

UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN
FACULTE D'INGENIERIE BIOLOGIQUE, AGRONOMIQUE ET
ENVIRONNEMENTALE



**Approche système pour une simulation prospective
des territoires appliquée à la gestion de la fertilité
des sols dans la région du Fakara (Niger)**

Promoteurs:
Pr. P. Defourny
Dr. B. Gerard

*Travail de fin d'études présenté
en vue de l'obtention du grade de
bio-ingénieur par:*

Benoît PEREIRA

Louvain-la-Neuve
Année académique 2001-2002

Remerciements

Avant d'entrer dans le vif du sujet, je voudrais remercier certaines personnes qui ont permis que ce travail soit ce qu'il est.

*Je citerai tout d'abord mes promoteurs, **Pierre Defourny et Bruno Gérard** qui ont su me guider judicieusement dans mes choix durant ce travail.*

*Par la même occasion, je voudrais remercier **Juan Busqué, Pierre Hiernaux** ainsi que tous les autres chercheurs et techniciens que j'ai pu rencontrer au cours du stage effectué à la station de recherche de l'ICRISAT à Niamey, et qui m'ont aidé dans mon travail, chacun à leur manière.*

*Je souhaiterais aussi manifester ma reconnaissance envers **Olivier**, mon frère, pour son soutien inconditionnel tout au long de ces dernières années, et qui, pour ce travail encore, a toujours été là pour m'encourager et me conseiller.*

***Mes parents** m'ont aussi été, comme toujours, d'un soutien sans faille. Je ne peux que les en remercier, une fois encore.*

*Je remercierai enfin **tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail**, par des encouragements, corrections orthographiques et autres attentions. Il s'agit notamment de **Benoît, Damien, Jérôme, Marie-Hélène, Nathalie, Olivier, Sébastien et Yves**.*

Benoît Pereira

Le 19 août 2002

Résumé

La dégradation de l'environnement suite aux facteurs climatiques et anthropiques est un problème de plus en plus préoccupant dans les régions sahéliennes en voie de développement. Dans un tel cadre, une gestion efficace de la fertilité des sols s'avère particulièrement importante. Cette gestion doit aller de pair avec une amélioration des conditions de vie et de la préservation de l'environnement.

Au cours de ce travail, nous avons posé les premiers jalons d'une approche système du problème de la gestion de la fertilité des sols, type d'approche qui permet la prise en compte des différents aspects de la question. L'exploitation de ce type de méthodes pourrait servir de guide pour la définition de stratégies de développement futures.

Notre travail a permis de faire ressortir un certain nombre de problèmes liés à cette approche : difficulté de la collecte d'informations pertinentes, nécessité des compétences de spécialistes de nombreuses disciplines, ... La création d'un modèle conceptuel, sa mise en œuvre et sa simulation sous une forme simplifiée ont par ailleurs pu mettre en évidence un certain nombre de facteurs non triviaux influençant les pratiques des agriculteurs. Nous pensons aussi que l'examen des différentes questions d'implémentation et de paramétrage du modèle simplifié que nous avons étudié peut fournir une aide appréciable lors de la mise en œuvre d'un modèle plus évolué.

Table des matières

Introduction	10
1 Synthèse bibliographique	13
1.1 Analyse des systèmes appliquée à la gestion de la fertilité des sols	13
1.1.1 Introduction	13
1.1.2 Méthodologie en recherche sur les systèmes agraires et échelles spatiales	16
1.1.3 Modélisation et simulation de systèmes agraires	19
1.1.4 Système d'Information Géographique (SIG) et modèle de simulation agronomique	21
1.2 Modélisation et simulation de données de facteurs spatiaux	21
1.2.1 Modélisation discrète de systèmes	21
1.2.2 Techniques de simulation discrète	23
2 Cadre de l'étude	28
2.1 Contexte global : le Niger, un pays sahélien	28
2.1.1 Contexte écologique	28
2.1.2 Contexte socio-économique	33
2.2 Contexte local : Faits spécifiques des terroirs étudiés	38
2.2.1 Présentation du périmètre étudié : les terroirs du Fakara	38
2.2.2 Contexte Physique	39
2.2.3 Contexte socio-économique	42
2.2.4 Un système en déséquilibre	47
2.3 Collecte des données	50
2.3.1 Enquêtes de terrain	50
2.3.2 Le système d'information environnemental sur les terroirs du Fakara	51
2.4 Choix méthodologique	53
2.4.1 Echelle biophysique	53

2.4.2	Composants du système et interactions entre ceux-ci . . .	53
2.4.3	Echelle temporelle	57
3	Modèle conceptuel	58
3.1	Principes de Base	58
3.2	Les agriculteurs	59
3.2.1	Stratégie générale de l'agriculteur	59
3.2.2	Pratiques culturales	60
3.2.3	Synthèse des comportements des agriculteurs :	67
3.3	Les parcelles	68
3.3.1	Propriétés pédologiques et aptitude des parcelles à la culture	68
3.3.2	Niveau de fertilité et aspect dynamique	70
3.3.3	Rendement moyen	72
3.4	Scénarios	73
3.4.1	Pression démographique	73
3.4.2	Précipitations	75
3.4.3	Vulgarisation de l'engrais minéral	76
3.5	Schéma du modèle	76
4	Mise en oeuvre du modèle	78
4.1	Choix des sources et construction d'une typologie	78
4.1.1	Introduction	78
4.1.2	Classification "initiale"	79
4.1.3	Classification pour l'étude des flux d'élément nutritifs. (ILRI, avril 2002)	80
4.1.4	Typologie construite	81
4.2	Traitement des informations par SIG	87
4.2.1	Création du nouveau parcellaire	87
4.2.2	Affectation de la distance au village et au puits le plus proche	88
4.2.3	Présence d'un couloir de passage à proximité	88
4.2.4	Affectation de l'occupation du sol de 1996 aux parcelles	88
4.3	Méthode et Outils	90
4.3.1	Le logiciel de programmation : Visual Basic Excel . . .	90
4.3.2	Le programme de simulation	91
4.3.3	Description de l'algorithme	93
4.4	Synthèse des données utilisées et conclusion	98
5	Analyse de sensibilité du modèle et discussion	102

5.1	Résultats	102
5.2	Analyse de sensibilité	103
5.2.1	Paramètres liés aux contraintes	104
5.2.2	Paramètres liés au calcul de la superficie totale fumée par agriculteurs	107
5.3	Conclusion et perspectives	107
	Conclusion et Perspectives	109
	Bibliographie	111
	Annexe 1 : Parcelle simulé	115
	Annexe 2 : Algorithme	117
	Annexe 3 : Résultat de la simulation	127

Table des figures

1.1	Ecosystème naturel	14
1.2	Flux d'éléments nutritifs entre une exploitation et son environnement	15
1.3	Schéma du modèle pour la simulation des changements de l'occupation du sol [Stephene, 2002]	16
1.4	Différents niveaux de recherche en analyse de systèmes	17
1.5	Séquence d'activités de recherche systémique à différentes échelles	18
1.6	Exemple de courbe de "trade-off"	20
1.7	Organizational structure for (a) linking, (b) combining and (c) integrating geographical information systems (GIS) and models	22
2.1	Situation géographique du Niger.	29
2.2	Pluviométrie annuelle (mm) normale de la période 1961-1990.	30
2.3	Erosion hydrique, région du Fakara, Niger	32
2.4	Systèmes productifs au Niger; source : [AGRHIMET, 2000]	37
2.5	Situation géographique du périmètre étudié	38
2.6	Interactions relationnelles entre les deux grands groupes ethniques présents sur les terroirs du Fakara	43
2.7	Le mil : période de culture	45
2.8	Grenier protégé par une barrière, terroir de Tigo-Tegui	45
2.9	Marché de Dantiandou	47
2.10	Artisanat : fabrication de nattes, village de Tigo-Tegui	48
2.11	Un système en déséquilibre	49
2.12	Exemples d'outils et de type d'étude pour l'analyse des systèmes agraires à différents niveaux hiérarchiques	54
2.13	Agents cognitifs communiquant et agissant dans un environnement	55
3.1	Jachère de deux ans, terroir de Tigo-Tegui	61
3.2	Champ fumé par parcage	62

3.3	Superficie fumée par parcage en fonction du nombre d'animaux gérés	63
3.4	La charrette, habituellement utilisée pour faire du commerce, peut servir à aider au transport de fumier organique pour fertiliser son champ	64
3.5	Campagne de vulgarisation pour la promotion de l'utilisation de la fumure minérale par le projet <i>Intrants</i>	66
3.6	Niveau de fertilité des parcelles et combinaison de pratique de gestion : aspect dynamique	71
3.7	Schéma général du modèle conceptuel	77
4.1	Lancement de la Simulation	92
4.2	Changement des Paramètres de Parcage	93
4.3	Superficie parcagée en fonction de la taille du cheptel pour un agro-pastoraliste de type CP	97
5.1	Répartition du parcage par terroir	103
5.2	Superficie parcagée par ménage	104
5.3	Répartition des ethnies par terroir	104
5.4	Influence de la modification de la distance au puits sur la superficie fumée	105
5.5	Influence de la modification du rendement attendu sur la superficie fumée	106

Liste des tableaux

2.1	Principales caractéristiques des terroirs de Banizoumbou, de Tigo-Tegui et de Kodey [Slecht <i>et al</i> , 2002]	39
2.2	Principales caractéristiques des types de sols rencontrés sur le périmètre étudié	41
2.3	résultats des enquêtes, par catégorie : CP : agro-pastoraliste pauvre, CR : agro-pastoraliste riche, VP : agriculteur pauvre, VR : agriculteur riche, VG : agriculteur “gestionnaire” (ayant des animaux)	51
3.1	Synthèse des réactivités par catégorie	68
3.2	Classification des sols position topographique, leur facteur pédogénétique et la texture du sol utilisée pour la carte des sols	69
3.3	Classification des sols par leur aptitude à la culture	70
3.4	Rendement moyen (kg / ha) par aptitude de sol et pratique de gestion de la fertilité effectuée	74
4.1	Différences de composition entre classifications.	80
4.2	Statistique descriptive des principales variables utilisées pour la simulation par type d’exploitation agricole. Groupe VP, VR, VRR, VG	85
4.3	Statistique descriptive des principales variables utilisées pour la simulation par type d’exploitation agricole. Groupe CP, CR, CT	86
5.1	Synthèse des résultats obtenus	108

Introduction

L'amélioration des techniques traditionnelles de gestion de la fertilité des sols est essentielle au développement et à la croissance économique du Sahel [Batty & Jiang, 1999]. Cette évolution technologique est nécessaire afin de permettre de faire face à la demande croissante en nourriture suite à la pression démographique importante touchant l'ensemble des pays sahéliens.

Un des problèmes majeurs qui se posent actuellement aux acteurs de la coopération aux pays en voie de développement est d'arriver à agir en améliorant simultanément les techniques de productions agricoles, le niveau de vie de la population et l'état de l'environnement.

L'approche système d'un problème, par la construction de modèles prenant en compte simultanément les processus biophysiques et bioéconomiques ainsi que les interactions entre ces processus et les différents facteurs qui leur sont sous-jacents, permet de faire face à de tels problèmes.

Resté longtemps à l'écart de la vie économique moderne, le Niger est un pays dont les activités agricoles et pastorales occupent 80

Dans ce travail, nous étudions le comportement d'un ensemble de ménages vivant d'une agriculture de subsistance dans la région de Fakara située dans le sud-est du Niger. Cette région a une superficie de 180 km² divisée en trois terroirs ; elle a déjà été étudiée par l'ILRI qui a construit une base de donnée contenant des informations socio-économiques et environnementales dont une grande partie sont géoréférencées.

Assez représentatif de la région [Hoepffner *et al.*, 1992], le périmètre étudié peut être décrit comme un système mixte agriculture - élevage de type extensif. Le climat y est semi-aride, avec une seule saison des pluies d'une durée annuelle de 90 à 120 jours. La pluviosité est répartie de manière fortement hétérogène sur la superficie, avec de larges fluctuations interannuelles. Les sols sont généralement de texture sableuse, de faible fertilité et faible

productivité. L'agriculture sur les terroirs étudiés utilise encore principalement des techniques traditionnelles : toutes les pratiques liées à la gestion des cultures se réalisent manuellement, parfois avec l'aide de la traction animale.

L'objectif général de ce travail est d'apporter des éléments qui permettraient d'étudier le problème de la gestion de la fertilité des sols par une approche systémique. L'utilisation de ce type de modèle devrait permettre de simuler l'impact de différents scénarios sur le comportement des agriculteurs et d'ainsi orienter les choix des différents organismes politiques gouvernementaux et des projets de développement. Des problèmes de pression démographique, de conditions climatiques extrêmes ou l'influence de projets d'aménagement du territoire (ajout de points d'eau, ...) pourraient ainsi être étudiés. Une fois maîtrisée sur un milieu particulier, cette méthodologie pourrait aisément être transposée sur d'autres territoires et à de plus grandes échelles (régions ou pays).

Plus particulièrement, notre contribution à ce type de projet se situe à différents niveaux. Nous avons tout d'abord cherché à identifier les stratégies de gestion des sols et des cultures telles qu'elles sont pratiquées par les agriculteurs du système agraire étudié. Nous avons aussi cherché à comprendre, notamment au moyen d'enquêtes sur place, le processus de décision de ces agriculteurs lors de l'application de ces stratégies. Nous avons ensuite tenté d'établir un modèle conceptuel en vue de la simulation de quelques-uns de ces comportements (parcage, jachère, sarclage, apport de fumure minérale et organique). Le but final de cette étude est de donner des indications quant à la possibilité et à l'intérêt de l'exploitation de ce type de modèle en grandeur nature grâce à la simulation d'un comportement particulier : le parcage.

Afin de faciliter la lecture de ce travail, nous allons à présent décrire rapidement son organisation en présentant ses cinq chapitres.

Le premier chapitre effectue une revue de la littérature se rapportant au sujet de notre étude.

Le deuxième chapitre introduit le cadre de notre travail. Nous commencerons par réaliser un diagnostic préliminaire des systèmes agraires du Niger, et décrirons quelques traits spécifiques au périmètre étudié. La méthode d'acquisition des données et les choix méthodologiques posés dans ce travail seront ensuite présentés.

Le troisième chapitre définira notre modèle conceptuel, les principes de base liés à sa construction et les deux composantes principales : les ménages (agents cognitifs qui communiquent et agissent dans un environnement), et

les parcelles (objets situés dans cet environnement). Nous donnerons aussi des bases de réflexion pour la réalisation de scénarios qui pourraient être étudiés avec notre modèle.

Le quatrième chapitre traitera de la mise en œuvre de notre modèle. Nous établirons tout d'abord une typologie des agriculteurs. Nous décrirons le procédé de collecte de données que nous avons utilisé dans cette phase, mettrons en évidence les qualités et imperfections de celles-ci, et expliquerons les traitements que nous leur avons apportés à l'aide d'un SIG. Ces démarches nous ont permis d'établir les variables qui seront utilisées dans l'implémentation de notre modèle. Partant de ces informations, nous avons étudié le cas du parage des animaux à l'aide d'une implémentation de notre modèle sous Visual Basic Excel. La description des algorithmes et des autres aspects techniques de cette implémentation occupera la seconde partie de ce chapitre.

Le cinquième et dernier chapitre décrira les résultats obtenus à l'aide de notre programme de simulation. Nous y effectuerons aussi une analyse de sensibilité de la superficie parquée aux différents paramètres utilisés dans la modélisation. Ceci nous permettra de vérifier la cohérence des résultats obtenus, mais aussi de nous faire une idée de ce que l'utilisation de ce type de méthode d'analyse peut apporter en pratique.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

1.1 Analyse des systèmes appliquée à la gestion de la fertilité des sols

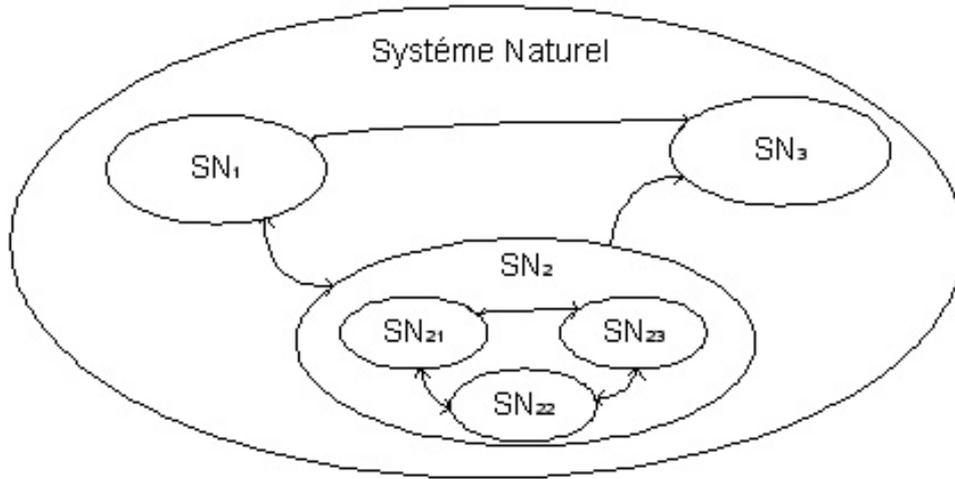
Cette partie introduit les principes et méthodes liées à l'approche systémique d'un problème, en faisant explicitement référence aux systèmes agraires sahéliens.

1.1.1 Introduction

Un système est constitué d'un ensemble d'objets interagissant, appelés *entités*. Ces objets sont caractérisés par un (des) attribut(s) et une (des) activité(s).

On appelle activité tout processus susceptible de changer l'état du système. Par exemple, un végétal constituant une entité d'un système peut être caractérisé par l'activité "absorption d'eau". Cette activité est susceptible de modifier l'état du système "collection de végétaux " (une forêt). On appelle *état* d'un système la description de l'ensemble des entités (végétal), attributs (feuille) et activités (absorption d'eau) qui le composent à un instant t [Coquillard & Hill, 1997].

Les systèmes naturels sont dits *ouverts* : dans un système naturel, il n'existe pas de système indépendant, isolé, c'est-à-dire n'entretenant pas avec l'extérieur d'échange d'énergie ou de matière. On distinguera alors des sous-systèmes, autrement dit des entités qui, au sein du système naturel, fonctionnent apparemment de façon autonome, mais qui entretiennent des relations avec le reste du système naturel. Ceci

FIG. 1.1 – *Ecosystème naturel*

conduit naturellement à considérer un système et son environnement. La modélisation d'un système complexe, comme un écosystème suppose donc en réalité de modéliser une collection de sous-systèmes entretenant des relations entre eux. Les sous-systèmes peuvent à leur tour être considérés comme une collection de sous-sous-systèmes... (figure 1.1) Cellier (1995) propose alors une définition restrictive du système, qui est perçu comme une portion du système réel, constituant une base de donnée suffisante et adéquate pour la modélisation : "Un système est un environnement virtuel ou réel perçu comme une source de données ou de comportements observables. Ces données sont observées ou acquises au moyen d'un protocole expérimental intéressant le modélisateur"

Un modèle est une abstraction qui simplifie le système réel étudié afin de se focaliser sur des aspects qui intéressent le modélisateur et qui définissent la problématique du modèle. Un modèle doit donc reproduire au mieux le comportement du système réel et ce, en fonction des objectifs fixés pour le cadre de l'étude [Coquillard & Hill, 1997, Monsef, 1996].

Une simulation consiste à faire évoluer une abstraction d'un système au cours du temps afin d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système, et à appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques dans l'objectif d'évaluer différentes décisions.

L'approche systémique de problématiques environnementales en milieu sahélien n'est pas nouvelle. Nous donnons ici deux exemples: le premier (figure 1.2), dans un système coton/céréale/élevage dans le sud du Mali est situé à une grande échelle (exploitation), et analyse

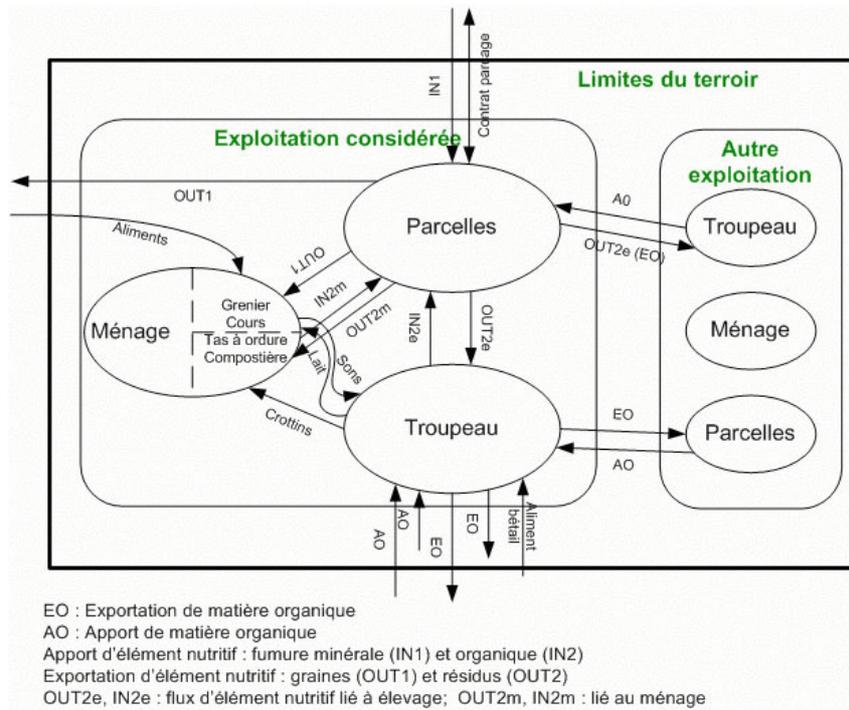


FIG. 1.2 – Flux d'éléments nutritifs entre une exploitation et son environnement

les flux d'éléments nutritifs entre une exploitation et son environnement [Kanté, 2001]. Ce schéma est fort intéressant dans la mesure où nous obtiendrions un schéma fort semblable si on voulait représenter les échanges de flux d'éléments nutritifs pour le périmètre étudié dans ce travail.

