet is ontworpen in deze context. Zoals beschreven in **Hoofdstuk 6** is SMALL Savannah een geheel van concepten, methoden, technieken en data gericht op problemen van milieu en ontwikkeling van rurale gemeenschappen in de regio. Het is een combinatie van (1) een module voor ruimtelijke observatie en analyse gebaseerd op GIS, (2) een module voor diagnose gebaseerd op een synthese van velerlei informatiebronnen over het agrarische systeem, (3) een voorspellingsmodule gebaseerd op een pakket statistische methoden voor de verklaring van landgebruikverandering, en (4) een dynamische simulatiemodule voor de verkenning van scenario's.

Toepassingen van SMALL Savannah

De laatste vier hoofdstukken van de dissertatie beschrijven toepassingen van het MIS, met ieder een zekere nadruk op een van de vier modules.

Mouskouari is een sorghum die in het droge seizoen groeit op water dat zich in het natte seizoen in kleibodems heeft verzamelt. De ruimtelijke analyse van de expansie van dit gewas is het onderwerp van **Hoofdstuk 7**. *Mouskouari* is een voedselgewas dat een belangrijke rol speelt in de voedselzekerheid van de regio. Gedurende de laatste twee decennia zijn producenten sterk geïnteresseerd geraakt in dit gewas, wat heeft geleid tot een opvallende expansie met consequenties voor andere vormen van landgebruik.

SMALL Savannah wordt gebruikt als het raamwerk voor analyse van oorzaken en gevolgen van deze expansie. Het gewas heeft zijn positie in traditionele productiegebieden versterkt en heeft zich ook uitgebreid naar nieuwe gebieden. Dit verschijnsel is vooral veroorzaakt door gunstige groeicondities in de regio en steeds stijgende voedselbehoefte. De grootschalige boskap en het verlies van braaklegging die hiermee gepaard gingen hebben geleid tot bodemdegradatie en een reductie van graasgronden. In sociaal opzicht heeft de uitbreiding bijgedragen tot verbreding van landspeculatie en het uithuren van land aan urbane rijken. Er zijn echter ook tekenen zichtbaar van intensivering, onder andere gekarakteriseerd door integratie met de veeteelt. De voorspelling van de gevolgen die verdergaande expansie zal hebben is een sleutel voor de ontwikkeling van de regio. Hiervoor noodzakelijk is een verdergaand begrip over landrechten, landgebruikstrategieën en de interactie tussen de betrokken actoren.

Hoofdstuk 8 richt zich op een dergelijke meer gedetailleerde beschrijving van landgebruikverandering in een kleinere regio rond de stad Maroua. SMALL Savannah wordt gebruikt voor een diachrone

analyse op meerdere schaalniveaus onder gebruikmaking van satellietbeelden uit 1987 en 1999, waarin de beeldanalyse wordt gecombineerd met foto-interpretaties. De meest recente kaart werd gevalideerd via veldbezoeken en GPS. De analyse laat zien dat bebost gebied is afgenomen met 31%, voornamelijk veroorzaakt door uitbreiding van de *moussouariteelt* (+44%) en overige akkerbouw (+36%). Echter ook marginaal land (-39%) blijkt in gebruik te kunnen komen voor akkerbouw. De hoeveelheid braaklegging neemt daarbij echter sterk af en het oppervlakte land waar boomrijke vegetatie weer terug komt is uiterst beperkt. Een dergelijke analyse ondersteunt de verkrijging van inzicht in het landgebruik en de strategieën die de actoren hebben, en vormt daarmee de basis voor beleid ten behoeve van duurzamer landgebruik.

Kennis over de kwantitatieve relatie tussen landgebruik verandering en zijn biofysische en sociale oorzaken is een belangrijke stap in de bouw van dynamische landgebruikmodellen. De keuze van variabelen die in dergelijke modellen worden opgenomen is vaak moeilijk vanwege de complexiteit van het systeem en de onderliggende processen.

