



Universiteit
Leiden
The Netherlands

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

Fotsing, E.

Citation

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

Version: Not Applicable (or Unknown)

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

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

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



Photo 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).

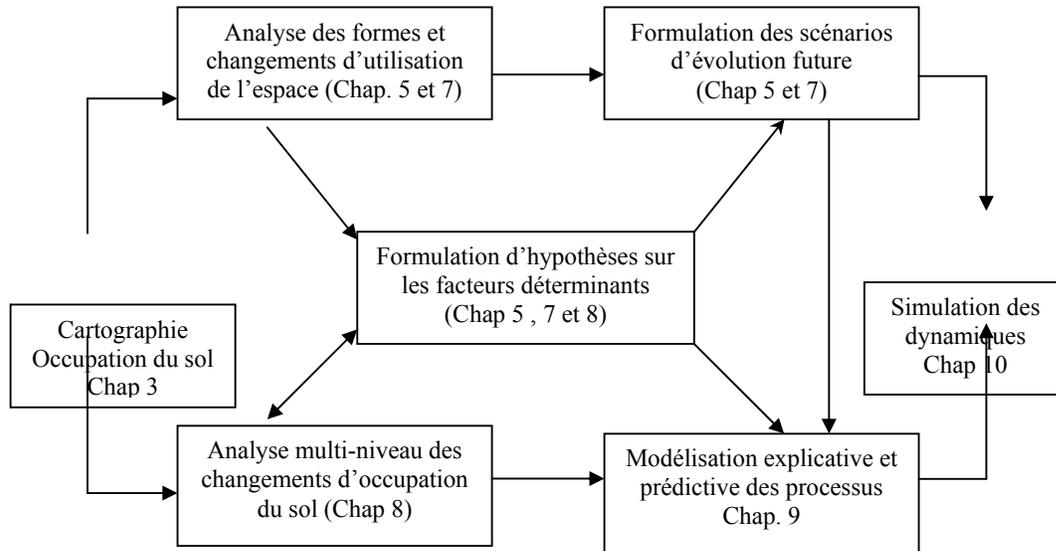


Figure 11.1 : Aperçu de la démarche d'analyse des dynamiques agraires suivie dans cette thèse. Une flèche indique le sens du flux d'information d'une étape vers la suivante.

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).

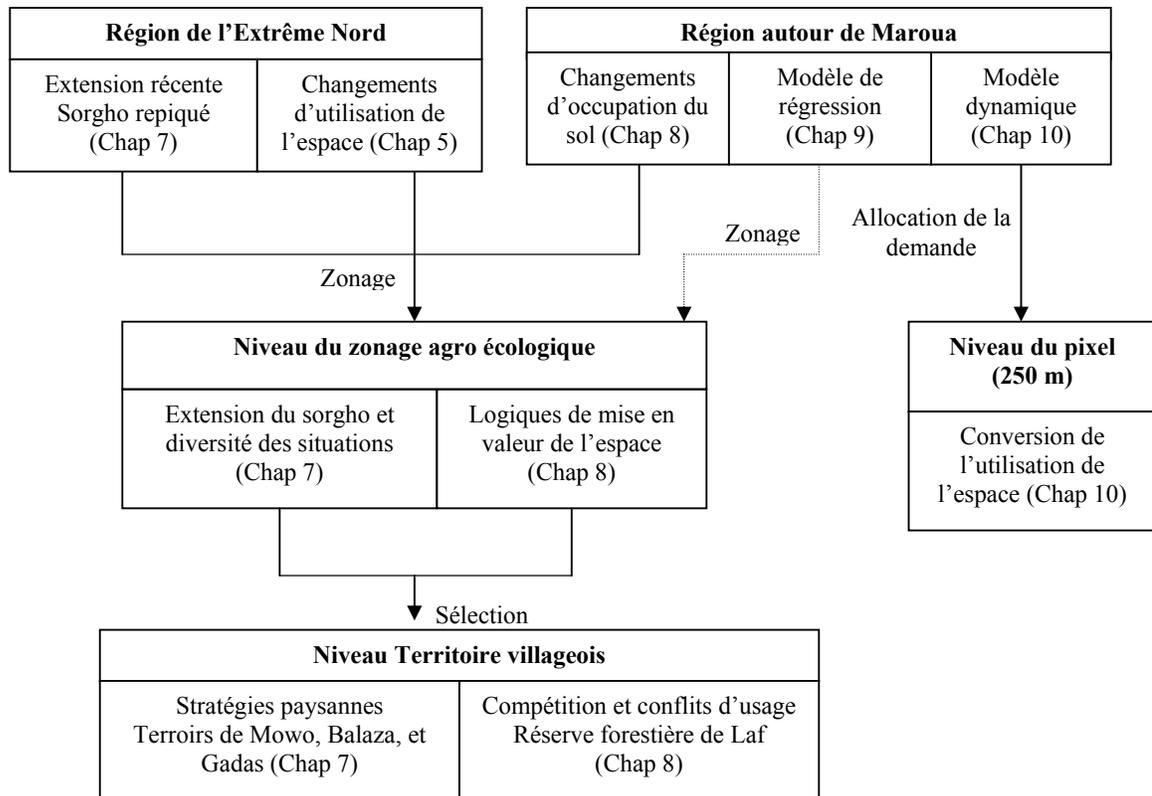


Figure 11.2 : Aperçu de la multiplicité des échelles prises en compte dans la démarche. Les cases indiquent les différents niveaux d'échelle et les processus analysés, une flèche indique une articulation entre deux niveaux.

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 utilisée 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.