Un deuxième exemple est celui de la thèse de Nathalie Stephenne [Stephenne, 2002], pour la modélisation des changements de l'occupation du sol (figure 1.3). Ce modèle travaille à l'échelle de la région sahélienne. Les flux et les éléments considérés sont donc beaucoup moins précis que lorsqu'on travaille au niveau du terroir, mais les résultats d'une telle étude sont applicables à des superficies beaucoup plus grandes, et recouvrent les terroirs étudiés.

Les avantages de la modélisation sont résumés par Jorgensen (1994) en

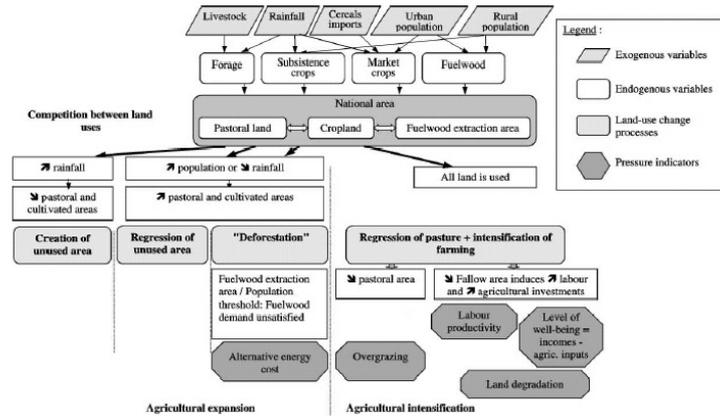


FIG. 1.3 – Schéma du modèle pour la simulation des changements de l'occupation du sol [Stephenne, 2002]

quatre points :

1. Les modèles ont leur utilité dans la surveillance de systèmes complexes ;
2. Les modèles peuvent être utilisés pour révéler les propriétés des systèmes écologiques ;
3. Les modèles peuvent montrer des carences dans nos connaissances et permettent de définir des priorités dans la recherche ;
4. Les modèles sont utiles pour tester des hypothèses scientifiques, dans la mesure où le modèle peut simuler les réactions de l'écosystème, lesquelles peuvent être comparées aux observations; Coquillard et Hill (1997) rajoutent :
5. Les modèles sont utiles pour saisir des comportements écologiques incompréhensibles par la seule voie réductionniste.

1.1.2 Méthodologie en recherche sur les systèmes agraires et échelles spatiales

Un diagramme (figure 1.4), introduit par Hoosbeek et Bryant (1992), revient classiquement dans la littérature (par ex. : [Booltinka *et al.*, 2001] ; [Stoorvogel & Antle, 2001] pour illustrer la diversité des méthodes de recherche à différentes échelles spatiales pour la recherche en analyse des systèmes. Ce diagramme est composé de deux axes perpendiculaires, l'un allant du qualitatif au quantitatif et l'autre de l'empirique au mécanistique. L'axe

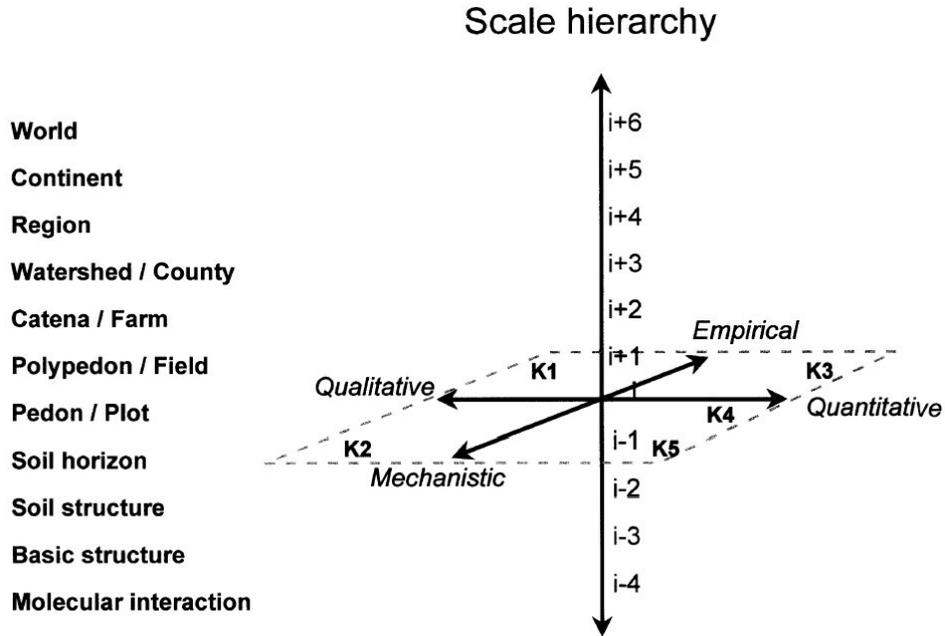


FIG. 1.4 – *Différents niveaux de recherche en analyse de systèmes*

vertical (z) représente le niveau de l'échelle, où le niveau de pédon (unité élémentaire de sol) occupe la position centrale (i level). Des niveaux plus élevés sont indiqués comme $i+$, alors que des échelles inférieures sont situés en $i-$: l'échelle de la figure 1.5 progresse de l'interaction moléculaire ($i-4$) au niveau planétaire ($i+6$).

Différentes approches de recherche se situent sur le plan de l'axe x-y :

- K1 : exploitation de l'expérience des utilisateurs (qualitatif, empirique);
- K2 : exploitation des connaissances d'expert (qualitatif, mécanistique);
- K3 : utilisation de méthodes descriptives simples, y compris la modélisation (quantitatif, empirique) ;
- K4 : utilisation de méthodes complexes et mécanistiques, y compris la modélisation (quantitatif, mécanistique);
- K5 : utilisation de méthodes précises, y compris la modélisation, qui se concentrent sur un aspect seulement, souvent liées à une discipline définie (quantitatif, mécanistique).

Un modèle n'est évidemment pas cantonné à un niveau de l'échelle : différents types de modèles, situés à différents niveaux peuvent être mis en

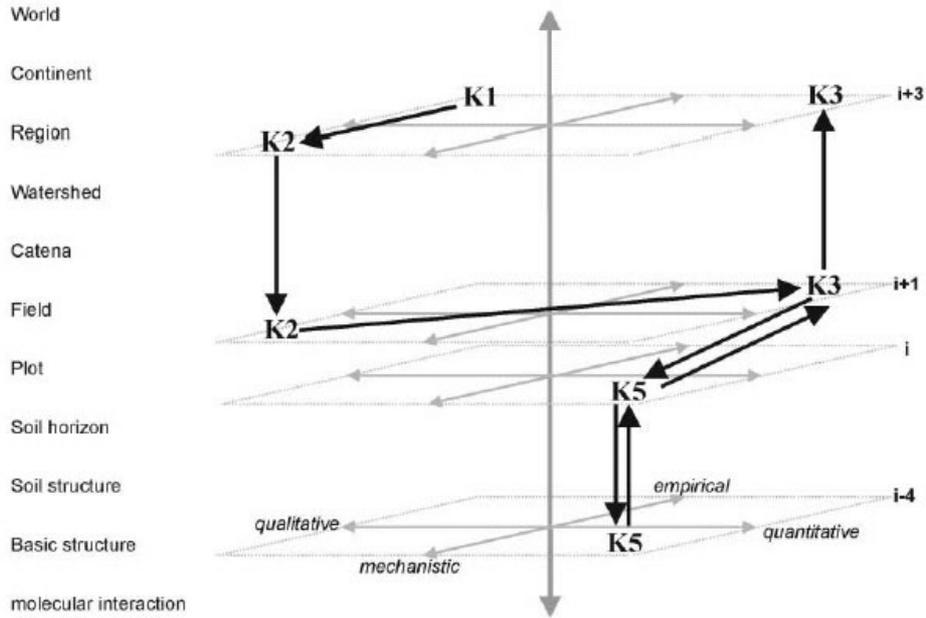


FIG. 1.5 – Séquence d'activités de recherche systémique à différentes échelles

relation au sein d'un même modèle "global". De plus, il est essentiel que les différentes composantes d'un modèle puissent aisément communiquer, c'est à dire que les données puissent aisément être désagrégées (en augmentant d'échelle) ou être agrégées (en diminuant d'échelle).

Un exemple de cela est donné par Stoorvogte et Antle (2001) dans leur proposition de méthodologie pour la recherche environnementale au niveau régional. Dans cette approche, qu'ils appellent approche par "échange", "compromis" (angl: trade-off), ils donnent un exemple (figure 1.5) de problématique -système axé sur différents niveaux d'échelle et différentes approches de recherche.

Après la définition très générale du problème par le preneur de décision (K1), le problème est analysé en utilisant la connaissance d'experts (K2) et décomposé en un certain nombre de questions de recherches plus spécifiques. Par exemple, quel sera l'effet d'une technologie alternative sur les "échanges" entre le développement et la lixiviation de pesticide? Puisque des décisions sont prises au niveau de l'exploitation agricole, le problème est redéfini (toujours en termes plutôt qualitatifs) au niveau du champ. Le problème se pose alors de la façon suivante: "comment l'utilisation de pesticide sera-t-elle affectée par une augmentation de la performance économique du système de

culture?" Dans une prochaine étape, un modèle économique quantitatif et empirique de simulation (K3) est employé pour simuler la prise de décision au niveau des différents champs. Etant donné que la décision dépend de la productivité inhérente de ces champs, la productivité des récoltes et/ou du cheptel est simulée pour un ou plusieurs points au niveau du champ; les résultats de cette simulation sont alors utilisés comme productivité inhérente de ces champs.

Après la simulation de la gestion et de la productivité des terres, des processus environnementaux (comme la lixiviation des pesticides) peuvent être modélisés pour un point précis du champ. On emploie ensuite des modèles mécanistiques (K5) pour les productions végétales et les processus environnementaux. Pendant la simulation de ces processus biophysiques, il est nécessaire de considérer des processus d'absorption par des racines, de minéralisation de la matière organique, l'adsorption / désorption des pesticides, les processus internes à la parcelle et les interactions situées au niveau moléculaire. Les résultats quantitatifs sont agrégés au niveau du champ, et finalement les résultats de la simulation pour un grand nombre de champs sont agrégés au niveau régional sous forme de courbes de "compromis" (K3), que nous expliciterons par la suite.

Cette approche par "compromis" présente un grand intérêt, notamment par la méthode avec laquelle elle se propose de quantifier les "compromis" liés à des changements environnementaux. Il ne s'agit pas pour autant d'utiliser, comme dans de nombreuses d'études, une unité monétaire mais bien de travailler avec différents indices de "durabilité". Les résultats, exprimés de tel manière, sont ensuite fournis au " décideur ", pour qu'il puisse établir son propre jugement, sa propre opinion.

Des courbes de compromis peuvent ainsi représenter le coût d'opportunité obtenu sur un indice lorsque l'autre varie. Des exemples de ces courbes sont donnés dans la figure 1.6 (Stoorvoeg et Antle (2001)).Elles montrent la corrélation positive entre la production agricole et la lixiviation des pesticides (A) ou l'érosion due au labour (B).

1.1.3 Modélisation et simulation de systèmes agraires

Thornton et Herrero (2001) ont défini dans une publication récente un cadre de travail de référence pour modéliser des systèmes agraires, afin que les modèles résultants puissent être employés de manière fiable dans un grand nombre de recherches en analyse de système et en étude d'impact. Pour

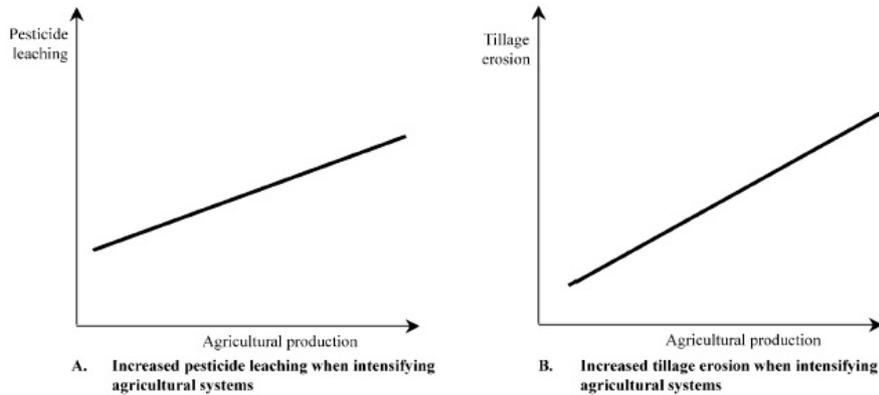


FIG. 1.6 – Exemple de courbe de "trade-off"

ces auteurs, les modèles de systèmes agraires devraient pouvoir répondre au minimum aux diverses exigences suivantes :

1. Décrire et mesurer les interactions entre les composantes du système ;
2. Représenter les pratiques de gestion des fermiers ;
3. Déterminer les impacts des stratégies de gestion sur l'utilisation des terres et d'autres ressources ;
4. Mesurer et quantifier les flux d'éléments nutritifs au niveau du système ;
5. Mesurer et quantifier la variabilité associée aux changements de conditions atmosphériques sur le système ;
6. Donner un aperçu des échanges (économiques, ambiants et sociaux) impliqués dans l'utilisation des différentes ressources de l'exploitation agricole ;
7. Permettre l'estimation des effets à moyen et à long terme des stratégies étudiées ;
8. Traduire les résultats modèles en soutien opérationnel pour la gestion saisonnière de la ferme. Par exemple, dans le cas du bétail ces modèles devraient pouvoir fournir le troupeau, la prairie et les stratégies de gestion de l'alimentation, alors que dans le cas de la gestion des cultures, des paramètres tels que la densité de plant et les applications d'engrais peuvent être de grande importance ;
9. Employer un jeu de données minimum pour la paramétrisation, la validation et l'utilisation. Ce jeu de données doit pouvoir être assemblé relativement facilement ;
10. Intégrer des données à partir de différents niveaux d'agrégation.

1.1.4 Système d'Information Géographique (SIG) et modèle de simulation agronomique

Il existe de nombreux avantages à coupler (interfacing) les modèles de simulation et les SIG. Le principal intérêt de cette technique est de faciliter l'analyse simultanée des phénomènes spatiaux et temporels en exécution. Il existe plusieurs moyens de coupler SIG et modèles [Hartkamp *et al.*, 1999] :

- En les reliant simplement, par échange de fichiers (figure 1.7 a). On peut réaliser des analyses plus sophistiquées à l'aide d'un SIG (interpolation, overlay, slope calculation . . .) et produire une base de données qui fournira les informations utilisées par le modèle. Les résultats du modèle peuvent ensuite être utilisés par le système d'information géographique pour la visualisation, ou éventuellement pour faire l'objet d'analyse avancée. C'est cette méthode qui est utilisée dans ce travail.
- En les combinant au sein d'une même interface-utilisateur (figure 1.7 b) ou en les intégrant au sein d'un même programme (figure 1.7 c). Les données sont échangées automatiquement entre le SIG et le modèle, ce qui rend plus aisée l'utilisation du modèle et le traitement des résultats. Par contre, un effort de programmation considérable est nécessaire pour développer ces types de logiciels, tout spécialement pour la solution intégrée. Dans le cas d'un modèle complètement intégré, l'utilisateur n'a pas accès au fichier ni au format des fichiers qui circulent au sein du système logiciel qui réalise l'ensemble des opérations. Ces méthodes demandent une collaboration étroite entre le spécialiste SIG et le modélisateur.

1.2 Modélisation et simulation de données de facteurs spatiaux

1.2.1 Modélisation discrète de systèmes

Un point essentiel en technique de modélisation est le choix de méthodes en cohérence avec la qualité des données et des objectifs poursuivis. Coquillard et Hill (1997) proposent une classification de ces techniques qui établit trois grands types de méthodes : les modèles analytiques au formalisme mathématique pur, les modèles purement stochastiques de l'analyse markovienne et les méthodes de simulation. Ces dernières forment un ensemble

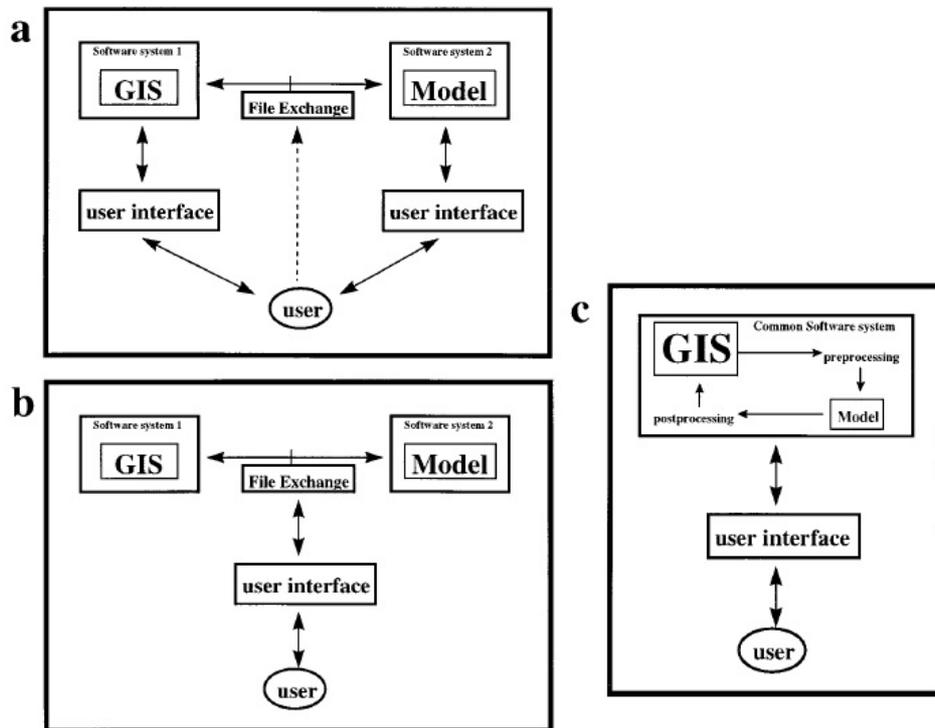


FIG. 1.7 – Organizational structure for (a) linking, (b) combining and (c) integrating geographical information systems (GIS) and models

complexe ; parmi celles-ci, seules les méthodes purement discrètes permettent la prise en compte des effets spatiaux existant au sein du système à modéliser : l'interaction à distance des acteurs de l'écosystème, répartition spatiale de facteurs écologiques (gradients d'humidité, changement de caractéristiques de sol, pentes, ...).

Il existe deux types de modèles discrets de systèmes : les modèles déterministes et les modèles stochastiques. La simulation discrète stochastique met en œuvre des modèles probabilistes capables de représenter le fonctionnement de processus aléatoires, fréquents dans la majorité des systèmes. Les techniques de simulations discrètes permettent de réaliser des modèles discrets d'un système réel et de les faire évoluer au cours du temps de manière discrète. On y retrouve les trois concepts fondamentaux en simulation que sont les concepts de système, de modèle et de temps.

La simulation discrète utilise un modèle logique ou mathématique qui reproduit des changements d'états du système réel à un instant précis. La nature des changements d'états ainsi que leurs dates d'occurrences doivent donc pouvoir être spécifiées sous une forme exploitable par un ordinateur.

Le principal avantage de la simulation discrète est de proposer une description pas à pas dans le temps du système sous forme d'un algorithme exécutable sur un ordinateur. ceci est évidemment tout particulièrement utile lorsqu'on ne peut pas obtenir les équations décrivant le fonctionnement du système, ou lorsqu'on ne peut pas résoudre ces équations en raison de leur complexité, ou encore lorsque les équations trouvées s'avèrent abusément simplificatrices.

1.2.2 Techniques de simulation discrète

Deux grandes techniques de simulation sont utilisées classiquement pour des modèles discrets devant prendre en considération des effets spatiaux. La première, les modèles stochastiques de voisinage, tels les automates cellulaires, travaillent généralement à un niveau élevé d'agrégation des données, et est souvent utilisée pour la simulation à échelle régionale. La seconde est basée sur la théorie des systèmes multi-agents : elle permet de modéliser des processus de haut niveau de complexité.

Les automates cellulaires

Les automates cellulaires font partie du groupe des modèles appelés modèles stochastiques de voisinage. Ces types de modèles sont particulièrement utiles quand l'objectif d'un projet est d'étudier, au sein du modèle, les processus et leurs interactions pour des variables évoluant dans l'espace.

Ces modèles reconnaissent l'existence d'un lien direct entre les valeurs des attributs à un emplacement, et les valeurs des attributs des abords (le voisinage). On les utilise par exemple pour expliquer les changements de l'occupation du sol résultant de l'expansion urbaine [Lambin & Rounsevell, 2002]. Le changement de l'occupation du sol à un emplacement géographique dépendra non seulement de l'occupation du sol initial à cet emplacement, mais également de l'occupation du sol au voisinage. Il existe une relation spatiale avec les occupations du sol dans les zones adjacentes.