Hoofdstuk 9 beschrijft de toepassing van de methode die een inductieve en een deductieve benadering combineert om de meest centrale factoren in landgebruikverandering rond Maroua te identificeren, gebaseerd op de SMALL Savannah data. De procedure van selectie van variabelen is gebaseerd op een logistische regressie. Een voorspellend model van landgebruikverandering tussen 1987 en 1999 is opgezet voor ieder van de zes belangrijkste landgebruiktypen in de regio. De resultaten bevestigen de sterke invloed van Maroua als urbaan centrum en tevens van de geschiktheid van de bodem voor de landgebruiktypen. Bevolkingsdruk uitgedrukt als 'population potential index' verklaart het landgebruik beter dan bevolkingsdichtheid. Dit hoofdstuk levert sleutelementen voor het begrijpen van landgebruikverandering van het studiegebied.

Dynamische ruimtelijke modellen zijn belangrijke hulpmiddelen voor de studie van complexe systemen. Hierbij is het vooral van belang om verschillende factoren te integreren. **Hoofdstuk 10** beschrijft een geïntegreerd model ontwikkeld om toekomstige landgebruikscenario's in het gebied rond Maroua te verkennen. Het model simuleert de concurrentie tussen verschillende landgebruikvormen, rekening houdend met een aantal biofysische, demografische en economische oorzaken. De procedure om landgebruikveranderingen binnen die competitie te voorspellen combineert de resultaten van de ruimtelijke analyses en de voorspellingsmodule van SMALL Savannah. De validatie van het model betrof de periode 1987 tot 1999 en de simulatie van de verandering richtte zich op de periode 1999 tot 2010. Drie scenario's werden verkend op basis van geobserveerde trends en hypothesen over landgebruik transitie, gebaseerd op de visies van Malthus en Boserup. De belangrijkste dynamiek in het landgebruik wordt veroorzaakt door de expansie van *moussouari* en de ontwikkeling van de teelt van de groenten en fruit, waardoor tevens meer concurrentie in het land ontstaat. Het ontwikkelde model lijkt een efficiënte ondersteuning voor landgebruikplanning te kunnen zijn. Het kan ook worden gebruikt in participatieve toepassingen, samen met beleidsactoren.

Conclusies en vooruitblik

In deze dissertatie is het landgebruikstelsel in Noord-Kameroen gebruikt als illustratie van de specificatie van de structuur van Milieu-informatie systemen. Deze regio is een goed voorbeeld van het semi-aride ('Sahel') gebied in Centraal-Afrika waar grote landgebruikveranderingen optreden als gevolg van bevolkingsgroei. In **Hoofdstuk 11** worden belangrijkste karakteristieken van SMALL Savannah samengevat, mede met het oog op de methodische en inhoudelijke relevantie van dit werk.

In methodisch opzicht kunnen de modellen en methoden zoals in deze dissertatie ontwikkeld gezien worden als voorstellen voor aanpassing en verrijking van bestaande methoden voor de ontwikkeling van informatiesystemen. Er wordt bijvoorbeeld aangetoond dat de geografie van processen een essentieel kenmerk is en daarom horen milieugerichte informatie systemen ruimtelijkheid expliciet in zich op te nemen. Een belangrijke uitdaging in dit verband is het leggen van de verbanden tussen sociale verschijnselen en ruimtelijke dynamiek. Verschillende schaalniveaus zijn hierbij belangrijk en

vragen speciale aandacht in de ontwikkeling van informatiesystemen. Belangrijke vragen betreffen dan bijvoorbeeld de juiste schaal voor de representatie en analyse van verschillende processen, benevens de analyse van verbindingen tussen die niveaus. Modelling en dynamische simulatie lijken van groot belang voor de vitaliteit van een informatiesysteem. Een modelleringstap behoort daarom te worden opgenomen in het ontwerp van informatiesystemen. Deze stap zal dan geïntegreerd moeten worden met het brede scala aan gespecialiseerde software (GIS, DBMS, beeldverwerkingstechnieken, statistiek, simulatie etc.) dat gezien deze complexiteit van de problematiek vrijwel altijd nodig zal zijn. De implementatie van SMALL Savannah laat echter ook zien dat menselijke expertise altijd nodig zal blijven om keuzen te maken en te rechtvaardigen.