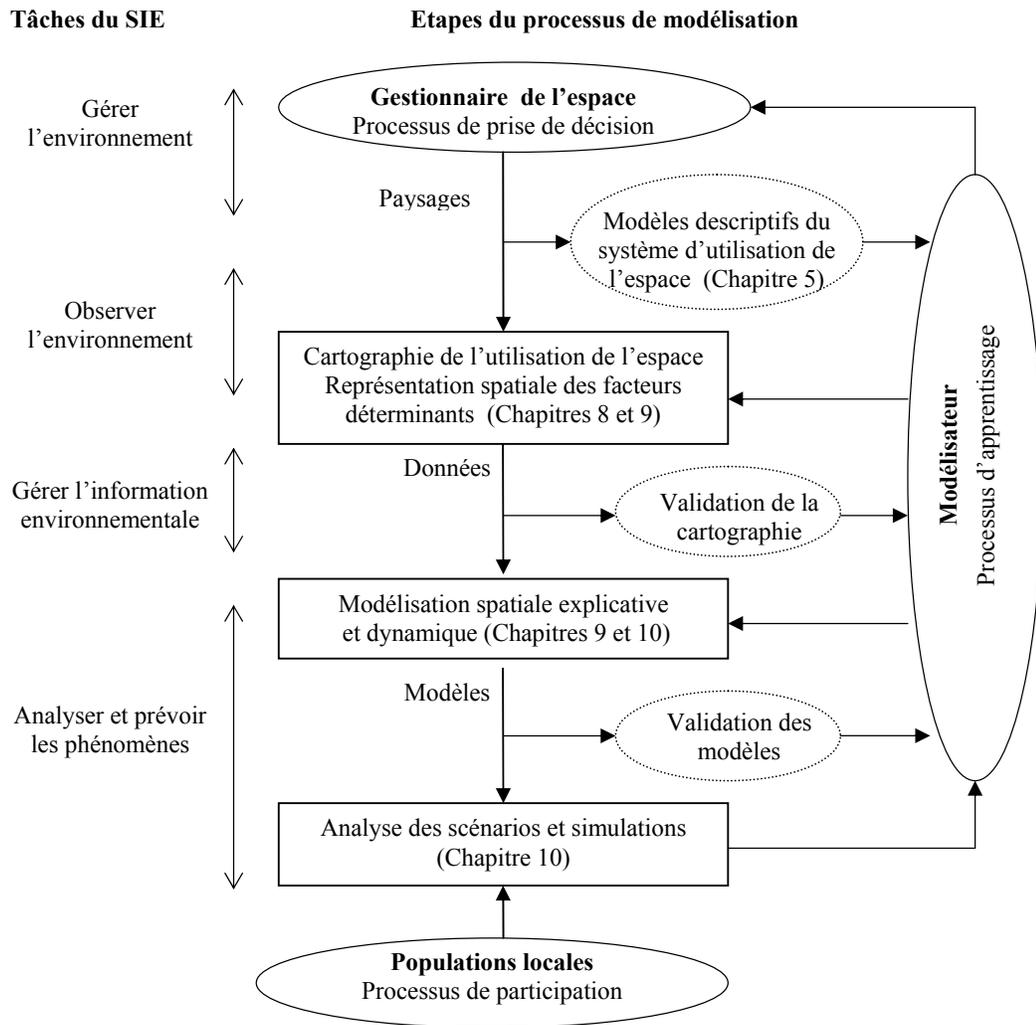


Figure 11.3. Diagramme illustrant la contribution de la modélisation au développement du SIE. Les formes ovales en traits tirés indiquent les étapes du processus d'apprentissage et les formes ovales en traits continus indiquent les principaux utilisateurs du modèle développé.

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.

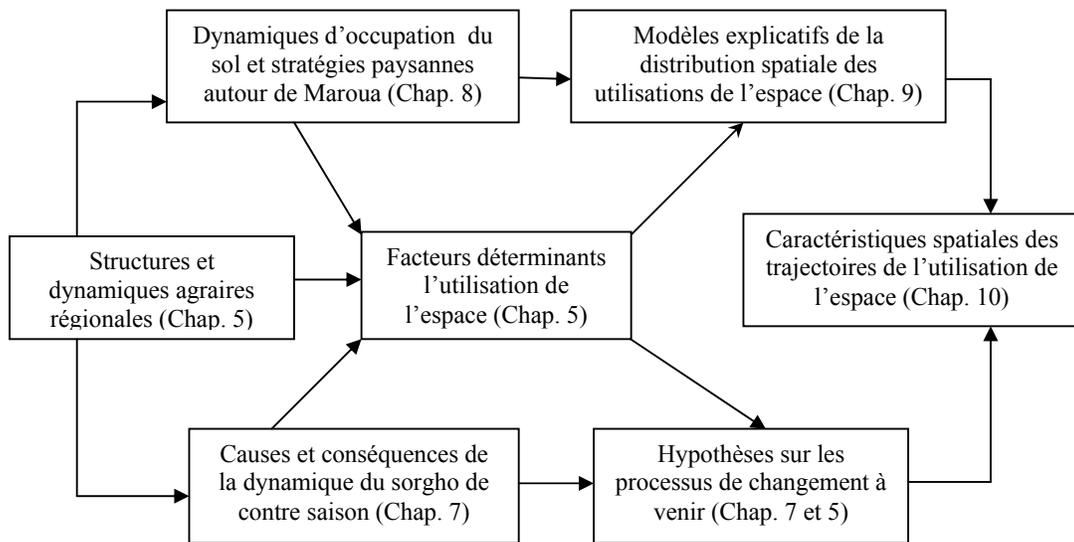


Figure 11.4. Succession des résultats thématiques produits par l'analyse et la mise en œuvre du SIE SMALL Savannah. Les flèches indiquent que l'information au départ de la flèche est utilisée pour produire l'information à l'arrivée.

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.