Les modèles de simulation employant des automates cellulaires utilisent des unités de base, appelées cellules, pour lesquelles le voisinage est créé dans une structure sous forme de grille (angl. : raster). Le potentiel de passage d'un état à l'autre des cellules de grille (où l'état des cellules pourrait, par exemple, représenter l'occupation du sol) est normalement donné par :

$$P_z = vS_zA_zN_z$$

où P_z est le potentiel de transition à l'état z , S_z est l'aptitude (angl. : suitability) de la cellule à l'état z , A_z est l'accessibilité de la cellule pour l'état z , N_z représente l'effet de voisinage et v est une limite stochastique de perturbation qui affecte l'ampleur de la perturbation. La taille du voisinage considéré peut aller d'un minimum de 8 cellules à plus de 100. Bien entendu, plus le nombre de cellules pris en compte est important, plus le nombre de calculs exigé sera élevé. Une fois que tous les potentiels de transition (P_z) ont été calculés (pour tous les états et toutes les cellules), l'état des cellules deviendra celui pour lequel le potentiel est le plus haut. Les modèles de ce type basés sur la dynamique urbaine et régionale sont les plus courants [Batty & Jiang, 1999].

La principale difficulté avec de tels modèles est que la notion d'espace est assez limitative [Batty & Jiang, 1999]. Le fait que les éléments du système géographique soient envisagés en tant que simples cellules pose souvent de nombreuses difficultés; il est en effet difficile d'attribuer plus d'un seul ensemble de règles de transition à chaque cellule et différents types d'états

simultanément à la même cellule.

De telles situations peuvent être traitées, mais seulement en désagrégant en des cellules à des unités plus fondamentales, c-à-d à des cellules toujours plus fines. Arriver à un tel résultat sans perdre les avantages intrinsèques des opérations locales entre les cellules, exige de construire un ensemble d'objets plus actifs associés à ces cellules. Les simulations avec des systèmes multi-agents sont développées afin d'être capable de relever ce défi.

Les système multi-agents

Avant de rentrer dans le vif du sujet, explicitons tout d'abord la notion d'agent. Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, capable d'agir sur elle-même et sur son environnement et qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents; son comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents.

Récemment, Jennings, Sycara et Wooldridge [Jennings *et al.*, 1998] ont proposé la définition suivante: " Un agent est un système informatique, *situé* dans un environnement, et qui agit d'une façon *autonome et flexible* pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu ".

Les notions "situé", "autonome" et "flexible" sont définies comme suit :

situé : l'agent est capable d'agir sur son environnement à partir des entrées sensorielles qu'il reçoit de ce même environnement;

autonome : l'agent est capable d'agir sans l'intervention d'un tiers (humain ou agent) et contrôle ses propres actions ainsi que son état interne;

flexible : l'agent est dans ce cas *capable de répondre à temps*, donc capable de percevoir son environnement et d'élaborer une réponse dans les temps requis; *proactif*, il doit exhiber un comportement proactif et opportuniste, tout en étant capable de prendre l'initiative au "bon" moment; *social* il doit être capable d'interagir avec d'autres agents (logiciels et humains) quand la situation l'exige afin de mener à bien ses tâches ou aider ces agents à accomplir les leurs.

Dans ce cadre, la caractéristique principale d'un agent est l'autonomie et dans tout les systèmes, il peut y avoir plusieurs types d'agents fonctionnant à des modes/régimes tout à fait différents. Les agents autonomes peuvent ainsi se comporter comme un grand nombre d'objets allant des humains et

des animaux aux robots mobiles, créatures de vie artificielle, et agents de logiciel. [Batty & Jiang, 1999]

Un système multi-agents (SMA) est un système distribué composé d'un ensemble d'agents. Les systèmes multi-agents sont conçus et implantés idéalement comme des ensembles d'agents interagissant, le plus souvent, selon des modes de coopération, de concurrence ou de coexistence. Un SMA est généralement caractérisé par le fait que chaque agent présente des informations ou des capacités de résolution de problèmes limitées, donc un point de vue partiel; qu'il n'y a aucun contrôle global du système multi-agents, les données sont décentralisées et le calcul est asynchrone. [Jennings *et al.*, 1998]

La théorie des univers multi-agents permet alors de réduire la complexité de la résolution d'un problème en divisant le savoir nécessaire en sous-ensembles, en associant un agent intelligent indépendant à chacun de ces sous-ensembles et en coordonnant l'activité de ces agents. [Bousquet *et al.*, 2000]

Les systèmes multi-agents peuvent répondre à l'un des principaux enjeux de la simulation sociale à l'heure actuelle, à savoir l'établissement des liens entre les phénomènes sociaux (envisagés au niveau de la société dans son ensemble) et les phénomènes locaux (envisagés au niveau de l'individu) et tout particulièrement d'étudier l'émergence de macro-propriétés à partir de micro-interactions ou interactions au niveau inférieurs [Amblard, 1999], [Bousquet *et al.*, 2000].

Pour illustrer ces propos, nous prendrons un exemple de simulation de la gestion de l'eau dans des périmètres irrigués. [Bousquet *et al.*, 2000]. Dans ce type de situation, chacun des agents "paysans" peut avoir une représentation spécifique de sa parcelle et des besoins en eau: les uns, qui voient dans leur parcelle un simple accès au foncier, peuvent être assez flexibles sur le respect d'un calendrier d'irrigation, tandis que les autres, qui voient dans leur parcelle un moyen de production économique, seront beaucoup plus rigoureux sur ce point.

Chacun agit sur la ressource commune en fonction de cette représentation et modifie l'environnement pour les autres; ainsi, certains pourront provoquer des retards dans le démarrage de la campagne d'irrigation car leurs parcelles ne sont pas prêtes, ou encore pour un pompage collectif de l'eau dans le fleuve les consommations d'eau des uns et des autres ne seront pas les mêmes. On étudie alors un problème de gestion des ressources renouvelables communes par la confrontation de représentations donc d'actions différentes

sur celles-ci, qui peuvent donner lieu à un usage satisfaisant ou non pour l'ensemble des agents.

Nous voyons ainsi que dans cet exemple, chacun des agents se fait une représentation propre de la ressource et agit sur celle-ci en conséquence. Ce faisant il influence la disponibilité de cette ressource pour les autres. Le système multi-agents permet alors la modélisation des interactions entre les agents permettant l'analyse de la construction collective réalisée par ceux-ci.

Chapitre 2

Cadre de l'étude

2.1 Contexte global : le Niger, un pays sahélien

Pays totalement enclavé au nord-ouest du continent africain, le Niger s'étend sur 1.267.000 km² et s'inscrit entre les longitudes 0°16' et 16° Est, et les latitudes 11°01' et 23°17' Nord (figure 2.1). Sa frontière la plus proche du littoral est à plus de 600 km du Golfe de Guinée. Les trois quarts de cette superficie sont situés dans la zone septentrionale, en désert chaud. Au plan du relief, il s'agit d'une pénéplaine à la fois immense et monotone, d'une altitude moyenne de 300 mètres.

Sur le plan hydrographique, le Niger est traversé dans sa partie occidentale, sur environ 550 km, par un seul fleuve auquel il doit d'ailleurs son nom, et à l'est par une rivière quasi permanente, la Komadougou. A l'extrême est du pays se trouve le Lac Tchad, dont le Niger possède la partie Nord-Ouest, soit environ 3000 km².

2.1.1 Contexte écologique

Caractéristiques climatiques

Le climat du pays est particulièrement aride. Le Niger se situe en effet dans une des zones les plus chaudes du globe. Il connaît deux types de climats chauds : un climat désertique sur la majeure partie de sa superficie, et un climat tropical présentant une seule saison des pluies. Les saisons sont au



FIG. 2.1 – *Situation géographique du Niger.*

nombre de quatre :

- **une saison dite froide** (mi-décembre à mi-février) caractérisée par des nuits très fraîches avec des températures pouvant descendre au-dessous de 10 °C, et même de 0 °C dans la zone septentrionale du pays;
- **une saison sèche et chaude** (mars-mai) avec des vents brûlants et des températures qui peuvent être supérieures à 45 °C;
- **une saison des pluies** (juin-septembre) caractérisée par des pluies, souvent orageuses, une forte humidité et une température moyenne de 33 °C;
- **une saison chaude sans pluie** (octobre à mi-décembre) avec une humidité relative élevée et une température moyenne de 35 °C.

L'évaporation varie entre 1700 mm et 2100 mm d'eau par an ; le déficit hydrique climatique est donc important pendant la saison sèche et la flore, pour subsister, doit puiser dans les réserves du sous-sol. La pluviométrie est caractérisée par une forte variation dans l'espace et dans le temps. C'est ainsi qu'on distingue les quatre zones ci-après, en fonction de cette pluviométrie (figure 2.2) , du nord au sud du pays :

- **la zone saharienne** au nord du pays, représentant environ 65% du territoire national, avec des précipitations inférieures à 100 mm par an

et des températures supérieures en moyenne à 35° ;

- **la zone sahélo-saharienne** (12,2% du territoire national), avec des précipitations restant comprises entre 100 et 300 mm ; cette région se caractérise par le nomadisme agricole et pastorale dans les oasis et les vallées des massifs montagneux ;
- **la zone sahélo-soudanienne** (21,9 % du territoire national), avec des précipitations variant de 300 à 600 mm et une partie soudanienne au sud, plus arrosée ; c'est la zone de l'élevage extensif et de la culture de mil. Entre la zone agricole et d'élevage existe une zone de transition ou les deux activités sont intimement liées ;
- **la zone soudanienne** qui reçoit plus de 600 mm d'eau par an et représente 0,9% du territoire national. Plus boisée que le Sahel, elle comporte une végétation de savane, caractérisée par une strate herbacée continue ou non.

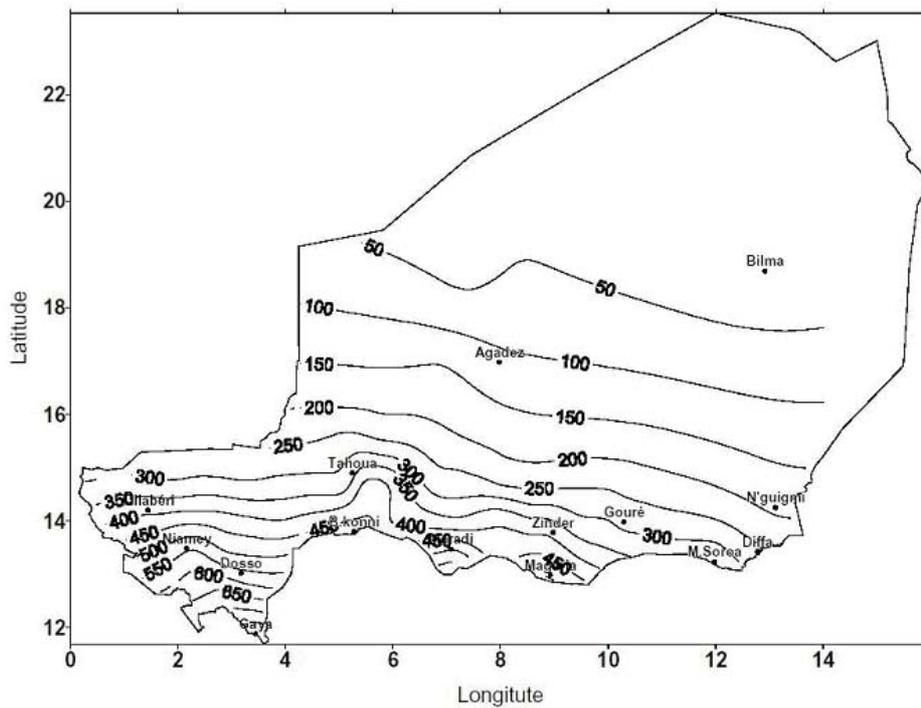


FIG. 2.2 – Pluviométrie annuelle (mm) normale de la période 1961-1990.

Au Niger, la pluviométrie annuelle, caractérisée par une variabilité spatio-temporelle et interannuelle, a des conséquences sur les productions agro-

sylo-pastorales. Il est à souligner que la sécheresse peut y être persistante, comme observé au cours des décennies 70 et 80 du siècle dernier.

Ressources naturelles

a) Les sols

En se référant au zonage climatique précédent, pour une surface totale de 126,70 millions d'hectares (Mha) on compte :

- 82,36 Mha (65%) en zone saharienne à sols minéraux bruts;
- 15,46 Mha (12,2%) en zone sahélo-saharienne, à sols peu évolués d'apport éolien et sols brun rouge à dominance sableux ;
- 27,74 Mha (21,9%) en zone sahélo-soudanienne à sols ferrugineux tropicaux;
- 1,14 Mha (0,9%) en zone soudanienne, à sols ferrugineux et sols fersialitiques.

La superficie potentiellement cultivable du Niger est estimée à 15 millions d'hectares, représentant moins de 12% de la superficie totale du pays. Les sols sont en général pauvres en éléments nutritifs (N et P) et en matières organiques. Ces sols peu productifs et fragiles sont très sensibles à l'érosion hydrique et éolienne [de Rouw, 1998, Gandah, 1999]. L'érosion est un phénomène de dégradation de l'environnement important de par son ampleur et ses effets aussi bien au Niger que dans la zone sahélienne dans son ensemble. L'érosion hydrique par ruissellement diffus sur les plateaux et les pentes entraîne les éléments fins et aboutit à la formation de glacis stérilisant sur des surfaces importantes. Le ruissellement concentré dû aux pluies violentes développe quant à lui une érosion régressive qui peut être localement importante (figure 2.3).

Ces différents phénomènes d'érosion contribuent également à limiter l'infiltration des eaux dans le sol, et donc à limiter les réserves hydriques pour les plantes, en plus de diminuer les surfaces cultivables.

b) Les ressources en eau

Le principal cours d'eau permanent est le fleuve Niger qui traverse le pays sur une longueur de 550 km. Les volumes écoulés varient selon des cycles de sécheresse entre 23 et 32 km³/an. D'importantes ressources souterraines en eau existent au Niger : des ressources hydriques renouvelables



FIG. 2.3 – *Erosion hydrique, région du Fakara, Niger*

dont la disponibilité est évaluée à environ 2.5 milliards de m³ présentement exploitées à moins de 20% et des ressources hydriques non renouvelables dont les réserves sont estimées à quelque 2000 milliards de m³ [CNEDDN, 2000]. Par manque de moyens techniques, les ressources hydriques, tant souterraines que de surfaces, sont très peu exploitées pour l'agriculture.

c) La végétation

Dans la zone saharienne , la végétation est dominée par les steppes, une végétation ligneuse disposée en mode diffus, et des graminées pérennes. Cette population végétale compte aussi des éphémères qui sont des annuelles à cycle très court.

Dans la zone nord-sahélienne dominent les arbres et arbustes épineux dans une formation très ouverte; on y trouve également des graminées annuelles. Cette zone demeure la région de prédilection de l'élevage. Dans les dépressions de ces zones, la végétation présente quelques similitudes avec la zone soudanienne.

Dans la zone sud-sahélienne , c'est la savane à combrétacées à dominance d'arbustes mésophylles caducifoliés, et des éléments sahéliens et

soudaniens qui montrent que la limite n'est pas stricte du point de vue de la végétation. Celle-ci est de type savane arborée et arbustive, et le tapis graminéen est constitué d'annuelles et de vivaces dans les dépressions humides.

La savane nord soudanienne est caractérisée par un recouvrement arboré et arbustif de l'ordre de 20 à 25% avec des espèces ligneuses mésophyllées. Le tapis graminéen, constitué de vivaces, est très important.

Sur de nombreux plateaux, on retrouve un type de végétation caractéristique, la brousse tigrée, différant des autres types de végétation sahélienne par son organisation végétale, matérialisée sur le sol par une alternance d'arcs végétalisés et de bandes nues. Elle se développe naturellement au Sahel. Elle est essentiellement dominée par les annuelles comme la *Microchloa indica* (67%) et la *Cyanotis lanata* (21%) auxquelles s'ajoutent des combrétacées dans certains sites. La population végétale peut varier suivant les isohyètes pluviométriques [Hiernaux & Gérard, 1999].

L'état des ressources végétales est particulièrement préoccupant au Niger : en effet, la végétation a été gravement affectée ces dernières décennies par un processus généralisé de dégradation imputable aux effets conjoints des coupes incontrôlées, des feux de brousse, du surpâturage, de l'extension des cultures et de la variabilité climatique. Cet état est d'autant plus préoccupant que les ressources ligneuses constituent la principale ressource énergétique du pays (environ 90% du besoin énergétique national). Elles constituent de plus un complément alimentaire pour la population, des produits pour la pharmacopée traditionnelle, et fournissent aussi l'essentiel des bois de services.

2.1.2 Contexte socio-économique

Démographie

Le Niger comptait en décembre 1999 une population de 9 942 845 habitants [Cordellier & Didiot, 2000]. A l'instar des autres pays en développement en général et du Sahel en particulier, le Niger est confronté à :

1. une croissance démographique accélérée (taux d'accroissement annuel de 3,2% sur la période de 1995-2000) et niveau de fécondité très élevé : l'indice synthétique de fécondité (ISF) est de 6,8 enfants par femme

- pour la même période [Cordellier & Didiot, 2000])). Malgré la rudesse du climat et la pauvreté des ressources naturelles, les démographes estiment que la population atteindra les 24 millions en 2020 [Hiernaux, 2002] ;
2. une structure assez jeune de sa population, dont 49,5% a moins de 15 ans [CNEDDN, 2000] ;
 3. une répartition spatiale inégale : 75% de sa population vivent sur 25% du territoire national [CNEDDN, 2000] ;
 4. un taux de scolarisation extrêmement faible (taux d'analphabétisme : 78,3% (hommes), 92,7% (femmes); taux de scolarisation des 12-16 ans : 13,2 % [Cordellier & Didiot, 2000]).

La population est répartie en huit groupes socio-linguistiques, dont deux forment près de 80% des effectifs (Haoussa et Songhaï-Zarma). Ces huit groupes, islamisés à plus de 95%, partagent certaines valeurs dans leurs rapports avec les questions d'environnement, de même qu'en matière de gestion de l'espace en général et d'accès aux ressources naturelles en particulier [CNEDDN, 2000]. La concentration de population dans certaines zones pose un sérieux problème d'adéquation avec les niveaux de la production agricole (qui est en baisse continue), enregistrant des déficits céréaliers structurels de plus en plus importants [AGRHIMET, 2000] .

Agriculture et élevage

L'agriculture au Niger est caractérisée par trois systèmes productifs principaux: le système vivrier, caractéristique des zones occidentales et sahéliennes, le système mixte, présent dans la partie centro-méridionale du pays, et le système pastoral qui caractérise toute la zone désertique et semi-désertique au nord de l'isohyète de 300 mm (figure 2.4).

Les systèmes vivrier et mixte, à leur tour, sont divisés en purs et pastoraux. Tous ces systèmes de production agricole sont fondamentalement basés sur la culture du mil et du sorgho, en association avec certaines légumineuses (niébé, arachide), et ont une caractéristique commune, à savoir l'insuffisance de leur productivité. Cette faible performance est due en grande partie à la baisse de la fertilité des sols, l'utilisation de matériel agricole rudimentaire, la faible adoption des semences améliorées, la pression parasitaire, l'insuffisance de l'encadrement technique du secteur rural notamment.

On note une forte extension des terres affectées aux cultures vivrières du fait de la faible intensification des systèmes de production. En outre, en

raison de la pression démographique et de la faiblesse de l'intensification de l'agriculture, pour les six principales cultures (mil, sorgho, niébé, riz, arachide, maïs), les superficies cultivées sont passées de 3,1 millions d'hectares (c'est-à-dire 21% des terres cultivables) en 1965 à 13,9 millions d'hectares (soit 93% des terres cultivables) en 1999. Il en résulte un accroissement de 72% des terres cultivées pour la période considérée. Toutefois, il importe de pondérer ces chiffres en tenant compte du système de cultures pluvial dominant qu'est l'association mil-niébé [CNEDDN, 2000].

L'élevage représente à lui seul 12 à 16% du PIB selon les années et constitue la seconde source d'exportation après l'uranium.

Il se pratique à travers des systèmes de production dont on distingue quatre grands types principaux :

1. **Le système de production typiquement pastoral (pur ou nomade)**, dans les zones enregistrant moins de 300 mm de pluie annuelle. Il présente de fortes potentialités fourragères mais est affecté par les sécheresses. Ce système est dominé principalement par la présence de dromadaires et de caprins avec une mobilité accrue sans rapport avec l'agriculture. Les populations qui pratiquent ce type d'élevage ont leur alimentation basée sur les dattes et les produits laitiers ; elles sont fortement dépendantes de la disponibilité de céréales sur les marchés.
2. **Le système d'élevage transhumant**, localisé dans les zones semi-arides, est associé à l'agriculture pluviale. Il se caractérise essentiellement par des déplacements saisonniers sur longue distance ayant un même point de départ et d'arrivée avec ou sans la famille.
3. **Le système de production agro-sylvo-pastoral**, qui comprend également le système d'élevage sédentaire des zones agricoles et l'élevage pratiqué dans les zones fluviales et irriguées. Il se caractérise par des déplacements saisonniers de faible amplitude liés aux pratiques agricoles et il tend à devenir sédentaire dans les zones sub-humides.
4. **Le système de production urbain et péri-urbain**, qui s'est développé ces dernières années dans la pratique de l'élevage intensif ou semi-intensif. La contrainte majeure de ce type d'élevage est l'insuffisance notoire de zones de pâturages appropriées et la divagation des animaux.