Op operationeel niveau verschaft het hier ontwikkelde informatiesysteem kennis die helpt om (1) ons begrip van landgebruikverandering te versterken, (2) scenario's te exploreren (3) een basis te leggen voor landgebruikbeleid en (4) onderhandelingen van actoren te ondersteunen. Het laat bijvoorbeeld zien wat de rol is van bevolkingsgroei en expansie van de akkerbouw voor ander landgebruik zoals brandhoutvoorziening, veeteelt en de bescherming van biodiversiteit. De gebleken grote rol van *mouskouari* daagt uit tot een nader onderzoek naar economische dynamiek en duurzaamheid van dit gewas, ook op bodems die primair minder geschikt voor dit gewas zijn. Belangrijke factoren voor de *mouskouari* en de andere landgebruiktypen bleken de bereikbaarheid van het urbane centrum, bodemgeschiktheid en 'population potential index' te zijn; ook dit daagt uit tot nader onderzoek. De simulaties van de periode 1999-2010 laten zien waar de belangrijkste landgebruikveranderingen zouden moeten plaatsvinden en kunnen binnenkort worden gevalideerd.

Het simulatiemodel is niet alleen geschikt voor beleidmakers, maar kan ook worden aangepast om te functioneren in de dialoog met lokale actoren en planning op dorpsniveau. Voor zowel dit regionale als lokale gebruik zal het van groot belang zijn om modellering van (categorieën van) individuele actoren in het MIS op te nemen. Beter dan de huidige statistische aanpak kan 'multi-agent' modellering ook de verwachting en de effecten van innovaties (zoals investeringen in intensivering) in zich opnemen. Dit is een van de belangrijkste en boeiendste uitdagingen voor de toekomst van landgebruikstudies.

Au sujet de l'auteur

Eric Fotsing est né le 11 janvier 1973 à Nkongsamba au Cameroun, où il a fait ses études primaires et secondaires. En 1991, il obtient un Baccalauréat de la série C et s'inscrit à la Faculté des sciences de l'Université de Yaoundé, où il obtient d'abord un Diplôme d'Etude Universitaire Général (DEUG) en Mathématiques (1993). Il s'oriente ensuite en informatique fondamentale où il obtient successivement une Licence (1995), une Maîtrise (1996) et un Diplôme d'Etudes Approfondies (1997), avec une spécialisation dans les techniques de Système d'Information Géographique et de traitement d'images.

Entre 1995 et 1999, il a exécuté de nombreux projets et développé plusieurs applications orientées vers le développement de Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision. Il initie ce projet de thèse en 1998 et bénéficie d'une allocation du projet de recherche Européen SIMES-WISE/DEV qui lui permet de travailler sur la spécification des observatoires et les méthodologies de conception des Systèmes d'Information sur l'Environnement. Il participe en même temps à plusieurs formations intensives dans les domaines connexes aux sciences environnementales. En 1999, il bénéficie d'une bourse de stage doctorale du Comité de Télédétection de l'Agence Universitaire Francophone qui lui a permis de travailler en collaboration avec l'Institut de Recherche pour le Développement de Bondy en France, sur la contribution de la télédétection et la morphologie mathématique à la cartographie de l'occupation du sol. De 2000 à 2004, il a effectué l'ensemble des travaux présentés dans cette thèse au Centre d'Etude de l'Environnement et du Développement au Cameroun (CEDC), en collaboration avec le Centre Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) de Montpellier en France, l'institut des sciences environnementales de l'Université de Leiden (CML) et l'Université Agricole de Wageningen (WUR) au Pays-Bas.

Eric Fotsing est actuellement enseignant à l'Université de Dschang au Cameroun où il dispense les cours de Mathématiques pour l'informatique, de techniques de Système d'Information, de Base de Données, d'algorithmique et de développement d'applications. Il est également chercheur associé au CEDC et au Pôle régional de Recherche Appliqué au Développement des Savanes d'Afrique Centrale (PRASAC). Depuis 1998, il a collaboré avec plusieurs institutions internationales (UNU/INRA, CRESA, IFORD, FASA) pour offrir des formations spécialisées sur les applications de l'informatique à la gestion des ressources naturelles en Afrique. Depuis 2005, il s'occupe de la gestion thématique du Réseau Régional pour la Synergie entre les conventions de Nations Unies sur la conservation de la biodiversité et la lutte contre la désertification en Afrique centrale et de l'Ouest. Les travaux de recherche et d'appui au développement que Eric Fotsing a déjà effectué ont donné lieu à plusieurs publications sous forme d'articles dans les revues et actes de colloques internationaux à comité de lecture ou sous forme de chapitres d'ouvrage et de rapport de recherche. Ces travaux lui ont permis d'acquérir une expérience interdisciplinaire dans les domaines de l'Informatique, des Sciences de l'Information Géographique, de la modélisation environnementale et de la mise en place d'observatoires socio-économiques ou environnementaux. Actuellement, ses domaines d'intérêt scientifiques concernent la modélisation intégrée des systèmes complexes pour la résolution de problèmes concrets de société.

Quelques publications pertinentes

1. Articles dans les revues internationales

Pontius Jr, Robert Gilmore, Wideke Boersma, Jean-Christophe Castella, Keith Clarke, Ton de Nijs, Charles Dietzel, Zengqiang Duan, **Eric Fotsing**, Noah Goldstein, Kasper Kok, Eric Koomen, *Christopher D. Lippitt*, William McConnell, Alias Mohd Sood, Bryan Pijanowski, Snehal Pithadia, Sean Sweeney, Tran Ngoc Trung, A. Tom Veldkamp, and Peter H. Verburg, 2008. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *Annals of Regional Science* 42(1): 11-47. DOI 10.1007/s00168-007-0138-2.

Mouafo D., **Fotsing E.**, Sighomnou D., et Sigha L., 2002. Dam, Environment and Regional development: Case study of the Logone Floodplain in Northern Cameroon. *In Water Resources Development*, Vol. 18, No. 1, 209-219, 2002.

Mouafo D., **Fotsing E.**, Sighomnou D., et Sigha L., 2000. Management of Floodplain and regional environmental change : the case of the Logone river floodplain in Northern Cameroon (Das Logone-Tal in NordKamerun: Entwicklungsmaßnahmen und Umweltfolgen). *In Geographische Rundschau*, GR 52 (2000) H.11, pp. 35-41.

Pettang C., Tamo T. T., **Fotsing E.**, Kouamou G., 1997. SIGSADRE: un système d'aide à la planification et la gestion du réseau d'eau dans les quartiers à habitat spontané. *Revue Internationale de Géomatique*. Volume 7-n° 2/1997, pp. 141-157.

2. Chapitres d'ouvrage

Fotsing E. et Assako Assako R. J., 2007. Du numérique et de la gestion des villes : Prolégomènes. Chapitre introductif de l'ouvrage *Assako (ed.), 2007. Observatoires urbains et environnementaux en Afrique : des théories aux applications géomatiques*, Edition Dianoir, Chennevière-sur-Marne. Pp 14-28.

Fotsing E. et Mainam F., 2003. Les potentialités des sols et la dynamique du sorgho de contre saison dans l'Extrême Nord du Cameroun. In Jamin J.-Y., Gounel C., Bois C., 2003. *Atlas, Agriculture et développement rural des savanes d'Afrique centrale*, pp. 97-99.

Gautier D., **Fotsing E.**, et Seignobos C., 2003. Un terroir camerounais en zone savane soudanienne : Mowo. In Jamin J.-Y., Gounel C., Bois C., 2003. *Atlas, Agriculture et développement rural des savanes d'Afrique centrale*, pp. 83-84.