Les productions et les fonctions de l'élevage sahélien sont multiples. En plus des productions alimentaires (viande, lait, œufs, abats), l'élevage joue un

grand rôle dans l'exploitation familiale par l'apport de force de travail (transport et culture attelée) et l'apport d'énergie (feux, enduits, biogaz). L'apport de fumier et la force de travail apportés par l'élevage contribuent fortement à la réussite des activités agricoles [Piroux *et al.*, 1997]. Deux autres fonctions essentielles sont le rôle économique (apport d'argent liquide par les ventes, existence d'un capital-sécurité) et le rôle social.

En conclusion, l'élevage sahélien, contribue à la sécurité alimentaire des populations à travers les produits alimentaires qu'il génère et son rôle dans l'apport de revenu monétaire dans l'économie familiale et nationale. Malgré cette contribution significative, l'élevage sahélien reste marqué par son caractère extensif marqué par l'absence de techniques de production améliorées.

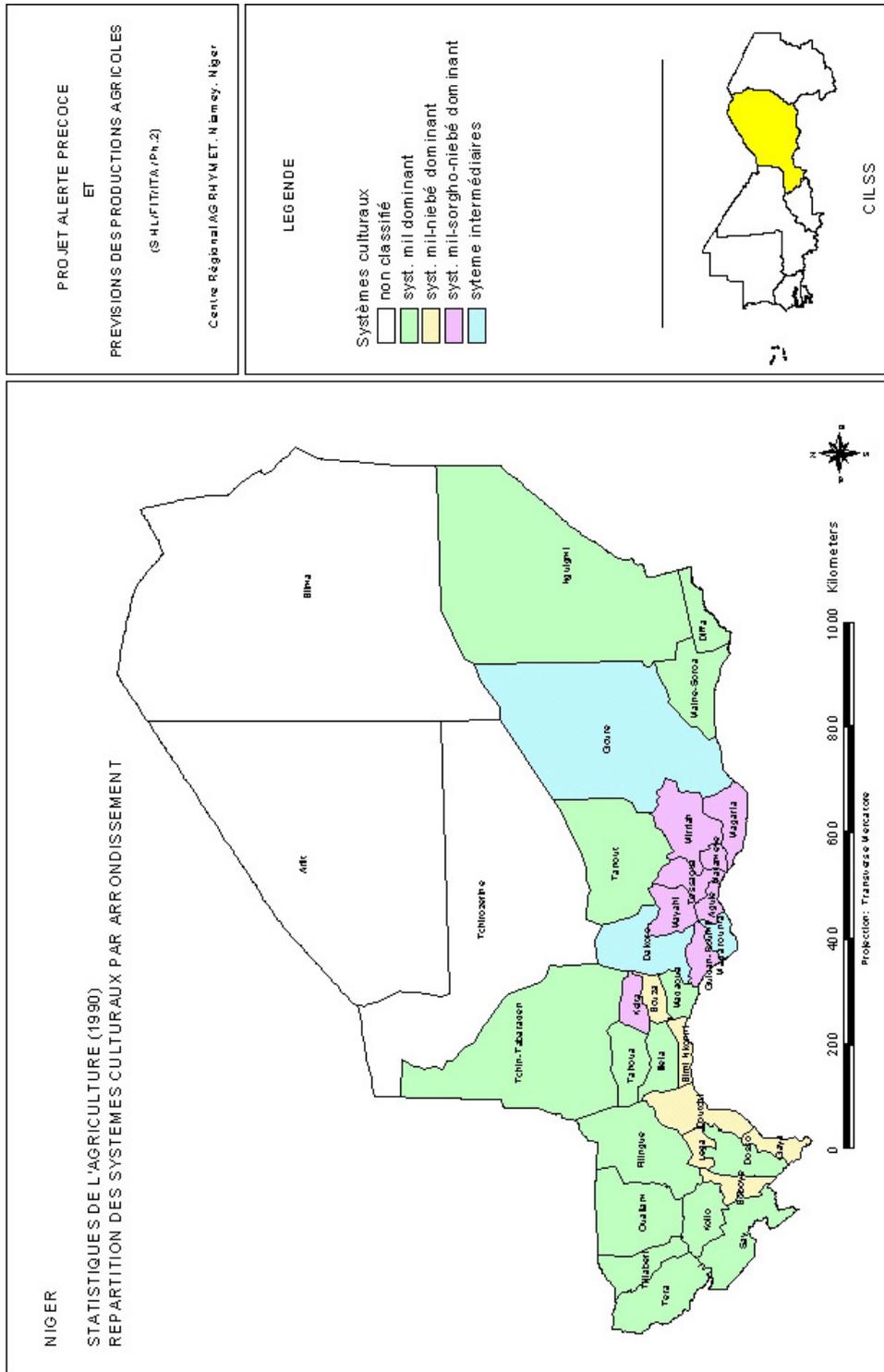


FIG. 2.4 – *Systèmes productifs au Niger; source : [AGRHYMET, 2000]*

2.2 Contexte local : Faits spécifiques des terroirs étudiés

2.2.1 Présentation du périmètre étudié : les terroirs du FAKARA

Le site étudié comprend trois terroirs, le terme “terroir” est ici défini comme une unité du point de vue paysager et flux des éléments nutritifs (parcours des animaux ...). Chacun de ces terroirs est appelé par le nom de son village principal. On distingue ainsi le terroir de Banizoumbou, de Tigo-Tegui et de Kodey. Les terroirs du FAKARA se situent en zone sahélienne à 80km de la ville de Niamey sur un degré carré : 13-14° N , 2-3° E (figure 2.5).

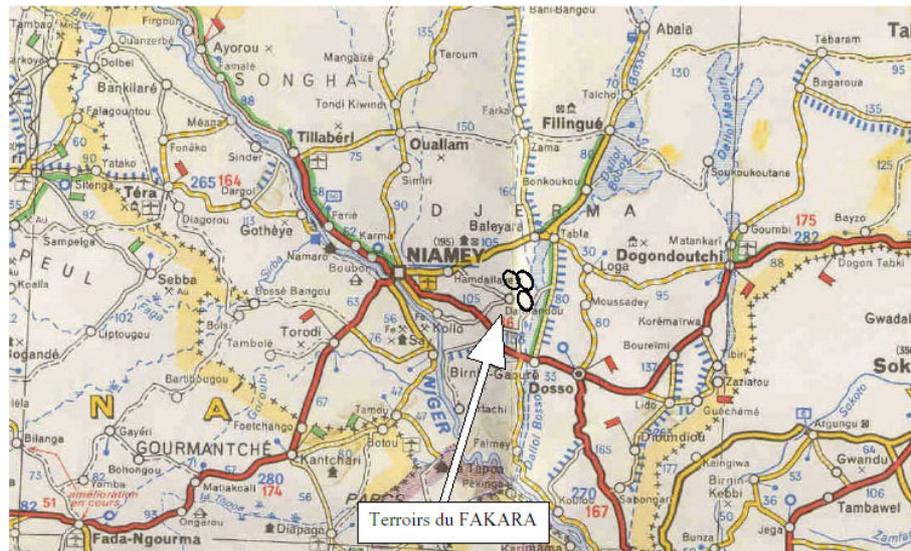


FIG. 2.5 – Situation géographique du périmètre étudié

Ces trois terroirs font partie du canton de Dantchandou (Arrondissement de Kollo). Ils caractérisent une grande bande zonale du Sahel [Hoepffner *et al.*, 1992]. Ils sont voisins et assez homogènes du point de vue des facteurs biophysiques ; mais ils varient tant au niveau des densités de population que des proportions de terres cultivées [Schlecht *et al.*, 2002]. L'économie de ces terroirs est basée essentiellement sur l'agriculture pluviale ; avec le mil comme culture principale et l'élevage extensif de bovins et de petits ruminants. Les principales caractéristiques de ces terroirs sont reprises sur le tableau 2.1.

TAB. 2.1 – /

Principales caractéristiques des terroirs de Banizoumbou, de Tigo-Tegui et de Kodey [Slecht *et al*, 2002]

Site	Rainfall (mm/y)	Territory (km ²)	Households (n)	Surface cropped (%)	Ruminant livestock (TLU*)
Bani	526 ± 110	72.8	224	36.2	789
Tigo	"	70.7	198	40.5	930
Kodey	"	36.9	124	65.1	821

* TLU Tropical livestock unit, animal of 250 kg live weight.

2.2.2 Contexte Physique

Climat

Le climat du périmètre étudié est de type tropical semi-aride, avec des précipitations annuelles moyennes de 526 mm [Schlecht *et al.*, 2002]. Les pluies sont distribuées pendant la saison des pluies, de mai à octobre, avec en moyenne 35 mm de pluie.[Hiernaux, 2002]. Le climat est caractérisé par une forte hétérogénéité des pluies avec de larges fluctuations inter-annuelles. De plus, sur une même année la variabilité de la pluviosité moyenne peut être très importante, avec parfois des différences de 100 mm de précipitation sur des champs distants de 5 Km seulement [de Rouw, 1997].

Géologie et topographie

Le Fakara est situé dans la partie inférieure d'un grand bassin de dépôts sédimentaires s'étendant de l'Ouest du Niger au Sud-Est du Mali. La zone est dominée par une formation géologique complexe de grès plus ou moins argileux et de dépôts épais du miocène, connu sous le nom de "Continental Terminal" [Hiernaux, 2002] . Ces dépôts sont localement par un dépôt sableux du quaternaire qui forme des cordons dunaires orientés est - nord est, ouest - sud ouest principalement dans la partie nord et nord ouest de la région. Le relief est très peu marqué avec au maximum 100 m de dénivelé.

On peut différencier quatre grands types de relief :

- **les plateaux** s'étendant sur les formations gréseuses du "Continental Terminal", avec des sols généralement peu évolués, peu profonds, à faciès ferrugineux, à faible capacité d'infiltration. Ce sont ces cuirasses ferrugineuses qui abritent la brousse tigrée. Les pentes ne dépassent guère 0,6 pour mille. La faiblesse de ces pentes contribue à la dynamique de la végétation. Sur ces plateaux, il existe quelques ensable-

ments réservés à la culture. Ces plateaux constituent principalement un lieu de pâturage pour les animaux en saison de cultures, de prélèvement de bois de chauffe et de service, ainsi qu'un lieu de cueillette.

- Après les plateaux, on rencontre **le talus** présentant une pente forte; il est composé de gravillons sombres et parfois de blocs hétérométriques éboulés sur affleurement gréseux. Ces talus sont exploités pour l'élevage et la production de bois.
- **Les glacis et les jupes sableuses**, situés entre les talus et les bas-fonds et sont constitués de sables rouges. Ce sont des dépôts de l'erg ancien datant de l'Ogolien. On distingue deux zones : une zone en amont ou jupe sableuse (pente de 5%), et une zone en aval (glacis) avec une pente faible qui se termine par un épandage large de 40 m. Ce glacis sont creusés de ravines dus à l'écoulement des eaux des plateaux. Les glacis se caractérisent par leur couverture sableuse dominée par la végétation ligneuse parallèle à l'axe du Kori principal. C'est le type de relief le plus représenté, abritant la quasi-totalité des terres de cultures avec les terres situées dans les bas-fonds.
- **les bas fonds** : C'est le plus bas niveau de la toposéquence, ils occupent une très faible proportion de la surface totale. Ils reçoivent les terres arrachées aux talus, glacis et jupes sableuses. La texture est sableuse à argilo - sableuse avec des sables plus clairs et une pente faible.

Pédologie et caractéristiques des sols

Les sols du Fakara, malgré leur substrat uniforme, ont des aptitudes agricoles fort différentes. Les types de sols rencontrés sont repris dans le tableau 2.2. Hormis la teneur en matière organique, qui est principalement liée à la gestion, les principales caractéristiques des sols peuvent être mises en relation avec leur pédogenèse et leurs positions topographiques [Hiernaux, 2002]. Il s'agit majoritairement de sols pauvres, avec une CEC peu élevée et des teneurs en azote et en phosphate assez faibles.

TAB. 2.2 – *Principales caractéristiques des types de sols rencontrés sur le périmètre étudié*

FAO soil classification	Arenic Gleysol	Gleyic Arenosol	Leptic lixisol	Arenic Cambisol	Arenic lixisol	Ferrallic arenosol	Skeletal leptosol
Topography	valley	valley	down-slope	flats	mid-slope	up-slope	plateau
Land form	river bed	alluvial deposit	erosion surface	colluvial fan	sand deposit	eroded deposit	plateau cliff
Depth (cm)	> 300	> 300	20 to 80	> 300	> 300	10 to 50	0 to 10
Color (0-20)	10YR5/6	5YR 5/8	7.5YR3/4	10YR6/4	7.5YR4/6	5YR5/6	7.5YR 5/6

<i>Texture at 0-30 cm depth</i>							
gravels (% total)	0	0	0	0 to 5	0	0 to 20	20 to 90
sand coarse%	2-5	45-48	40-50	45-50	40-50	34-36	32-35
sand fine%	35-40	40-45	35-40	38-42	40-50	50-53	32-38
silt %	30-35	2-3	5-8	3-5	2-3	4-7	5-8
clay %	15-25	6-12	7-12	5-10	2-5	4-8	12-17
pH (water)	5.5-6.3	5.0-5.3	5.0-5.5	4.5- 5.5	5.2-6.2	5.0-5.9	5.0-6.0
CEC (meq/100g)	5.0-7.0	1.5-2.0	2.0-2.5	1.0-2.0	0.8-1.2	1-1.6	2.0-2.5
Total N (ppm)	250-350	60-120	150-200	200-250	100-250	150-250	200-300
Total P (ppm)	2.5-5.0	1.5-2.0	1.2-2.5	1.5-2.0	1.5-3.5	0.7-1.5	2.5-5.5
K (meq/100g)	0.20-0.40	0.02-0.03	0.02-0.03	0.03-0.05	0.03-0.06	0.04-0.09	0.20-0.30
OM (%)	0.40-0.80	0.08-0.25	0.25-0.35	0.20-0.70	0.12-0.17	0.15-0.30	0.1-0.5

Source : Hiernaux (2002)

2.2.3 Contexte socio-économique

Population et groupes ethniques

En 1999, le canton de Fakara comptait 24870 habitants [AGRHIMET, 2000]. La pression démographique sur les terroirs est importante : ainsi, la population du village de Tigo-Tegui est passée de 790 à 1153 personnes entre 1988 et 2001 ; dans le même intervalle de temps, la population du village de Katanga est passée de 414 à 604 personnes [ILRI & ICRISAT, 2002]. Cette population est essentiellement composée de personnes des ethnies Djerma et Peul.

Les Djermas (Jerma, Zarma, Zerma, Zarma-Songhay) forment le deuxième grand groupe ethnique au Niger, après les Haoussas. Les origines de ce groupe ethnique sont controversées [Neef, 2001]. Nous savons néanmoins que le premier chef Djerma, le "zarmakoy" Tagorou, a unifié le peuple Djerma à la fin du 18ème siècle. Son influence s'étendit jusqu'à la région de Dosso, qui devint le plus important centre d'établissement des Djermas. L'économie des Djermas est principalement constituée d'une agriculture de subsistance. Les principales cultures (mil, sorgho et niébé) sont contrôlées par le mâle à la tête du ménage. Sur des champs individuels, les femmes Djermas cultivent l'arachide, quelques variétés de légumes et sur les bords du fleuve Niger, le riz.

Les Peuls (Peulh, Fulani, Fulfulde) sont répartis sur un vaste territoire allant des pays Sahéliens et du nord de la zone Soudanienne à la savane humide de la côte ouest de l'Afrique [Neef, 2001]. Les Peuls vivent de manière semi-sédentaire, d'une économie pastorale ; ils effectuent régulièrement des migrations (transhumances). Traditionnellement, dans la partie ouest du Niger, les Peuls dominaient les Djermas sédentaires pendant la période précoloniale.

Les interactions et la dépendance mutuelle entre les Djermas et les Peuls ont créé un système agropastoral hautement complexe. Les types d'échanges réalisés entre ces deux groupes sont résumés dans la figure 2.6. Ces relations peuvent être de deux types : complémentarité et coopération ou compétition et conflit.

Détaillons quelques points de la figure 2.6. Pendant la saison humide,



FIG. 2.6 – Interactions relationnelles entre les deux grands groupes ethniques présents sur les terroirs du Fakara

les Djermas confient généralement leurs troupeaux aux Peuls, contre paiement (argent, nourriture) ou prêt de terrains, afin de pouvoir se consacrer entièrement au travaux des champs. Sur les trois terroirs étudiés, les agropastoralistes Peuls se sédentarisent de plus en plus sur les terres où généralement seuls des Djermas possèdent des droits. Les terres sont possédées par le chef du village qui en confie la gestion aux membres du village, en donnant la priorité aux membres de sa famille (frères . . .). Les agriculteurs conservent ces droits de gestion de père en fils, et sont libres d'éventuellement prêter l'un ou l'autre de ces champs à un Peul contre une dîme, composée d'argent ou plus fréquemment d'un pourcentage sur les récoltes obtenues, classiquement 10%.

Des conflits peuvent également survenir entre ces deux ethnies, notamment à cause des dégâts causés par les animaux. Ces derniers peuvent causer des dommages aux haies qui luttent contre l'érosion éolienne, ou encore aux cultures, lors d'un retour hâtif de transhumance. Pour l'anecdote, notons aussi la présence de champs-pièges placés par des agriculteurs Djermas le long des couloirs de passage : ces champs sont peu entretenus et ne servent qu'à attirer les animaux d'un éleveur de passage, afin de lui réclamer par la suite des "dommage et intérêts". Enfin, notons que les deux ethnies entrent en compétition pour l'utilisation des résidus de culture, l'une pour la supplémentation de ses animaux et l'autre pour l'artisanat, comme les nattes et les clôtures.

Agriculture et élevage

L'agriculture est pratiquée par l'ensemble de la population des trois terroirs: c'est la principale activité économique. Son niveau d'intensification est très faible, comme pour l'ensemble des pays situés en zone sahélienne. La principale culture d'importance est le mil (*Pennisetum glaucum*) souvent associé avec le niébé (*Vigna unguiculata*). Les cultures d'importance secondaires sont le sorgho (*Sorghum bicolor*), l'oseille (*Hibiscus sabdariffa*) et l'arachide (*Arachis hypogea*).

Le mil est semé avec les premières pluies, approximativement entre le 15 mai et la fin du mois de juin. Il arrive souvent que des agriculteurs doivent ressemer, à cause de l'espacement trop important entre la première pluie qui fait germer la graine de mil et la seconde pluie. Pendant toute la durée de la période culturale, les animaux sont éloignés du champ. Pour cela, ils sont soit mis en enclos, ou quand le troupeau est plus important, ils sont envoyés

en transhumance dans le nord.

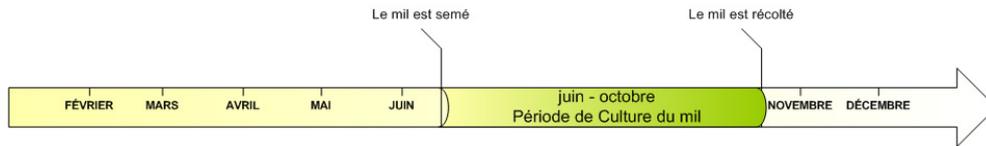


FIG. 2.7 – *Le mil : période de culture*

Pour enlever les mauvaises herbes, le premier sarclage est effectué 20 à 30 jours après le semis. Un second sarclage est nécessaire; celui-ci est généralement réalisé 50 à 70 jours après le semis. Aux environs de la mi-octobre, le mil est mis en botte et conservé dans un grenier (figure 2.8), légèrement sur élevé pour être à l'abri des rongeurs.



FIG. 2.8 – *Grenier protégé par une barrière, terroir de Tigo-Tegui*

L'espace agricole est divisé en deux secteurs distincts :

- **Les champs de case**, formant une auréole autour du village, qui bénéficient des apports organiques sous forme d'ordures ménagères, de déjections animales et humaines. Sur ces champs, disposant de conditions privilégiées, est cultivé le mil hâtif en culture pure ou associée au niébé, au sésame ou au sorgho. Le mil hâtif, avec son cycle plus court, est privilégié sur ces champs plus riches, pour répondre aux besoins

alimentaires de la fin de la "période de soudure".

- **Les champs éloignés du village**, où les terres sont mises en culture afin de répondre aux besoins de plus en plus importants liés à la croissance démographique. Sur ces champs est cultivé le mil hâtif ou tardif. Ce dernier, permettant des récoltes plus importantes, est cultivé en culture pure ou en association avec l'oseille, ou le niébé.