3. Mémoires et rapports de recherche

Fotsing E., et Legeley A., 1999. Contribution de la Morphologie Mathématique à la Cartographie de l'Occupation du Sol à partir d'images SPOT (Région de l'Extrême Nord Cameroun). Rapport de stage doctoral en télédétection, IRD Bondy, France.

Fotsing E. et Madi A., 1997. Evaluation et suivi de la Dynamique de la Biomasse Ligneuse par Images Satellites : Rapport de Recherche n° 13, Yaoundé University and United Nations University, 38 pages.

Fotsing E., 1996. Modélisation des Données Géographiques : Réalisation d'un SIG de Gestion des Réseaux d'Eau et d'Electricité. Mémoire de Maîtrise Spécialité Informatique, Université de Yaoundé I, 70 pages + Annexes.

Pettang C., Tamo T. T., Kouamou G. E., Mbumbia L., Simeu P., Tchamba B. H., Tchuente M., Njock C., **Fotsing E.**, Nsangou A., Noumedem A. L., 1996. Pour un système interactif d'aide à la décision pour la résorption de l'habitat spontané en milieu urbain : Rapport de Recherche n°7. Yaoundé University and United Nations University, 42 pages.

Kouamou G. et **Fotsing E.**, 1995. L'application R+/Arcview, Indicateurs d'accessibilité aux ressources renouvelables au Cameroun. Rapport de recherche, IFORD, Yaoundé, 26 pages.

4. Articles dans les actes de colloques internationaux

Fotsing E., Verburg P.H., DeGroot W.T., Tchunte M and Cheylan J-P., 2007. Une méthode d'exploration spatiale pour analyser les facteurs déterminant les changements d'utilisation de l'espace appliquée à une région du Nord Cameroun. *Proceedings of the International Conference on the theme "Central Africa, Cameroon and Global Change"*, organised by IGBP Cameroon, Yaounde, 6 - 8 Juin 2007.

Pontius Jr. Robert Gilmore, Wideke Boersma, Jean-Christophe Castella, Keith Clarke, Ton de Nijs, Charles Dietzel, Duan Zengqiang, **Eric Fotsing**, Noah Goldstein, Kasper Kok, Eric Koomen, Christopher D. Lippitt, William McConnell, Bryan Pijanowski, Snehal Pithadia, Alias Mohd Sood, Sean Sweeney, Tran Ngoc Trung, A. Tom Veldkamp, and Peter H. Verburg., 2007. Lessons and challenge for land change modellers as revealed by a comparison of thirteen case studies. *Conference on the science and education of land use*.

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

Mayaka T.B., **Fotsing E.**, Hans de Iongh and Paul Loth (eds.), 2006. *Community-Based Conservation of Natural Resources in Dry and Sub-humid Savannas*. Proceedings of the 2nd RNSCC International Seminar. Centre for Environment and Development Studies in Cameroon, Maroua, Cameroon.

Fotsing E., Cheylan J-P., DeGroot W.T. et Verburg P.H., 2003. Un dispositif multi échelle d'analyse des dynamiques agraires en zone des savanes de l'extrême Nord du Cameroun. *6^{ème} rencontre de Théoquant sur les nouvelles approches en Géographie théorique et quantitative*, Besançon, France : <http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/>, 16 pages.

Fotsing E. 2003. Contribution des SIG à la gestion des écosystèmes des zones humides. *Rapport du séminaire Plan Directeur de Recherche pour la Plaine d'inondation du Logone, Nord Cameroun*, du 23-25 janvier 2002, pp 121-126.

Fotsing E., Ntoupka M., et Boubaoua A., 2003. Etat de la réserve forestière de Laf et perspectives d'aménagement et de gestion de l'espace. In Jamin J.Y., Seiny Boukar L. et Floret C. (Eds), 2003. *Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque*, mai 2002, Garoua, Cameroun. Prasac, 10 pages.

Mathieu B., **Fotsing E.** et Gautier D., 2003. L'extension récente du Muskuwaari au Nord Cameroun : Dynamique endogène et nouveaux besoins de recherche. In Jamin J.Y., Seiny Boukar L. et Floret C. (Eds), 2003. *Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque*, mai 2002, Garoua, Cameroun. Prasac, 12 pages.

Mathieu B., Gautier D., **Fotsing E.**, 2002 - "The recent extension of muskwari sorghums in northern Cameroon", *17th Symposium of the International Farming Systems Association*, Lake Buena Vista, Florida, USA, 17-20 november 2002.

Fotsing E. and Verburg P.H., 2001. A spatially explicit and empirical approach for analysing land use change in the Far North region of Cameroon. In Madi A., Loth P., Bauer H. And De Iongh H. (eds), 2001. *Proceedings of the International Conference on the Management of fragile Ecosystem*, 13-16 November 2000, Maroua-Cameroon, pp 105-119.

5. Communications aux colloques internationaux

An Environmental Information System for the spatial modelling of land use dynamics in the north region of Cameroon, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, <http://www.igarss07.org/frontal/ProgSesion.asp?id=80>, Barcelonna, Spain (23-27 July 2007).

SMALL Savannah : An Environmental Information System for the spatial modelling of land use dynamics in north Cameroon, *FRAME/ETA workshop on decision support tools for natural resource management*. 9th GSDI International Conference,

http://www.frameweb.org/ev_fr.php?ID=19032_201&ID2=DO_TOPIC, Santiago-Chile (6-10 November, 2006).

Analyse et modélisation des dynamiques d'occupation du sol. *Atelier des Géographes du Pole Régional de Recherche Appliquée au Savanes d'Afrique Centrale sur les Dynamiques régionales et locales : questions, méthodes, outils et perspectives*, IRAD, Maroua (21-26 Mai 2001).

Dynamique des paysages agraires de la zone des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. *Atelier de la composante « Gestion des Terroirs et des Espaces du Pôle de Recherche Appliquée aux Savanes d'Afrique Centrale »*, Moundou Tchad (Juin 2000).

Contribution de la Morphologie Mathématique à la cartographie de l'occupation du sol à partir d'images SPOT (Région de l'Extrême Nord Cameroun). *8^{ème} Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF UREF*, Lausanne, Suisse.

Le suivi de la biomasse ligneuse par une approche intégrée télédétection-SIG. *Colloque International sur la télédétection optique et radar pour la gestion des problèmes environnementaux*. Congrès de l'ACFAS, Ottawa, Canada. (10-14 Mai 1999).

SMALL Savannah est un Système d'Information sur l'Environnement conçu pour l'analyse intégrée et la gestion durable de l'espace pour une région des savanes de l'Extrême Nord du Cameroun. Il intègre un module d'observation et d'analyse spatiale qui permet la représentation des phénomènes à partir des données géographiques de sources variées, un module de prédiction qui permet d'expliquer la distribution et les changements d'utilisation de l'espace et un module de simulation dynamique qui permet d'explorer les trajectoires des changements d'utilisation de l'espace. Au cours des deux dernières décennies, on a observé dans la zone d'étude de nombreuses transformations des paysages agraires impulsées par la forte pression démographique et l'importance des mobilités humaine et animales. Ces dynamiques ont conduit dans plusieurs cas à une saturation foncière et à une compétition plus accrue entre les formes d'utilisation de l'espace et à des conflits entre les acteurs. L'analyse spatiale et quantitative indique que pour la période d'observation (1987-1999), l'accessibilité au principal centre urbain, les potentialités des sols et la pression humaine expliquent mieux la structure et les changements d'utilisation de l'espace que la densité de la population. Les hypothèses formulées pour les développements futurs envisagent que les dynamiques vont continuer à dépendre de ces facteurs mais davantage de l'implication des acteurs urbains et de l'investissement que les acteurs locaux vont consentir pour l'aménagement et la gestion de l'espace. Les simulations effectuées pour la période 1999-2010 indiquent les zones où des changements peuvent survenir, offrant ainsi la possibilité d'évaluer l'impact d'une politique donnée de gestion et d'utilisation de l'espace. Ce système d'information est un outil approprié pour un observatoire des dynamiques agraires et du développement rural. Il peut être utilisé par les scientifiques et les acteurs impliqués dans la planification pour la prise de décision et une gestion adaptative de l'espace. Une utilisation peut être envisagée avec les acteurs locaux pour susciter les discussions et préparer la concertation ou la négociation dans le cadre de démarches participatives d'utilisation et de gestion de l'espace.