Les terroirs font actuellement l'objet de projets de développement. Notons le projet *Intrants*, qui promeut l'intensification de l'agriculture via l'utilisation d'intrants, tel que les engrais minéraux (DAP, NPK) et différents cultivars. Ceci est rendu possible par leur technique d'accès au crédit : le "warrantage". Le "warrantage" consiste à prêter de l'argent à l'agriculteur en fin de saison des pluies, quand le mil est à son cours le plus bas, en échange du dépôt d'un sac de mil conservé par la coopérative jusqu'en début de la saison des pluies, quand le mil est à son cours le plus haut. Cet argent peut alors servir à l'agriculteur à réaliser une "activité génératrice de revenu", tel que l'embouche ovine, l'extraction d'huile d'arachide ou le séchage de légumes. En début de saison de pluies, pendant la "période de soudure", période où les greniers des ménages commencent à manquer de mil, le sac laissé en "caution" est revendu par la coopérative, qui reprend l'argent qu'elle avait prêté et donne à l'agriculteur le surplus lié à l'augmentation du cours du mil. Ce surplus permet alors à l'agriculteur d'acheter des intrants (engrais minéraux. . .) à un moment où celui-ci ne dispose généralement pas de liquidités.

L'agriculture et l'élevage, en tant que sous composantes du système agraire, sont complémentaires (fourrage, fertilité et énergie) mais très souvent en compétition pour l'exploitation de l'espace (extension des terres de culture et conflits subséquents entre agriculteurs et éleveurs). La taille des troupeaux et les espèces élevées varient en fonction du groupe ethnique [Schlecht *et al.*, 2002]. Le cheptel comprend des bovins, ovins et caprins, avec généralement un ou plusieurs ânes. Ces derniers servent principalement comme aide pour prendre l'eau au puits afin d'abreuver les animaux. On rencontre aussi parfois, chez les éleveurs à revenu plus élevé, des chevaux et des chameaux.

Commerce et artisanat

Les villages de la zone d'étude ne possèdent pas de marché. Les habitants fréquentent les marchés environnants qui sont au nombre de cinq : Dantian-dou, Wankama, Yeda, Kouringuel Mayaki et Niambere.

FIG. 2.9 – *Marché de Dantiandou*

Ils sont d'une importance relativement égale, et il n'y a pas de village étudié qui soit favorisé d'un point de vue de la distance à parcourir pour se rendre au marché. Ces marchés constituent une source importante de revenus, grâce au commerce de produit artisanaux et agricoles qui s'y est développé. Il peut y avoir des contrastes importants au niveau du prix des denrées, comme les céréales, entre les différents marchés, et pendant la saison sèche, certains agriculteurs possédant une charrette achètent un produit à bon prix dans un marché pour le revendre à meilleur prix dans un autre. L'artisanat occupe une importance non négligeable, avec la fabrication de tables, tabourets et lits (à partir des tiges de combrétacées), et de nattes (figure 2.10), et clôtures (à partir des tiges de mil et de sorgho). La fabrication de mortiers, ardoises et pilons par les sculpteurs occupe aussi une importance non négligeable, ainsi que celle de hilaires et d'abas par les forgerons.

2.2.4 Un système en déséquilibre . . .

Les effets négatifs du climat sur les ressources naturelles et les productions agro-sylvo-pastorales sont aujourd'hui aggravés par la démographie galopante. Cette situation accélère gravement le développement de la pauvreté et la dégradation de l'environnement, plus particulièrement en milieu rural. Ce déséquilibre écologique déstabilise l'essentiel du potentiel agro-sylvo-pastoral résultant d'une pression humaine et animale intense se traduisant par l'extension des terres de culture. Le déséquilibre passant souvent par le

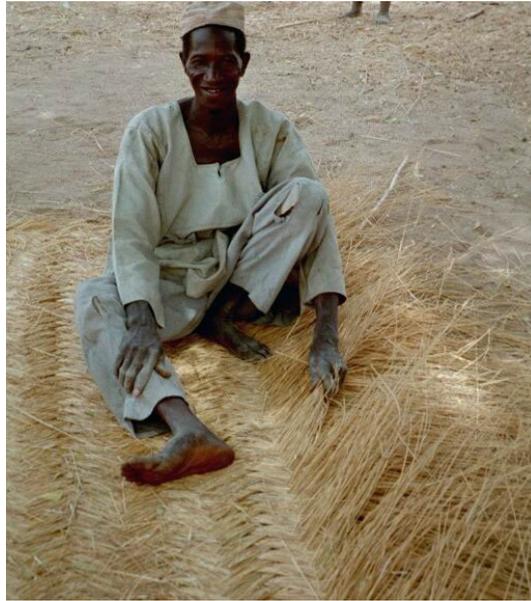
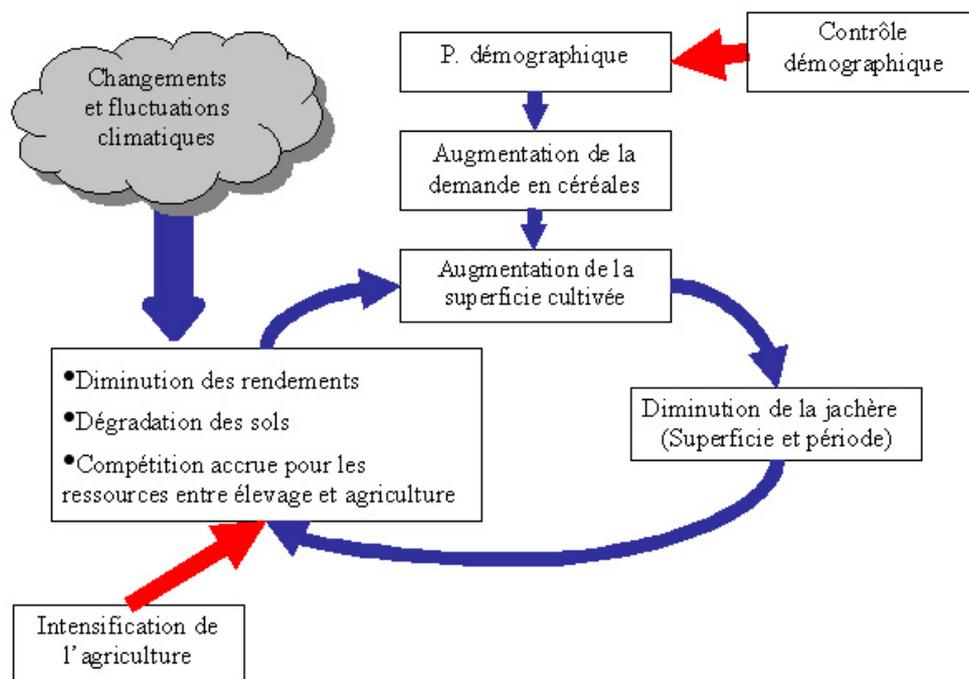


FIG. 2.10 – *Artisanat : fabrication de nattes, village de Tigo-Tegui*

biais de l'exploitation de terres marginales, il contribue alors à l'accélération de la dégradation des terres et des pâturages et à la chute des rendements des cultures. De plus, il engendre une augmentation des conflits entre agriculteurs et éleveurs suite à la compétition pour l'utilisation des ressources naturelles.

Une solution à cette pression sur les terres et à la paupérisation croissante du monde rural qui en résulte peut être un contrôle démographique efficace, conjugué à l'adoption à grande échelle des technologies d'intensification (utilisation d'intrants agricoles appropriés, mécanisation, défrichement amélioré, adoption de spéculations à forte valeur ajoutée) et permettre ainsi de renverser la tendance de dégradation du milieu (figure 2.11, [Gérard *et al.*, 2002]).

FIG. 2.11 – *Un système en déséquilibre ...*

2.3 Collecte des données

2.3.1 Enquêtes de terrain

Trois campagnes d'enquêtes différentes ont été réalisées. La première visait à se familiariser avec la zone d'étude, afin de connaître les enjeux principaux liés à l'aménagement des territoires et à la gestion de la fertilité des sols par les paysans nigériens. La seconde campagne avait pour objectifs d'affiner le choix des pratiques culturales, de mettre en évidence les facteurs clés liés à l'application de celles-ci et de connaître l'impact de scénarios (pression démographique, campagne de vulgarisation de l'utilisation de la fumure minérale, pluviosité). La troisième campagne de collecte de données a été réalisée afin de confirmer l'importance de chacune des contraintes et des incitants à l'application des pratiques choisies, et à l'impact des scénarios sur celles-ci, dans le processus décisionnel du paysan. La durée des enquêtes réalisées au cours de cette troisième campagne était plus courte afin de permettre d'interroger un plus grand nombre d'agriculteurs.

En tout, 38 agriculteurs ont été interrogés, dont 8 durant la première campagne, 9 durant la deuxième et 21 au cours de la troisième. Nous avons choisi de concentrer nos enquêtes dans le terroir de Tigo-Tegui (26 enquêtes sur 38). Les enquêtes ayant servi à réaliser la classification utilisée pour le modèle construit dans ce travail, nous avons utilisé une classification existante (la première classification - VP, VR, VG, CP, CR - explicitée dans la suite de ce travail) pour interroger un échantillon le plus représentatif possible de la diversité des types d'exploitations présentes sur les terroirs. Les résultats obtenus ne sont bien sûr pas représentatifs des 474 agriculteurs repris dans la base de données et ne peuvent donc être utilisés comme des données statistiques.

Nous reprenons cependant ici les réponses aux questions posées systématiquement lors des trois campagnes d'interview. Ces questions étaient relatives à :

- La pression sur les terres (possibilité pour l'agriculteur d'obtenir un nouveau champ en cas de besoin);
- La pratique de la jachère sur les superficies gérées;
- La pratique du transport de fumure organique sur les superficies gérées;
- La pratique du parcage sur les superficies gérées;
- La pratique de contrat de fumure au cours de ces 3 dernières années;
- L'engagement de personnes pour aider au sarclage;

- L'existence de parcelles où le premier sarclage n'a pu être réalisé durant ces 3 dernières années;
- L'utilisation de la fumure minérale sur les superficies gérées.

Les résultats obtenus, par catégorie sont repris dans le tableau 2.3.1:

TAB. 2.3 – *résultats des enquêtes, par catégorie : CP : agro-pastoraliste pauvre, CR : agro-pastoraliste riche, VP : agriculteur pauvre, VR : agriculteur riche, VG : agriculteur "gestionnaire" (ayant des animaux)*

	CP	CR	VP	VR	VG	
Nombre d'interviews	38	6	6	11	10	5
(/Nombre de ménages)	(/474)	(/78)	(/63)	(/189)	(/119)	(/26)
Nouveau champ	3	4	8	10	5	
Jachère	0	1	9	8	5	
Fumier transporté	0	0	8	8	3	
Parcage	6	6	0	0	4	
Contrat de fumure	0	0	1	5	3	
Aide pour le sarclage	1	6	3	7	3	
Sarclage manqué	3	2	11	4	1	
Fumure minérale	0	1	5	8	4	

Les questionnaires ne se limitaient pas uniquement à ces questions. Des questions posées lors de la seconde enquête permirent de réaliser les choix méthodologiques posés dans ce travail. Les objectifs poursuivis par les agriculteurs justifiant l'application des pratiques retenues pour l'établissement du modèle conceptuel furent aussi l'objet des différentes enquêtes. Nous retrouverons tout cela dans la suite de ce travail.

2.3.2 Le système d'information environnemental sur les terroirs du Fakara

Le système d'information environnemental sur les terroirs du FAKARA, mis en place par l'ILRI dans le cadre de l'étude sur le transfert de fertilité dans les systèmes mixtes de production a pour objectif de permettre l'évaluation de l'importance de l'élevage dans le maintien de la fertilité des sols. C'est un outil qui se veut de gestion, d'analyse et de modélisation des informations sur l'environnement. Dans un tel système, on distingue les couches

de base et les couches élaborées (sur la base de modèles dans certains cas) par suite de l'analyse des informations existantes.

Ce système contient deux types de données : des données spatialement référencées, reprise sous format ArcView, et des données résultant d'enquêtes, reprises dans des tables Access. Les données géoréférencées permettent de mettre en évidence la dimension spatiale et temporelle des facteurs qui influencent la gestion des ressources au niveau local ou au niveau régional. C'est sur celles-ci que se basera notre étude. La constitution de ces couches d'information géographique s'est basée sur les données historiques existantes de la zone et sur les données récentes issues de la photographie aérienne et de la prise de points GPS sur les sites. Les objectifs poursuivis par l'ILRI dans la création de ce SIG est de permettre une meilleure compréhension de la dynamique de l'occupation de l'espace sur plusieurs années et d'estimer les flux d'éléments nutritifs à différentes échelles.

Les tables reprenant les résultats des enquêtes sont reprises en format Access. Certaines informations de ces tables sont parfois peu cohérente avec les informations géoréférencées et même parfois entre elles... Par exemple, nous pouvons difficilement faire le lien entre la surface totale gérée par l'agriculteur estimé dans la variable SSUCH reprise dans une table Access, et les informations concernant le parcellaire des agriculteurs reprise dans le SIG. Un autre exemple est la taille du cheptel bovin estimé, repris dans deux variables différentes dans des tables Access (UBTOTX et LVTLU), qui elle aussi ne se ressemble que très peu. Il convient donc d'être très prudent en utilisant cette base de donnée, et en interprétant les résultats de travaux s'appuyant sur celle-ci, comme dans le cas présent.

2.4 Choix méthodologique

2.4.1 Echelle biophysique

La question de l'échelle sur laquelle se base le modèle, ses données et ses résultats ("output"), sont des aspects fréquemment discutés dans le domaine de l'analyse de systèmes et de la recherche en sciences agro-écologiques [Thornton & Herrero, 2001]. Un exemple de différentes échelles biophysiques, et de leurs différents niveaux d'agrégation de données et d'analyse se trouve sur la figure 2.12 [Thornton & Herrero, 2001]. Notons par ailleurs que chaque niveau hiérarchique possède ses propres méthodes de collecte de données. Par exemple, au niveau du ménage comme dans ce travail, les données sont habituellement rassemblées par des enquêtes directes auprès des fermiers et/ou d'autres membres du ménage. A des niveaux plus élevés d'agrégation, le modélisateur doit utiliser une série de données secondaires auxquelles il doit faire confiance et lorsqu'on travaille à des niveaux plus bas, une certaine quantité d'expérimentation est souvent nécessaire.

Le choix de l'échelle est déterminé par l'objectif de l'analyse [Powell *et al.*, 1996], [Coquillard & Hill, 1997], [Thornton & Herrero, 2001]. Nous avons choisi, dans ce travail, d'étudier le comportement des agriculteurs au point de vue de la gestion de la fertilité des sols au niveau du ménage. C'est donc cette échelle qui sera choisie pour la construction de notre modèle conceptuel.

2.4.2 Composants du système et interactions entre ceux-ci

Au niveau du ménage, la première étape dans la caractérisation du système devrait être la définition de ses composantes et des principales interactions entre celles-ci. Rappelons que cette démarche est essentielle, car si elle n'est pas réalisée avec une attention suffisante, l'information obtenue par le modèle ne décrira pas clairement la manière dont le système fonctionne [Thornton & Herrero, 2001]. Nous reprenons pour notre modèle deux types de composantes : les surfaces agricoles gérées par les agriculteurs (parcelles) et les ménages (agriculteurs). Nous assimilons les ménages à des agents cognitifs qui communiquent et agissent dans un environnement (figure 2.13). Les objets situés dans cet environnement sont les parcelles, qui peuvent se trouver dans différents états en fonction de leur situation dans l'espace, leurs caractéristiques géomorphologiques et leur utilisation. Nos agents disposent d'une représentation quasi-complète de l'environnement en ce qui concerne le foncier, en revanche ils n'ont pas d'information sur les autres biens et les

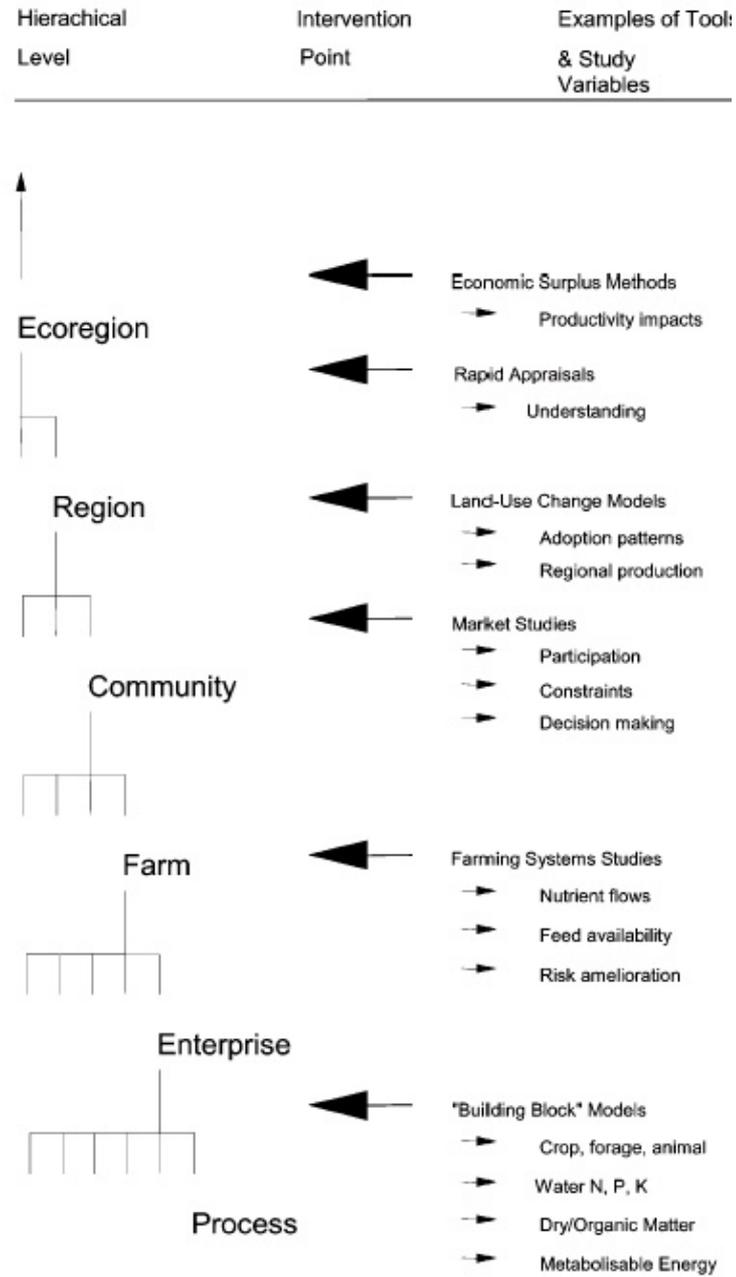


FIG. 2.12 – Exemples d'outils et de type d'étude pour l'analyse des systèmes agricoles à différents niveaux hiérarchiques

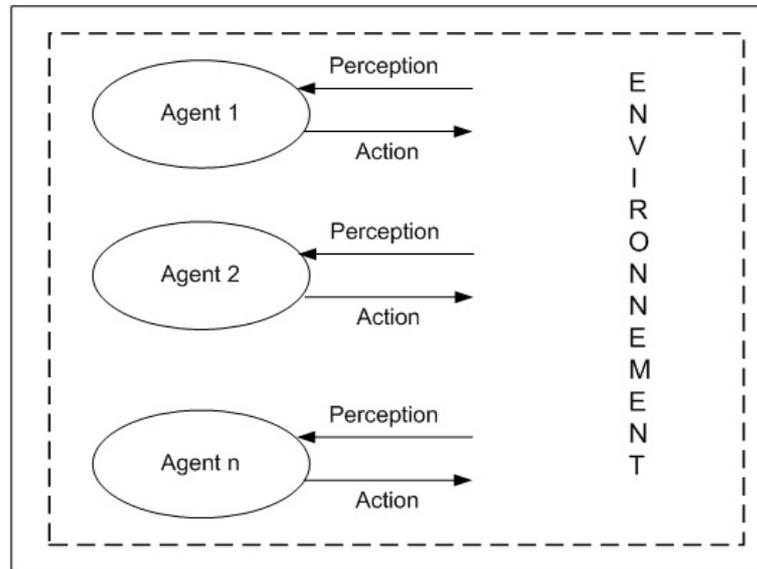


FIG. 2.13 – *Agents cognitifs communiquant et agissant dans un environnement*

connaissances de leurs voisins. Ceci pourrait être pris en considération dans un modèle plus avancé.

Les animaux et les stocks de céréales sont des objets perçus, produits, consommés et transformés par les agents. Bien que l'environnement soit un espace disposant d'une métrique, les agents ne sont pas situés, ils se concrétisent à travers l'ensemble des parcelles qu'ils contrôlent. Dans un souci de simplification et d'approfondissement, nous ne considérons pas le cheptel comme un facteur dynamique, variable en fonction du temps (vente - achat - consommation par l'agriculteur) mais il est essentiel qu'il soit retenu comme tel dans une étude d'ampleur plus importante, étant donné le rôle primordial qu'il occupe dans les systèmes mixtes sahéliens [Powell *et al.*, 1996], [Rovere, 2001]. Il sera considéré ici comme un attribut constant associé au ménage.

Les agriculteurs

Les agriculteurs constituent l'unité élémentaire de notre analyse. Ils disposent d'une représentation quasi-complète de l'environnement en ce qui concerne le foncier, en revanche ils ne disposent pas d'informations sur les autres biens et les connaissances de leurs voisins. Un grand nombre d'enquêtes a été réalisé par l'ILRI sur un total de 452 agriculteurs [ILRI & ICRISAT, 2002].

Ces enquêtes concernent notamment la composition des familles, les parcelles gérées par celle-ci, l'occupation et les pratiques mises en oeuvre sur ces parcelles, la composition du troupeau ainsi que des données plus précises concernant la gestion de celui-ci. Nous reviendrons sur cette base de donnée et sur son contenu dans la suite de ce travail.

Comportement des agriculteurs et gestion des sols

Pour déterminer les pratiques essentielles liées à la gestion des sols et des cultures, une série d'enquêtes a été réalisée (voir la partie "collecte des données"). Ces pratiques sont la mise en jachère, le parcage des animaux sur le champ, l'apport de fumier et de fumure minérale au champ et le sarclage. Les deux premières pratiques, la jachère et le parcage, sont celles qui ont la plus grande importance sur les terroirs étudiés [de Rouw, 1997]; [Gandah, 1999]. Nous les reprendrons donc naturellement dans notre modèle. L'apport de fumier est une méthode de fertilisation couramment utilisée, et possède elle aussi une importance non négligeable. La fumure minérale est de plus en plus appliquée sur les parcelles de la zone d'étude, notamment grâce au projet Intrants. L'utilisation d'apport de fertilisant externe, comme la fumure minérale, étant essentielle au maintien d'un bilan positif en éléments nutritifs des sols au Sahel [Powell *et al.*, 1996], il nous a semblé bon de retenir ce facteur. Les enquêtes de terrain, confirmées par l'interview de spécialistes des terroirs étudiés, ont montré que la réalisation du sarclage de leurs champs n'est pas toujours aisée pour beaucoup d'agriculteurs. Par ailleurs, la chute de rendement qu'occasionne la non réalisation d'un sarclage (-20 % pour le second sarclage, -95 % pour le premier, P.Hiernaux, ILRI, communication personnelle) justifie largement le fait que nous reprenions un tel facteur.

D'autres aspects ont été envisagés, dont l'utilisation des résidus de cultures, la distance entre les poquets lors du semis et le nombre de brins laissés lors du démariage des plants de mil par exemple.

Ils s'est avéré lors des enquêtes que la présence de résidus de cultures sur un champ n'était pas dépendante de la seule volonté de l'agriculteur. En effet, ces résidus sont des biens publics : n'importe quel éleveur peut faire brouter ses animaux sur un champ laissé après récolte, et les habitants peuvent les récolter librement pour la construction d'ustensiles ou de meubles artisanaux (par exemple, les tiges de mil sont récoltées pour la construction de clôtures). Aucune donnée n'existe concernant la distance entre les poquets lors du semis ainsi qu'à propos du nombre de brins laissé lors du démariage

des plants de mil. Il n'a pas été possible d'obtenir des résultats intéressants lors des enquêtes réalisées, tant l'obtention d'informations précises sur ce sujet était compliquée et fastidieuse.

Les parcelles

Dans un modèle choisissant d'accorder une attention spéciale aux facteurs spatiaux, il est naturel de considérer les parcelles comme une composante d'importance. Les parcelles, en fonction de leur aptitude et des pratiques de gestion déterminées par l'agriculteur, vont donner un certain rendement à l'hectare. Ces rendements, traduits au niveau des parcelles, peuvent être convertis en production agricole.

Nous choisissons pour cela de ne considérer que la culture de mil, qui est la principale culture d'importance dans les terroirs étudiés [de Rouw, 1997]; [Baidu-Forson & Renard, 1996]; [Rockström & de Rouw, 1997]; [Gandah, 1999]; [Rovere, 2001] ainsi que dans la plupart des systèmes agraires sahéliens [Kanté, 2001]. Les productions influenceront ensuite l'agriculteur dans son comportement, ce qui fera l'objet de discussions lors de l'établissement du modèle conceptuel.

2.4.3 Echelle temporelle

Le modèle se base sur un pas de temps d'un an, classiquement utilisé dans les modèles situés à cette échelle [Rovere, 2001] [Herve *et al.*, 2002]). Une succession d'opérations annuelles permettra donc plus ou moins bien aux exploitations d'assurer leur survie en utilisant les parcelles qu'elles contrôlent, parfois en modifiant leur occupation. Les événements peuvent être réguliers (tous les ans on sème...) ou ponctuels (phénomène climatique...), déterministes (besoin en nourriture) ou stochastiques (possibilité de contrat de fumure). Le modèle considère le cheptel et les surfaces gérées par les agriculteurs comme des valeurs constantes dans le temps. La rapidité d'évolution de ces caractéristiques dans la réalité a pour conséquence qu'une durée maximale de simulation de 5 ans semble raisonnable. La prise en considération de périodes plus longues (10 ans) ne devra être entreprise qu'avec la plus grande prudence.

Chapitre 3

Modèle conceptuel

3.1 Principes de Base

Dans tout système de gestion des ressources renouvelables, l'espace peut être considéré comme un support des interactions entre les acteurs de ce système. Il localise la ressource et intervient par des contraintes spatiales dans sa gestion [Bousquet *et al.*, 2000]. Notre étude s'est fixé pour objectif de porter une attention particulière aux facteurs spatiaux intervenant dans le système.

Nous utilisons les données géoréférencées du système d'information environnemental sur les terroirs du Fakara, mis en place par l'ILRI. Celles-ci seront mises en relation avec un modèle de simulation. Les données issues de ce modèle pourront être transférées dans un Système d'information Géographique, ce qui aura pour principal avantage [Hartkamp *et al.*, 1999] de faciliter l'analyse simultanée des phénomènes spatiaux et temporels en exécution.

Nous avons opté pour la simulation par événements discrets car elle répond aux exigences citées précédemment et elle permet la prise en compte des effets spatiaux [Coquillard & Hill, 1997]. L'analyse du problème met nettement en évidence un fonctionnement distribué et hétérogène. Les règles de fonctionnement du système s'énoncent facilement en terme d'interactions entre des entités individualisées et autonomes : les exploitations.

De plus, la complexité du problème impose une vision locale, chère aux techniques d'intelligence distribuée et aux Systèmes Multi-Agents [Amblard, 1999, Bousquet *et al.*, 2000].

L'affectation du sol n'est pas dictée par ses seules potentialités, c'est un produit social [Poix & Michelin, 2000]. On ne peut donc aborder le fonctionnement du système sans étudier le cadre socio-économique de sa gestion [Poix & Michelin, 2000]. Celui-ci s'organise sur trois niveaux:

- le village et son terroir, dans lequel sont définies les règles de gestion des territoires collectifs, le cadre d'utilisation des terrains privés (jachère, résidus de culture)... C'est aussi à cette échelle que se fixent les cours du marché (prix de vente et d'achat des produits, des animaux...);
- les ménages regroupant dans une même logique la famille et les ouvriers, les animaux et les stocks (fourrage, céréales...);
- les parcelles, niveau le plus bas de l'organisation, qui assurent le lien entre la sphère économique de la production et des échanges et la sphère écologique.

De nombreuses informations concernant les terroirs, niveau le plus haut, ont été données lors de l'analyse du cadre d'étude. Cet environnement influencera les deux niveaux inférieurs, les ménages et les parcelles, composantes principales de notre modèle conceptuel. Dans ce chapitre, nous commencerons donc par détailler les objectifs de l'agriculteur et nous donnerons des clefs de compréhension de ses motivations dans l'application des pratiques de gestion de la fertilité des sols et des cultures. L'analyse de ces motivations nous permettra de proposer une réactivité par rapport à ces pratiques de gestion pour chaque profil de ménage. Nous détaillerons ensuite les parcelles, objets situés dans cet environnement. Nous déterminerons le niveau d'agrégation avec lequel nous traiterons leurs propriétés pédologiques et établirons leurs dynamique, influencées par leurs propriétés intrinsèques et les différents choix de gestion des ménages.

3.2 Les agriculteurs

3.2.1 Stratégie générale de l'agriculteur

L'agriculture dans les terroirs étudiés est principalement une agriculture de subsistance. L'objectif, pour le paysan, est donc d'avoir son grenier suffisamment rempli pour nourrir sa famille l'année qui vient jusqu'à la fin de la saison des pluies. L'agriculteur adopte donc un comportement visant à

limiter les risques, étant donnée la très grande variabilité spatiale des précipitations. Pour ce faire, l'agriculteur cultivera sur des champs distants les uns des autres et répartira ses efforts de fertilisation sur l'ensemble de ses champs. Ceci a pour conséquence que, pour l'ensemble des pratiques de fertilisation étudiées, plus le rendement attendu par l'agriculteur sur son champ sera faible, plus celui-ci aura de chance d'être fertilisé. Notons que Salif Kanté, [Kanté, 2001], arrive aux mêmes conclusions dans son étude réalisée au sud du Mali.

Les champs situés à proximité du village (les champs de case) sont naturellement plus fertiles (sans que l'agriculteur ne doive les gérer par un traitement particulier : déjections naturelles des hommes, animaux gardés au village, résidus ménagers . . .). Ils sont de surcroît plus accessibles et plus faciles à contrôler. Pour ces raisons, ces champs seront voués à répondre aux besoins urgents en céréale de l'agriculteur à la fin de la période de soudure, avec des plantations de mil précoce spécialement bien gérées (pas de problème de sarclage . . .).

3.2.2 Pratiques culturelles

a. La jachère (J)

La mise en jachère des terres cultivables est une technique utilisée traditionnellement pour le maintien et la fertilisation des sols. Les zones de jachère et les parcours sont ouverts au bétail toute l'année ; ceux-ci sont particulièrement sollicités en saison des pluies quand les animaux sont éloignés des champs. Leur accès est libre à tous. L'accroissement rapide des populations humaines et animales au cours de ces dernières décennies a provoqué l'augmentation des surfaces cultivées, ce qui a pour corollaire la réduction des surfaces et de la durée moyenne des jachères, fragmentant et réduisant ainsi l'espace pastoral.

Le principal facteur incitant (driving force) un agriculteur à laisser sa terre en jachère est l'obtention d'un rendement insuffisant sur celle-ci. Un agriculteur ne travaillera pas une terre qui n'est pas susceptible de lui donner des rendements intéressants. Un agriculteur plus riche, possédant des parcelles en quantité suffisante ou excédentaire pour les besoins de son ménage, cultivera ainsi les terres les plus intéressantes, en laissant une bonne partie en jachère. Par contre, un agriculteur plus pauvre sera prêt à travailler des sols un peu moins bons pour pouvoir répondre aux besoins de son



FIG. 3.1 – *Jachère de deux ans, terroir de Tigo-Tegui*

ménage.

Les droits au sol appartenant aux Djermas, les agriculteurs Peuls doivent payer une dîme. Si un agriculteur Peul laisse une terre en jachère, on considère que celui-ci n'en a pas besoin, et que la terre peut être prêtée à un autre agriculteur. De plus, la terre ne rapporte rien au propriétaire Djerma, qui sera d'autant plus enclin à la reprendre. Les Peuls laisseront donc leurs terres moins facilement en jachère.

Nous considérerons deux types de jachère : la jachère longue et la jachère courte. On entendra par jachère courte la pratique qui consiste à laisser reposer la terre pendant trois ans, qui précéderont la mise en culture de celle-ci pendant 5 ans. Par jachère longue, on comprendra la pratique qui consiste à laisser reposer la terre pendant 15 ans, qui précèdera la mise en culture de celle-ci pendant 5 ans. [Hiernaux, 2002]. En réalité, tous les intermédiaires sont possibles et réalisés.

b. Le parcage (P)

Le parcage est une technique traditionnelle qui consiste à fertiliser une portion de champ en y laissant reposer les animaux pendant plusieurs nuits. Pour ce faire, on attache généralement les petits à un poteau pendant la nuit, le reste du troupeau demeurant alors groupé toute la nuit autour de ceux-ci.

Des études ont été réalisées pour caractériser cette pratique sur le terroir. En moyenne, quand le parcage est effectué avec des bovins, 24 animaux laissés au même endroit pendant 20 nuits apportent de la fumure sur 289 m² avec un apport moyen de 10 tonnes de matières sèches par hectare. Quand le parcage

FIG. 3.2 – *Champ fumé par parcage*

est effectué avec des ovins, 60 animaux laissé au même endroit pendant 15 nuits apportent de la fumure sur 372 m² avec un apport moyen de 5 tonnes de matières sèches par hectare (source : P. Hiernaux, ILRI communication personnelle). Nous travaillerons à un niveau de détail inférieur : quand nous parlerons de superficies fumées par parcage, il s'agira de superficies ayant reçu un apport moyen de 6 tonnes de matières sèches par hectare, sans préciser l'origine de l'apport.

L'agriculteur réalise généralement le parcage est généralement réalisé avec ses propres animaux. Dans certains cas, il arrive à des agriculteurs Djermas de réaliser des "contrats de fumure" avec des agriculteurs Peuls, généralement des éleveurs de passage. Ces contrats de fumure consistent en un échange entre les deux parties, le premier réalisant du parcage avec ses animaux sur le champ du second en échange d'argent ou de céréales.. Le contrat se conclut souvent avec un éleveur se trouvant déjà sur sa parcelle : un champ situé près d'un couloir de passage est donc un champ favorisé pour l'exécution de ce type de contrat. Cette pratique n'a pas une très grande ampleur sur les terroirs étudiés, mais elle reste néanmoins non négligeable ; des études plus importantes seraient nécessaires pour quantifier l'importance exacte du phénomène.

La plupart des animaux sur le périmètre étudié sont détenus par des éleveurs Peuls ; cependant il arrive que des Djermas possèdent des animaux. Dans ce cas, s'ils sont en nombre limité, il arrive souvent qu'ils confient ceux-ci pendant toute ou une partie de l'année à un éleveur Peul, par économie de main d'œuvre.

L'agriculteur ne parquera ses animaux que sur les champs qui ne sont pas trop distants de son habitat, pour pouvoir les surveiller plus aisément et par

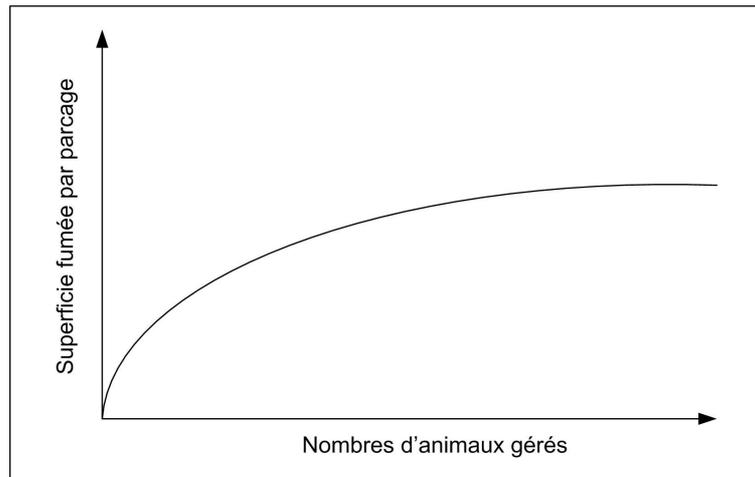


FIG. 3.3 – *Superficie fumée par parcage en fonction du nombre d'animaux gérés*

peur de vols. Par ailleurs, les animaux devant être abreuvés quotidiennement, le parcage ne se fera pas sur les parcelles trop éloignées d'un point d'eau.

Durant une partie de l'année (généralement pendant la saison des pluies) les animaux sont fréquemment envoyés en transhumance dans le nord du Niger. Cet événement est d'autant plus important que la taille du cheptel est élevée, au vu du coût de main d'œuvre que cela engendre.

En conclusion, pour les Djermas n'ayant pas de cheptel, la surface fumée par parcage sera fonction de la quantité de contrats de fumure conclus, qui elle-même dépend du revenu de l'agriculteur. Pour les Djermas possédant des animaux, la surface fumée par parcage sera proportionnelle à la taille du cheptel qu'il gère, en plus d'être fonction de la quantité de contrat de fumure. Cependant, si le cheptel géré par le Djerma est trop petit, il sera confié à un agriculteur possédant un cheptel plus grand, pour économiser la main d'œuvre. Pour les Peuls, la surface fumée par parcage sera proportionnelle à la taille du troupeau. Mais si l'agriculteur possède beaucoup d'animaux, il est fort probable qu'il envoie ceux-ci en transhumance une partie plus ou moins grande de l'année. A partir d'un certain "seuil", la superficie fumée tendra vers une même valeur, quelle que soit la taille du cheptel (figure 3.3).

c. L'application de fumier organique transporté (FO)

Transporter le fumier du village vers son champ est une pratique courante sur le périmètre d'étude. Cette pratique n'est pas réalisée par les Peuls, pour



FIG. 3.4 – *La charrette, habituellement utilisée pour faire du commerce, peut servir à aider au transport de fumier organique pour fertiliser son champ*

qui cela n'est pas accepté socialement. De plus, elle présente pour eux un intérêt assez limité, vu qu'ils déplacent leur camp tous les ans (pour les plus mobiles) ou tous les trois ans (au maximum).

Le fumier transporté présente un effet sur les rendements en mil qui dépend de nombreux facteurs, comme l'origine du fumier ou le type de sol cultivé. Pour fixer les idées, nous prendrons comme valeur de référence un fumier de qualité moyenne appliqué à raison de 5 tonnes de fumier/hectare.

Pour les agriculteurs vivant dans les villages, une contrainte à l'application de cette pratique est la distance à laquelle se trouve la parcelle par rapport au village : plus celle-ci sera éloignée, plus l'application de fumure sera coûteuse en main d'oeuvre, et moins elle sera réalisée. L'agriculteur possédant une charrette aura plus de capacité de transporter du fumier sur son champ et en transportera une plus grande quantité. De plus un rapport main d'oeuvre / besoin nutritionnel du ménage élevé favorisera la main d'oeuvre disponible pour poser du fumier au champs, donc plus il y aura de fumier transporté.

Il arrive parfois que des agriculteurs plus riches payent des personnes pour transporter du fumier sur son champ. Les agriculteurs jouissant d'un revenu plus élevé auront donc une probabilité plus élevée d'avoir du fumier transporté sur leur champ.

Notons aussi que sur les champs proches, le champ sur lequel se trouve le grenier aura plus de chance de recevoir du fumier transporté : les femmes, se rendant au grenier, portent de la fumure sur le champ, et reviennent à la case avec les bottes de mil.

Actuellement, la quantité de fumure organique présente au village semble

ne pas être une contrainte à l'application de fumier sur son champ. Mais lors de l'application de scénarios d'intensification, il est nécessaire d'utiliser un seuil maximum de quantité de fumier transportable par village, conditionnant cette pratique.

d. L'apport de fumure minérale (FM)

C'est une pratique encore peu répandue sur les terroirs étudiés, mais elle commence à prendre de l'ampleur grâce à l'action du projet *Intrants* (voir partie " analyse du contexte local, agriculture et élevage ").

L'effet de l'engrais minéral sur les rendements en mil dépend du type et de la quantité d'engrais utilisé, de la manière dont l'engrais est appliqué et du type de sol traité. Notons aussi que si les précipitations sont peu importantes, les rendements en mil observés sur les champs traités peuvent être fort semblables au rendement sur les champs témoins. En moyenne, l'apport d'un kg d'azote/ha permet d'accroître les rendements en grains de mil de 10 kg/ha, pour une densité de semi de 10000 poquets/ha. Donc, pour un apport de 30 kg d'azote/ha, on peut s'attendre à une augmentation des rendements en grains de 300 kg/ha, soit l'équivalent de 20 bottes/ha [ILRI & ICRISAT, 2002]. Nous prendrons la valeur d'apport d'engrais de 30 kg d'azote/hectare comme référence lorsque nous parlerons de "surface traitées à la fumure minérale (FM)".

Le projet *Intrants* diffusant cette technologie (figure 3.5) en travaillant en collaboration avec les organisations paysannes, les agriculteurs membres d'une organisation paysanne sont plus susceptibles d'utiliser cette nouvelle technique de fertilisation.

Les enquêtes de terrain et avis de diverses personnes-ressources ont montré que les organisations paysannes sont composées de personnes à revenu moyen : il semble que les agriculteurs à revenu élevé ne " daignent " pas adhérer à ces groupements, tandis que les plus pauvres tendent à rester en marge et n'osent pas s'impliquer. Les agriculteurs Peuls ne sont pas intéressés et ne manifestent pas beaucoup de bonne volonté à se regrouper en organisations paysannes, malgré les efforts déjà effectués à cette fin sur les terroirs étudiés.

Dans le cas spécifique de nos terroirs, les paysans effectuant les essais de l'ICRISAT, essais réalisés suite à une collaboration avec le projet *Intrants*, ainsi que ceux qui ont participé au projet Niébé de l'INRAN, ayant approché cette technique de plus près, ont une plus forte probabilité de la mettre en pratique par la suite. Mais le nombre d'agriculteurs touchés par ces deux



FIG. 3.5 – *Campagne de vulgarisation pour la promotion de l'utilisation de la fumure minérale par le projet Intrants*

projets reste néanmoins assez limité (une bonne partie des agriculteurs effectuant les essais de l'ICRISAT étant situés en dehors des terroirs étudiés).

Nous avons constaté qu'à la fin de la saison sèche, les agriculteurs ne disposent que de très peu de liquidités. Le revenu du ménage est donc le facteur principal limitant l'adoption de cette technique. La majorité des Peuls, ne connaissant pas l'existence de l'engrais minéral, n'auront pas usage de cette pratique de fertilisation.

e. Le sarclage

Cette technique traditionnelle consiste à enlever les mauvaises herbes en grattant le sol à l'aide de la hilaire entre les rangées de mil. Il est classiquement réalisé deux fois le long du cycle cultural. La chute de rendement occasionnée par un sarclage manqué est de 20 % pour le second sarclage et de 95 % pour le premier (P.Hiernaux, ILRI, communication personnelle). Le sarclage est donc essentiel à l'obtention de bons rendements en mil. Il arrive fréquemment que des agriculteurs riches engagent d'autres personnes pour les aider au sarclage de leurs champs.