Mots clés: SIE, observatoire, changement d'utilisation de l'espace, analyse intégrée, modélisation spatiale, savanes, Extrême Nord du Cameroun.

SMALL Savannah is an Environmental Information System designed for the integrated analysis and sustainable land management in a savannah region of the far North of Cameroon. This system combines an observation and spatial analysis module for the representation of phenomena from various geographic data sources, with a prediction module for the explanation of land use pattern and changes, and a dynamic simulation module for the exploration of possible land use change trajectories. Due to a high demographic pressure combined with an increasing human and animal mobility, many changes have occurred in the land use of the study area during the last two decades. These dynamics have led to land saturation resulting in more competition between land uses and conflicts between actors. The spatial and quantitative analysis for the observation period (1987-1999) indicates that accessibility to the main urban centre, soil suitability and population pressure, have been the main driving factors behind this process. According to assumption formulated for future development, it is expected that changes in land use of this area will continue to depend on these factors. But, the land use trajectories will be mainly influenced by the implication of urban actors and the potential investment of local actors for improving land quality and management. The simulations performed for the period 1999 to 2010 indicate areas where changes are likely to occur, thus providing a possibility to evaluate the spatial impact of a given land management policy. The information system under development is an appropriate tool for a regional monitoring system of land use change and rural development. It can be used by scientist and actors involved in land use planning for decision making and adaptive land use management. Another utilisation can be considered with local actors in order to discuss and prepare any concertation or negotiation when dealing with participatory approach of land use and management.

Key words : EIS, observatory, land use change, integrated analysis, spatial modelling, savannas Far North of Cameroon.

PROPOSITIONS

with the PhD thesis “*SMALL Savannah : An Information System for the integrated analysis of land use change in the Far North of Cameroon* ”

by Eric Fotsing

1.

This thesis is an element in the growth from problem-oriented interdisciplinary frameworks towards a trans-disciplinary science, hinging around the concepts of integrated analysis and environmental sustainability.

2.

Land use patterns are the outcomes of actors’ strategies-in-circumstances. In culturally diverse regions such as North Cameroon, the variability of strategies is often larger than that of land use. Therefore, any prediction of land use processes should integrate spatial analysis with a study of socio-cultural diversity.

3.

GIS is often seen as a tool to advance knowledge in more substantive fields like soil science, ecology or economics. It is more fruitful, however, to see GIS as an independent field of enquiry blending geography with computer science, and playing a prominent role in the emergence of a broader science of land use in which agent-based modeling also holds a key position.

4.

Deductive, multi-agent land use models can include such a wide range of factors and constraints that a multitude of explanations is available for any land use change. GIS-based, inductive models are more limited in range of factors and predictions but can be used well to hold the multi-agent models as close as possible to observed data.

5.

Tools such as remote sensing and GIS emerge in ivory towers far removed from the lives of actual land users. Further development of these tools and their underlying computer technologies now allow for democratization and participatory use, however, which is an option that should be actively invested in by governments and universities.

6.

The development of village-level knowledge, including literacy, ingenuity and institutions, can be built on one 100-dollar laptop per village. This does not require much hardware or software development anymore, and represents a more profitable and sustainable investment than providing 100 dollars of grain.

7.

Nomadism is an efficient and sustainable type of land use in the African drylands. New arrangements between nomadic and settled land users need to be designed and institutionalized in highly populated areas such as North Cameroon.

8.

The food balance of North Cameroon was saved during the last two decades by the large-scale appropriation of dry-season sorghum lands by urban producers. If the smallholders do not organize and intensify quickly, they will lose out on the next round of agricultural expansion, too.