La collecte de données concernant la réalisation des sarclages ne fut pas triviale¹. Il s'avère en fait qu'au début de la saison sèche, beaucoup de pay-

1. Pour l'anecdote, la réponse classique d'un agriculteur lorsqu'on lui demande pourquoi

sans plus pauvres se retrouvent avec des greniers trop peu remplis pour faire vivre leur famille jusqu'aux nouvelles récoltes. Les paysans et/ou leurs fils vont alors aider un voisin à sarcler son champ en échange d'argent ou de bottes de mil (classiquement : 750 - 1000 FCFA par jour) leur permettant de survivre. Ils se retrouvent finalement à cours de main d'œuvre pour sarcler leurs propres champs.

L'utilisation de la roue à traction asine (HATA), technique développée par l'ICRISAT, permettrait de sarcler 7 fois plus vite un champ [ILRI & ICRISAT, 2002], mais cette technique n'est encore que trop peu répandue sur la zone d'étude. Les paysans susceptibles d'adopter une telle technique sont membres d'une organisation paysanne (diffusion du produit), riches (coût : 12000 FCFA), et possèdent un âne (traction).

3.2.3 Synthèse des comportements des agriculteurs :

Il se dégage de cette analyse que l'ethnie et le niveau de revenus sont deux facteurs déterminant la plupart des pratiques de gestion de la fertilité des sols et des cultures étudiées. Nous pouvons faire la distinction entre 7 classes d'agriculteurs ayant une comportement que nous considérerons comme semblable par rapport aux pratiques étudiées : 4 classes de ménages Djermas : VP, VR, VRR et VG, pour respectivement les ménages à revenus faibles, moyens, élevés et moyens ou élevés possédant des animaux. Pour les ménages Peuls, nous pouvons distinguer 3 classes : les deux premières, CP et CR pour les ménages à revenus faibles ou élevés respectivement, sur base de la taille du cheptel géré ; la troisième classe, "atypique", d'agriculteurs Peuls gérant une superficie élevée mais n'ayant pas beaucoup d'animaux (ils possèdent quand même plus d'animaux qu'un ménage Djerma classique).

Sans entrer dans des paramètres précis, nous pouvons donner une importance relative de l'intensité de l'utilisation de la pratique de fertilisation, ou pour le sarclage, de la fréquence de l'occurrence de la non réalisation d'un sarclage sur un champ.

Le tableau 3.1 synthétise les réactivités des groupes d'agriculteurs par rapport aux différentes pratiques étudiées. En fonction de la fréquence d'application de la pratique, le type de ménage une cote : pratique très fréquente,

il n'a pas réussi à sarcler son champ deux fois est : "les pluies étaient trop rapprochées et le mil a poussé trop vite avant que j'aie pu entreprendre le sarclage de mon champ". Cette question est en effet assez délicate, car un agriculteur qui rate un sarclage est considéré par ses pairs comme un agriculteur paresseux ou désorganisé.

TAB. 3.1 – *Synthèse des réactivités par catégorie*

Pratique \ groupe	VP	VR	VRR	VG	CP	CR	CT
Mise en jachère longue	-	+	++	++	0	0	0
Mise en jachère courte	+	++	+	++	+	-	+
Transport de fumier	+	-	+	+	0	0	0
Parcage de ses animaux	0	0	0	++	++	++	++
Contrat de fumure	-	-	-	-	0	0	0
Sarclage non réalisé	+	-	0	-	+	-	-
Utilisation d'engrais minéral	-	+	+	+	0	0	0

réalisée, chaque année (++) ; fréquente (+) ; rare (-) ; très rare (-) ; inexistante (0).

3.3 Les parcelles

3.3.1 Propriétés pédologiques et aptitude des parcelles à la culture

La gestion des cultures dépend, comme nous l'avons vu précédemment, de l'état de fertilité de la parcelle. Celui-ci dépend à son tour des pratiques de fertilisation réalisées sur celle-ci, mais aussi de la qualité intrinsèque de la parcelle, qui dépend de nombreux facteurs. Une carte des sols des terroirs étudiés a été réalisée par l'ILRI. Sur cette carte, les sols ont été classifiés selon trois critères : leur position topographique, leur facteur pédogénétique et la profondeur et texture du sol. (tableau 3.2 [Hiernaux, 2002]). Cette carte nous permet de déterminer les propriétés des sols de chacune des parcelles de nos agriculteurs.

Toutes ces caractérisations pédologiques prises séparément nous font rentrer dans un niveau de détail trop important. Il est nécessaire d'agréger celles-ci tout en conservant des parcelles homogènes du point de vue de l'aptitude culturale. Nous utiliserons à cette fin la classification des sols en 5 types d'aptitude construite dans [Hiernaux, 2002].

Les types de sol ont été classés selon deux échelles : la première est fonction du niveau de fertilité "chimique" et considère la CEC, le pH et la teneur en matière organique, la deuxième est fonction de la capacité d'infiltration du sol et prend en considération la profondeur du sol, la position topogra-

TAB. 3.2 – *Classification des sols position topographique, leur facteur pédo-génétique et la texture du sol utilisée pour la carte des sols*

Topography	Land form	Top soil texture	Soil map code	Corresponding soil type
Plateau	Dune on the plateau	Coarse sands	Pd	Ferralic arenosol
	Thin sand deposit on the iron pan	Sands	Pe	Ferralic arenosol
	Ferruginous iron pan outcrop	Rock, gravels, loamy sands	Pg	Skeletal leptosol
	Thin loamy layer on the iron pan	Loamy sands	Pl	Ferralic arenosol
	Rocky cliff of the plateau border	Rock, gravels, loamy sands	Pr	Skeletal leptosol
Up-slope	Thick sand deposits	Sands	Td	Ferralic arenosol
	Erosion surface, gullies	Loamy sands, gravels	Tr	Skeletal leptosol
	Colluvium fan	Sands, Loamy sands	Tv	Cambic arenosol
Mid and down-slope (embedded erosive surfaces = flats)	Dune on the flats	Coarse sands	Rd	Arenic lixisol
	Thin sand deposits on the flats	Sands, gravels	Re	Arenic lixisol
	Thin loamy layer on the flats	Loamy sands, gravels	Rl	Ferralic arenosol
	Erosive surfaces outcrop	Gravels, loamy sands	Rr	Leptic lixisol
	Depressions filled with colluvium	loamy sands, sands	Rv	Arenic cambisol
Valley system	Major river bed or valley banks	Sands	Vr	Arenic lixisol
	Minor river bed banks	Loamy sands	Vd	Arenic lixisol
	Fossil alluvial plain	Sands, leached	Ve	Gleyic arenosol
	Fossil levees	Loamy sands, leached	Vl	Gleyic arenosol
	Fossil chanal and river beds	Loamy sands, clayed loams	Vc	Arenic gleysol
	River bed	loamy sands, clayed loams	Vv	Arenic gleysol

TAB. 3.3 – *Classification des sols par leur aptitude à la culture*

Potentiel agronomique du sol		Propriété d'infiltration du sol (écoulement et perméabilité)			
		Élevé	Moyen	Faible	Très faible
Fertilité "chimique" du sol	Moyen	Tv, Rv, Vv	Pd, Td	Pl, Rl	Tr, Rr
	pauvre		Rd, Vr, Vd		

phique, la texture et l'encroûtement. Les deux échelles sont combinées dans une matrice (tableau 3.3). Les cinq catégories d'aptitude du sol à la culture résultant de cette classification empirique sont :

- les sables limoneux et les limons argileux dans les dépressions composées d'alluvions et de colluvions (Tv, Rv, Vv) constituent le groupe des sols riches (Aptitude 5). Ces sols offrent le potentiel le plus élevé pour la culture. Toutefois ils sont généralement situés en dépression, donc susceptibles d'être inondés, ce qui peut ruiner la récolte ; par ailleurs la texture relativement fine des sols les rend plus difficiles au sarclage.
- les épais sols sableux modérément lessivés (Pd, Td, Rd, Vr, Vd) constituent le groupe de sols moyens (Aptitude 4). Ces sols sont très faciles à sarcler. Ils peuvent offrir un potentiel moyen à la culture de mil et de niébé si on leur fournit régulièrement de l'engrais ou si on les laisse régulièrement en jachère.
- les épais sols sableux fortement lessivés (Rd, Vr, Vd) constituent le groupe de sols "pauvres" (Aptitude 3). Ces sols sont très faciles à sarcler mais offrent un très faible potentiel de culture à cause de leur faible fertilité "chimique" et de leurs matériaux très sableux.
- les sols sableux, sablo-limoneux peu profonds, et les sols sableux alluvionnaires fortement lessivés (Pl, Rl, Tr, Rr, Pe, Re, Ve), constituent la catégorie de sols marginaux (Aptitude 2). Ces sols offrant un potentiel de culture très faible, sont très sensibles à l'érosion.
- Les sols durs et rocheux (Pg, Pr) constituent le groupe des sols nuls (Aptitude 1). Ces sols sont normalement impropres à la culture.

3.3.2 Niveau de fertilité et aspect dynamique

Les parcelles n'ont pas un niveau de fertilité constant dans le temps. Un certain nombre de techniques de gestion de la fertilité des parcelles à été

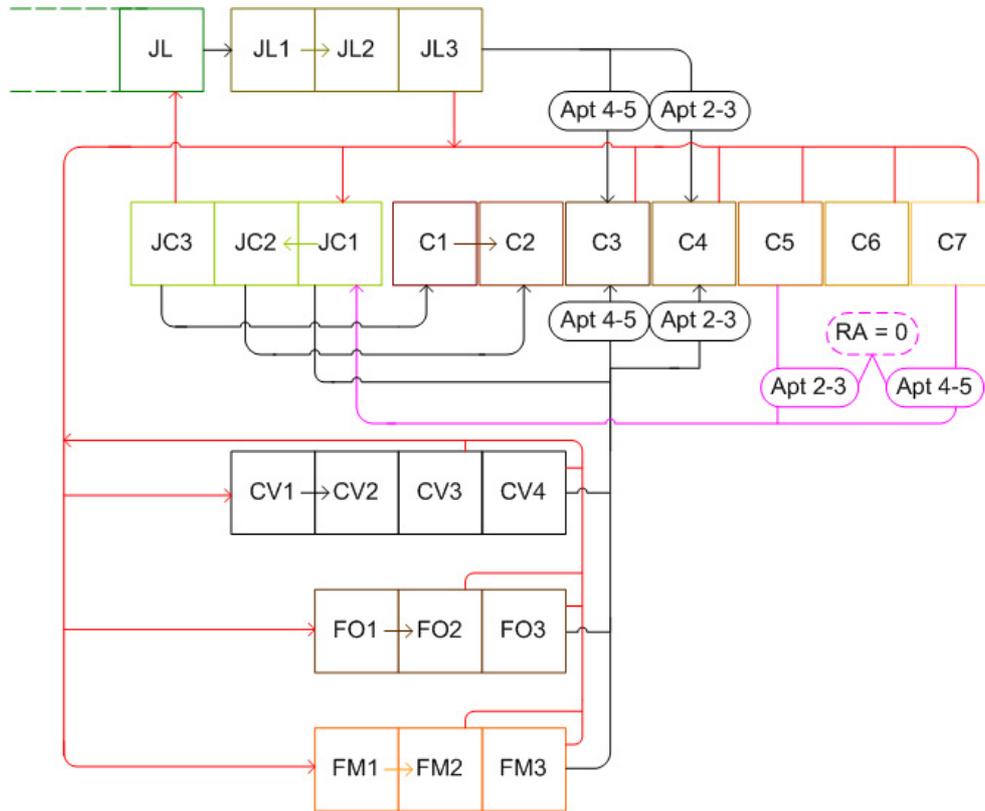


FIG. 3.6 – Niveau de fertilité des parcelles et combinaison de pratique de gestion : aspect dynamique

retenu pour la construction de ce modèle ; ces situations amènent à prendre en considération un certain nombre d'états de fertilité des parcelles. Celles-ci sont détaillées sur la figure 3.6.

Les parcelles peuvent se trouver à 7 niveaux décroissants de fertilité (C1 - C7) après jachère courte. Après la cinquième année de culture (C5), pour les sols d'aptitude 2 et 3, on prendra comme hypothèse que le rendement fournit par ces parcelles est équivalent à un rendement nul (flèches de couleur fuchsia). L'agriculteur dans une telle situation mettra alors son champ en jachère. De même, pour les sols d'aptitude 4 et 5 après la 7ème année de culture (C7).

Un champ transitera naturellement d'un état i à un état $i+1$ (de C2 à C3, ou de CV1 à CV2 ...). Les flèches en rouge représentent les possibilités de gestion de la fertilité par l'agriculteur que nous considérerons, et en noir, la transition naturelle qui se produit lorsque l'agriculteur cultive normalement

son champ, ou dans le cas de la jachère, lorsque l'agriculteur remet son champ en culture. Les flèches rouges font donc augmenter le potentiel à la culture des parcelles, à l'inverse des flèches en noir qui le font descendre.

Les parcelles peuvent se trouver dans 4 états de fertilité après que le champ soit fumé par parcage (CV1 - CV4) et trois états de fertilité après que le champ soit fumé par apport de fumier (FO1 - FO3). Ces deux hypothèses proviennent de chiffres trouvés dans la littérature (notamment [de Rouw, 1997] et [Hiernaux, 2002]) qui considère que la fumure organique possède un effet rétroactif sur 3 à 4 ans. Nous prendrons ici 3 ans pour le fumier transporté, qui est généralement considéré comme de qualité inférieure au fumier obtenu par parcage des animaux. Pour ce dernier, nous considérerons alors un effet rétroactif sur 4 ans. Pour les parcelles traitées à l'engrais minéral, nous considérerons un effet rétroactif de trois années (FM1-FM3), même si pour la troisième année, il doit être considéré comme très faible. Nous considérerons après ces années que le sol se retrouve au même potentiel de fertilité que le champ en C3 ou en C4, respectivement si l'aptitude du sol de la parcelle est supérieure ou égale à 4, ou inférieure à 4.

Nous avons établi, lors des définitions de pratiques, que la jachère courte durerait trois ans. Il y a donc trois états (JC1- JC3). Ensuite, la parcelle sera considérée comme étant en jachère longue, soit l'état JL. Si un champ en jachère longue est remis en culture, il aura un état de fertilité plus important que s'il venait d'être mis en jachère pour une courte durée. Il transitera par les états de fertilité JL1, JL2 et JL3 avant de rejoindre l'état C3 ou C4 si l'aptitude du sol est respectivement supérieure ou égale à 4 ou inférieure à 4, comme pour la fertilisation par parcage et pour le fumier transporté.

Ces états de fertilité et ces possibilités de gestion envisagés permettent de faire passer notre modèle de gestion des parcelles d'un état statique à un état dynamique, et donc d'exécuter des simulations sur plusieurs années.

3.3.3 Rendement moyen

L'agriculteur, en fonction des pratiques de fertilisation du sol, de gestion des cultures et de l'aptitude de ses sols produira une certaine quantité de céréales. Comme nous l'avons vu lors de l'établissement des choix méthodologiques, nous ne prendrons en compte que la culture du mil. S'inspirant des travaux [Hiernaux, 2002], [Gérard, 2002], [Gandah, 1999], [Rockström & de Rouw, 1997], [de Rouw, 1997] nous avons construit la table 3.4, reprenant les rendements moyens à pluviométrie normale en fonction de l'aptitude culturale de la par-

celle. Ce sont des propositions de rendements, et il est certainement possible de rentrer des valeurs encore plus adéquates. Pour ne pas se perdre dans un trop grand nombre de paramètres, nous avons considéré 3 types d'aptitude culturale des sols en groupant les sols d'aptitude moyenne et pauvre en une classe intermédiaire.

3.4 Scénarios

Les scénarios présentés ici n'ont pas été développés dans les détails; nous en discutons pour illustrer ce qui pourrait être appliqué à notre modèle. Par ailleurs, nous donnons aussi dans les paragraphes qui suivent des éléments pouvant servir de base de réflexion pour l'établissement des scénarios proposés.

3.4.1 Pression démographique

La pression démographique observée au Sahel a entraîné une augmentation des superficies cultivées conjointement à une diminution des périodes de jachère et par conséquent, une diminution de la fertilité des sols et une dégradation de l'environnement. L'environnement se saturant, l'augmentation de la productivité devient une nécessité pour la survie de la population, qui devient dès lors plus sensible à la gestion de ses sols [Kanté, 2001]. Baidou-Forson [Baidou-Forson, 1999] note ainsi que la saturation et la dégradation de l'environnement est le premier facteur augmentant la probabilité d'adoption d'une technologie de fertilisation des sols.

Dans un tel scénario, Abdoulaye et Lowenberg-DeBoer expliquent que l'intensification des pratiques se fait selon un continuum, commençant par les techniques les plus simples (traditionnelles), pour aller vers le plus compliqué (les techniques modernes) [Abdoulaye & Lowenberg-DeBoer, 2000]. Les paysans commenceront donc par utiliser les techniques les plus simples, demandant le moins de capital, comme le transport de fumier ou le parcage des animaux. Les techniques plus évoluées, demandant un capital plus important, comme l'utilisation d'engrais minéraux ou de pesticides viendront ensuite, et toucheront en premier lieu les agriculteurs jouissant de moyens plus importants.

TAB. 3.4 – Rendement moyen (kg / ha) par aptitude de sol et pratique de gestion de la fertilité effectuée

	Etat de la parcelle	Aptitude des sols		
		Rich (5)	Fair - Poor (4) - (3)	Marginal (2)
Culture après Jachère courte (JC)	C1	550	350	150
	C2	450	250	100
	C3	300	200	100
	C4	200	150	0
	C5	150	100	0
	C6	100	100	0
	C7	0	0	0
Jachère longue (JL)	JL1	650	450	200
	JL2	550	350	150
	JL3	450	250	100
		C3	C3 – C4	C4
Parcage (P)	CV1	750	550	300
	CV2	650	450	200
	CV3	550	350	150
	CV4	400	250	100
		C3	C3 – C4	C4
Fumier transporté (FO)	FO1	600	400	----
	FO2	500	300	----
	FO3	350	200	----
		C3	C3 – C4	----
Fumure minérale (FM)	FM1	650	450	----
	FM2	450	300	----
	FM3	350	250	----
		C3	C3 – C4	----

3.4.2 Précipitations

On pourrait explorer ce modèle sur différents scénarios de pluviosité, et observer par exemple l'évolution de celui-ci en cas de succession de "bonnes" et de "mauvaises" années. Il serait nécessaire de définir pour ces scénarios de pluviosité l'échelle de perceptions des agriculteurs :

- Au niveau de la pluviosité moyenne sur le terroir. Une mauvaise année pourrait alors retarder l'adoption d'une technologie comme l'engrais minéral, non seulement par le fait qu'elle empêche l'agriculteur d'avoir des moyens l'année suivante pour s'en acheter, mais aussi par le fait que celui-ci ne perçoit pas de différence entre son champ fumé à l'engrais et le champ voisin non fumé.
- Au niveau de la pluviosité moyenne sur la parcelle. L'agriculteur dans ce cas pourrait obtenir des rendements intéressants sur tous ses champs sauf sur le champ amendé à l'engrais minéral qui aurait (par malchance) reçu 200 mm de pluie en moins (chiffre raisonnable et envisageable). Ce qui rend le modèle sensiblement plus complexe, mais qui est tout à fait envisageable et calibrable au vu des données que l'ICRISAT est entrain de collecter sur la zone d'étude

Par ailleurs, il serait intéressant de tenir compte des variations des rendements engendrées par différents niveaux de pluviosité à l'échelle des parcelles. Au lieu de la méthode simple utilisée, prenant en compte les rendements pris une année à pluviosité normale (moyenne), des modèles de croissance de culture pourraient être exploités en parallèle et mis en relation avec le modèle principal pour effectuer ce travail.

D'un point de vue comportement, il faudrait analyser l'influence du rendement des parcelles l'année précédente sur la gestion des cultures de l'agriculteur l'année suivante. En effet, un agriculteur pourrait ainsi avoir une perception erronée de l'état de la fertilité d'une de ces parcelles ayant reçu un apport d'eau plus important. Cela pourrait mener à des comportement inédits : si pendant trois années de suite, cette parcelle recevait 200 mm de plus que les autres parcelles possédées par l'agriculteur en question, il aura tendance à fertiliser des parcelles plus fertiles que la parcelle en question, à l'inverse de ce qui aurait été un comportement "classique".

3.4.3 Vulgarisation de l'engrais minéral

Les effet d'une campagne de vulgarisation devraient êtres envisagés en fonction de la manière dont celle-ci est réalisée.

Pour illustrer cela, prenons un exemple concret : le projet *Intrants*. Celui-ci travaille spécialement pour permettre aux agriculteurs d'avoir des liquidités pour acheter des engrais ou des variétés améliorées via leur technique du "warrantage". La contrainte liée au manque de liquidités en période de soudure est de ce fait atténuée. Mais pour réaliser ce prêt et pour acheter son engrais le paysan doit se rendre dans une organisation paysanne. Les Peuls refusant de se rendre dans ce type d'organisations, on peut dès lors éliminer un nombre important de ménages non concernés par le projet.

Il n'y a donc pas de canevas défini pour un scénario de ce type. Afin d'évaluer correctement l'influence et l'impact d'un tel scénario sur le modèle, il conviendra d'étudier en détail la méthode et les moyens utilisés par le projet de développement.

3.5 Schéma du modèle

Nous concluons avec le schéma général de notre modèle conceptuel (figure 3.7), qui fait référence aux différents éléments détaillés dans ce chapitre.

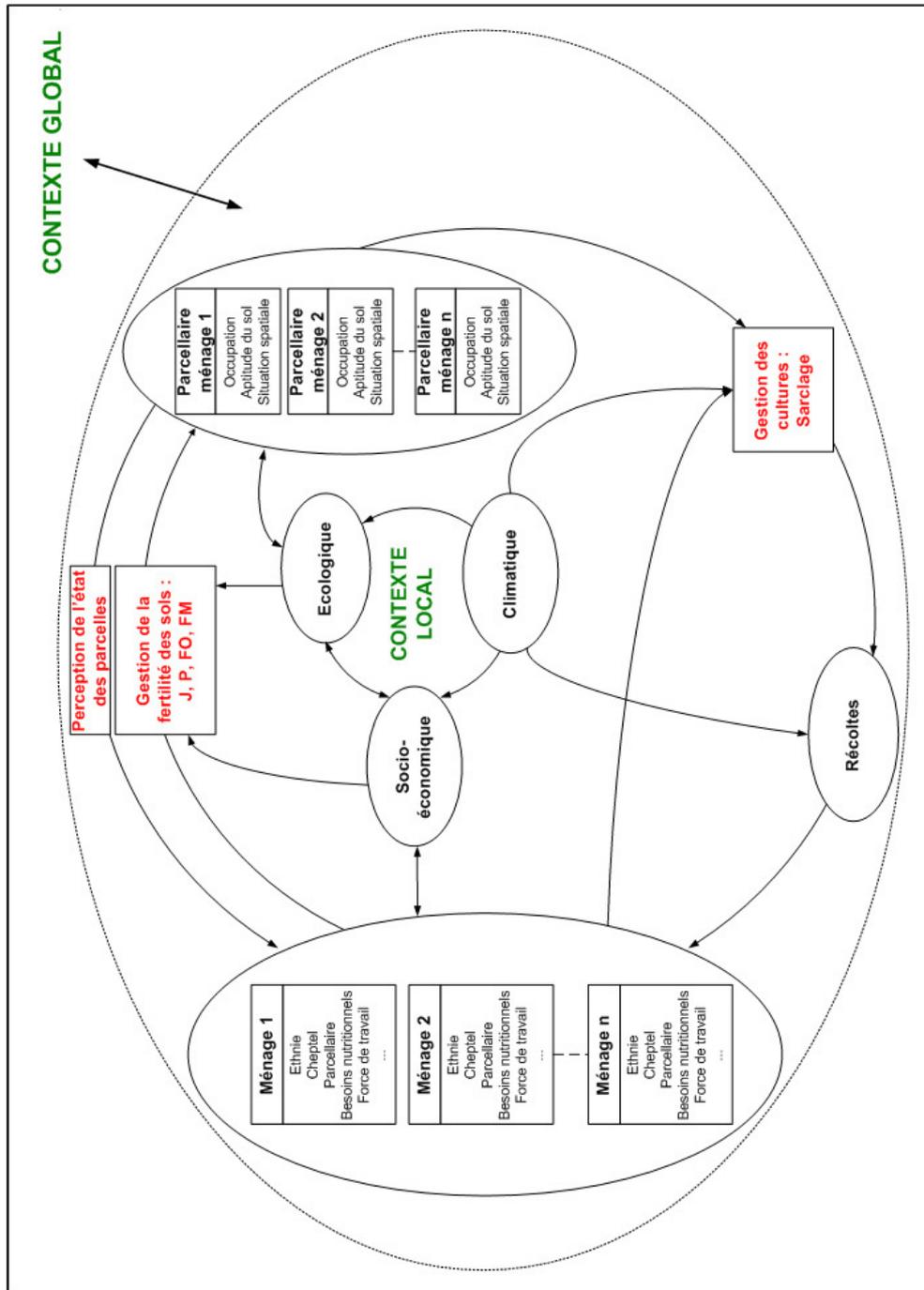


FIG. 3.7 – Schéma général du modèle conceptuel

Chapitre 4

Mise en oeuvre du modèle

4.1 Choix des sources et construction d'une typologie

4.1.1 Introduction

Le choix des sources pour les principales variables utilisées comme attributs aux ménages a posé un certain nombre de difficultés tout au long de ce travail. Nous le verrons dans cette partie, lorsque nous aborderons la construction d'une typologie des ménages. Cette classification a pour objectif de créer des groupes d'exploitations présentant des caractéristiques semblables d'un point de vue gestion de la fertilité des sols. Elle permet de situer aisément le type d'agriculteurs simulés dans le modèle. Les paramètres introduits dans le modèle sont donc directement associables à un profil, ce qui facilite la manipulation du modèle et l'interprétation des résultats donnés par celui-ci.

Les données reprises sur le système d'information environnemental à propos des terroirs du Fakara développé par l'ILRI ont déjà été utilisées pour des travaux de recherche. Certains de ces travaux ont déjà nécessité l'élaboration d'une typologie des agriculteurs. Ces classifications nous ont inspiré pour la création de notre propre typologie. C'est pourquoi nous les décrirons brièvement, pour ensuite détailler la typologie construite pour la nécessité du modèle de simulation réalisé dans ce travail. Nous aborderons aussi la question de fiabilité de la base de données ILRI, qui nous conduira à faire un tri dans les ménages enquêtés.

4.1.2 Classification "initiale"

La classification "initiale" des fermes définit cinq types de fermes selon leur niveau de capitaux et leur type et mode de production. Cette classification est notamment utilisée pour les simulations liées aux rôles du bétail dans la thèse doctorale de Roberto La Rovere [Rovere, 2001]. Cette classification commence par la création de deux groupes, se distinguant selon leurs pratiques agricoles, leur statut de droit sur la terre et selon l'endroit de leur logement : dans des villages (fermiers de village), pour le premier groupe et dans les camps mobiles (fermiers de camp), pour le second. Le premier groupe se compose principalement de personnes de l'ethnie Djerma, ils incluent les propriétaires traditionnels de la terre et se consacrent principalement consacrés aux activités culturelles, avec pour culture principale le mil. Le deuxième groupe se compose essentiellement de personnes de l'ethnie Peul, avec une culture pastorale héréditaire, donnant une importance plus élevée à la production animale que les fermiers de village. Dans le premier groupe, on a établi trois types de fermes : les fermiers pauvres, les fermiers riches, et les fermiers gestionnaires, c-à-d gérant un troupeau. Dans le second groupe, deux types ont été dégagés : les agro-pastoralistes pauvres, ayant un faible rapport terre et bétail par personnes à nourrir en "équivalent consommateurs adultes" (ou adult consumers equivalent, a.c.e.), et les riches, ayant soit le rapport de surface gérée par a.c.e. élevé, soit le rapport de cheptel par a.c.e. élevé. Nous obtenons donc les 5 classes suivantes :

- CP ou "camp poor" : agro-pastoralistes "pauvres", c-à-d ayant une faible quantité de bétail et de terres. Le rapport bétail géré (UBT) / a.c.e. < 2.5 et le rapport terres (ha) gérées/ a.c.e. < 1.5
- CR ou "camp rich" : agro-pastoralistes "riches", c-à-d ayant une quantité importante de bétail et/ou de terres. Le rapport bétail géré (UBT) / a.c.e. $= 2.5$ ou le rapport terres (ha) gérées/ a.c.e. $= 1.5$
- VG ou "villages managers" : fermiers gestionnaires, c-à-d fermiers vivants dans un village gérant un troupeau de plus de 5 UBT.
- VP ou "villager poor" : fermier "pauvre", c-à-d ayant une faible quantité de terres. Le rapport le rapport terres (ha) gérées/ a.c.e. < 2.5
- VR ou "villager rich" : fermier "riche", c-à-d ayant une quantité importante de terres. Le rapport terres (ha) gérées/ a.c.e. $= 2.5$

TAB. 4.1 – *Différences de composition entre classifications.*

	CP	CR	VP	VR	VG
Classification initiale :	78	63	189	119	26
Classification ILRI 2002 :	68	80	106	162	76

4.1.3 Classification pour l'étude des flux d'élément nutritifs. (ILRI, avril 2002)

Cette seconde classification des fermes, en cours de réalisation par l'ILRI (plus particulièrement par P. Hiernaux et J. Busqué), est utilisée dans leur étude des flux d'éléments nutritifs à une échelle allant de la parcelle à la région. La description qui suit est celle de l'état de la typologie réalisée en avril 2002. Cette classification a pour objectif de créer des groupes de fermes réagissant de manière similaire suite à des interventions externes (telles que des politiques de développement visant à l'intensification des systèmes agraires) afin de permettre leur encadrement. Cette classification a été réalisée par une analyse discriminante par étape (en utilisant le logiciel SAS) et prend en compte les cinq variables suivantes :

- La main-d'oeuvre totale (adulte équivalent) par ferme,
- La surface cultivable gérée (ha),
- Le nombre maximum de bétail possédé (UBT),
- Le nombre maximum de petits ruminants adultes possédés (mouton et chèvres),
- La proportion de surfaces contrôlées sur des sols de mauvaise qualité.

Avec cet ensemble, une analyse multi-variable par groupe (cluster multivariate analysis) a été exécutée indépendamment pour des fermiers de villages et de camps. De manière empirique, au terme de l'analyse, il a été choisi de garder cinq grands groupes, possédant globalement les mêmes caractéristiques que les groupes de la classification initiale.

Il est normal, au vu de la méthode de classification utilisée, que la composition des groupes diffère en taille par rapport à la classification initiale. Celle-ci diffère de la manière suivante :

4.1.4 Typologie construite

Cette typologie s'est réalisée en trois étapes :

1. Choix de la méthode de classification et des variables;
2. Choix de la source d'information des variables retenues;
3. Contrôle des résultats par statistiques sur les classes définies et élimination des données "douteuses",

Méthode et variables retenues

La méthode utilisée est la même que celle de la classification initiale. Elle se justifie dans notre cas, mais nécessite néanmoins d'être améliorée pour les besoins du travail qui nous occupe. Le critère-clé de réactivité des agriculteurs, nous l'avons vu précédemment, est le revenu. La classification réalisée établit dès lors des classes en tenant particulièrement compte de cet aspect. La manière d'envisager la gestion des sols et des productions est fortement conditionnée par l'ethnie à laquelle appartient le chef de famille. Les agriculteurs ont donc tout d'abord été classés en deux groupes, en fonction de leur ethnie/habitat. Les Djerma, habitant en village, ont été divisés en quatre groupes, en fonction de leur revenu et de leur type de production. Pour caractériser le niveau de revenu du ménage, nous avons choisi d'utiliser le rapport surface gérée (ha) par a.c.e. (*TERRE*). Cette approche est justifiée étant donné que, sur les terroirs étudiés, plus de 90 % des revenus du ménage proviennent de l'activité agricole [Rovere, 2001]. Ce rapport a permis de créer les catégories VP, VR, et VRR soit respectivement les agriculteurs pauvres, à revenu moyen et à revenu élevé. Des catégories VR et VRR, ont été exclus les agriculteurs possédant un rapport de cheptel par a.c.e. *CHEPT* élevé ($>0,5$), pour former la classe VG.

Les ménages Peuls, vivant dans des camps, ont eux aussi été classés en fonction de leur type de revenu. La majorité d'entre eux ceux-ci vivent des revenus liés à l'élevage d'animaux. Le mode de gestion dépendant pour eux aussi fortement du revenu, nous les avons donc naturellement classés en deux groupes à l'aide du *CHEPT*: CR et CP, respectivement les plus riches et les plus pauvres. La classe CP contenait une série d'agriculteurs Peuls atypiques, qui géraient une surface importante mais très peu d'animaux. Ceux-ci ont été classés dans la classe CT.

Qualité de l'information et choix des sources pour les variables utilisées

Pour les deux rapports utilisés pour la classification, nous avons besoin de trois variables. La surface cultivable gérée et la consommation du ménage pour le rapport *TERRE*, le cheptel géré et la consommation du ménage pour le rapport *CHEPT*.

La surface cultivable gérée, en hectares

Les surfaces gérées par un ménage diffèrent selon les sources, et ce de manière plus ou moins importante. Il existe trois sources d'information : la variable *SSUCH*, utilisée dans la "classification initiale" se basant sur une collecte de données, qui calcule la surface des champs gérés par les agriculteurs grâce au temps mis par ceux-ci pour effectuer le premier sarclage (0.15 ha/pers.jours, déterminé empiriquement par l'ILRI), la variable *LCR* utilisée dans le travail en cours de réalisation par l'ILRI sur les flux d'éléments nutritifs, et la couche vectorielle *mgtunits.shp*, reprenant les champs gérés par chaque ménage sur un fichier de forme ArcView géoréférencée, duquel on peut obtenir l'information par traitement.

Les enquêtes sur le terrain ont montré l'inexactitude de chacune de ces trois sources. Le tour du parcellaire d'une dizaine de ménages a été réalisé avec un GPS . Les conclusions que nous en tirons sont les suivantes : La variable *SSUCH* est totalement inutilisable ; Les imprécisions de la variable *LCR*, et de l'information reprise dans la couche vectorielle *mgtunit.shp* semblent être d'une ampleur égale ; elles sont de l'ordre de 10 à 50% en fonction du ménage enquêté.

Par ailleurs, la simulation se base sur *mgtunit.shp* pour le calcul de plusieurs paramètres spatiaux conditionnant le comportement des agriculteurs. Il est donc essentiel que celle-ci présente un degré suffisant d'exactitude. Afin d'éviter des erreurs trop importantes dans les résultats obtenus lors de la simulation, les ménages dont les données étaient les moins sûres ont été éliminées de la base de données utilisée : nous avons pris comme hypothèse que l'erreur était "moins probable" et "acceptable" si la différence entre les surfaces reprises dans *mgtunit.shp* et *LCR* étaient inférieures à 15% de la moyenne de ces deux valeurs.

Ces différences sont reprises dans le tableau qui suit, et nous constatons que si nous tolérons une différence inférieure ou égale à 15%, nous écartons

$\frac{ Mgtunits-LCR }{(Mgtunits+LCR)/2}$	Nombre de ménages	% du total des ménages
> 0.1 / >10 % d'écart	150	31,30 %
> 0.15 / >15 % d'écart	114	23,80 %
> 0.2 / >20 % d'écart	90	18,80 %
> 0.3 / >30 % d'écart	59	12,30 %

114 ménages dont les données sont considérées comme trop peu fiables.

La terre gérée a été choisie plutôt que la terre possédée parce que cette dernière est considérée comme très stable: les accords sont établis habituellement à long terme et ils sont fortement liés aux règles sociales. En outre, la terre possédée est très négativement biaisée, un nombre de ménages possédant la majorité de la terre cultivable.

Le nombre maximum de têtes de bétail possédées en unité de gros bétail tropical (UBT, 250 kilogrammes de poids vif de bétail)

Dans le cas présent, deux sources s'offrent à nous : la variable *UBTOTX*, qui a été récoltée dans l'enquête ayant servi à réaliser la "classification initiale", et la variable *LVTLU*, utilisée dans le travail en cours de réalisation par l'ILRI sur les flux d'éléments nutritifs. C'est cette dernière qui a été finalement choisie, étant donné qu'elle se rapprochait plus des résultats obtenus lors des enquêtes de terrain et que c'est à celle-là que l'ILRI accorde sa confiance puisqu'il l'utilise dans ses travaux les plus récents.

Le choix des nombres maximum au lieu des nombres moyens est expliqué par la fréquence des échanges temporaires d'animaux au sein même des ménages, n'impliquant généralement ni ventes ni achats.

La consommation du ménage

Pour la consommation du ménage, une seule source est disponible. Les enquêtes ont révélé que la qualité de la base était suffisante et nous avons considéré que celle-ci était suffisamment fiable pour être utilisée dans la suite. Cette information est reprise dans la base de données sous le nom *SDIETG* et a été calculé comme suit : âge inférieur à 1 an : consommation = 0,3 ; 1-5 ans : consommation = 0,5 ; 5-15 ans : consommation = 0,9 (garçon) ou 0,8

(fille) ; 15-60 ans: consommation = 1 (homme) ou 0,9 (femme) ; âge > 60 ans : consommation = 0,8 (homme) ou 0,7 (femme).

Statistiques descriptives et qualité de la typologie

En classant les exploitations par la méthode détaillée précédemment, nous avons réalisé des statistiques concernant les principales variables qui nous intéressent. Ces statistiques ont permis un contrôle des résultats de notre classification. Les exploitations présentant un profil trop sensiblement différents des autres agriculteurs appartenant au même groupe ont été éliminées, huit exploitations en l'occurrence. Les statistiques descriptives des exploitations retenues pour le modèle de simulation se trouvent détaillées sur les tableaux 4.2 et 4.3. Les variables étudiées reprises dans le tableau sont les suivantes :

- TERRE est le rapport surface cultivable gérée en hectares par consommateur au sein du ménage en équivalent consommateur adulte.
- CHEPT est le rapport cheptel possédé en UBT par consommateur au sein du ménage en équivalent consommateur adulte.
- Area (ha) est la surface cultivable gérée par le ménage.
- SDIETG : indice de besoin nutritionnel en équivalent besoin nutritionnel d'un consommateur adulte.
- LVTLU est le cheptel possédé par le ménage en UBT.
- LVSR est le nombre d'ovins et caprins possédés par ferme en UBT.
- NBRSA est la main-d'oeuvre disponible pour le premier sarclage (nombre de jours en adulte équivalent travail) par ferme.
- ANES est le nombre d'ânes possédés par ménage.
- CART est le nombre de charrettes possédés par ménage.
- FTRAC est la force de traction disponible par ménage.
- SWORKG est la main-d'oeuvre totale (adulte équivalent) par ferme.
- NGEST est le nombre d'individus composant le ménage.

TAB. 4.2 – *Statistique descriptive des principales variables utilisées pour la simulation par type d'exploitation agricole. Groupe VP, VR, VRR, VG*

Variables	Type 1 : VP (n=90) <i>Terre <2,5</i>			Type 2 : VR (n=77) <i>Terre > 2,5 Chept < 0,5</i>			Type 3 : VRR (n=54) <i>Terre > 5 Chept < 0,5</i>			Type 4 : VG (n=25) <i>Terre > 2,5 Chept > 0,5</i>		
	Mean	StDev	Max Min	Mean	StDev	Max Min	Mean	StDev	Max Min	Mean	StDev	Max Min
<i>Terre</i>	1,54	0,62	2,49 0,17	3,66	0,70	4,84 2,51	7,96	2,97	18,29 5,02	5,05	2,52	11,12 2,55
<i>Chept</i>	0,10	0,02	0,88 0,00	0,10	0,14	0,47 0,00	0,10	0,10	0,42 0,00	1,05	0,83	3,93 0,50
<i>Area (ha)</i>	12,37	8,76	44,20 0,41	27,36	14,14	67,81 4,89	49,84	27,45	155,4 10,00	45,61	41,30	181,46 12,13
<i>SDIETG</i>	7,99	3,77	18,70 0,80	7,41	3,42	13,00 1,90	6,29	2,42	11,90 1,70	9,87	9,83	42,30 2,70
<i>LVTLU</i>	0,92	1,37	6,76 0,00	0,96	1,45	6,90 0,00	0,62	0,74	3,77 0,00	13,87	22,36	84,23 1,87
<i>LVSR</i>	0,27	0,28	1,24 0,00	0,34	0,37	1,44 0,00	0,27	0,28	1,22 0,00	1,05	1,45	5,63 0,00
<i>NBRSA</i>	138	127	728 15	132	145	1115 28	109	71	346 12	187	191	694 20
<i>ANES</i>	0,23	0,45	2,00 0,00	0,20	0,44	2,00 0,00	0,09	0,35	2,00 0,00	0,32	0,56	2,00 0,00
<i>CART</i>	0,00	0,00	0,00 0,00	0,00	0,00	0,00 0,00	0,00	0,00	0,00 0,00	0,36	0,81	3,00 0,00
<i>FTRAC</i>	0,48	1,07	7,50 0,00	0,38	0,79	3,50 0,00	0,38	0,78	2,50 0,00	0,80	1,09	3,50 0,00
<i>SWORKG</i>	5,21	2,80	13,90 0,80	5,09	2,42	12,40 1,80	4,45	1,80	8,10 1,60	6,24	6,15	26,20 1,60
<i>NGEST</i>	9,81	4,64	23,00 1,00	8,97	4,20	20,00 2,00	7,65	2,96	16,00 2,00	12,20	12,15	53,00 3,00

TAB. 4.3 – *Statistique descriptive des principales variables utilisées pour la simulation par type d'exploitation agricole. Groupe CP, CR, CT*

Variables	Type 5 : CP				Type 6 : CR				Type 7 : CT			
	n = 55	Chept < 2,5			n = 48	Chept > 2,5			n = 14	Terre > 2,5		
	Mean	StDev	Max	Min	Mean	StDev	Max	Min	Mean	StDev	Max	Min
<i>Terre</i>	1,08	0,44	1,99	0,21	1,85	1,28	5,53	0,09	3,11	0,90	5,35	2,14
<i>Chept</i>	1,06	0,80	2,44	0,00	5,19	2,32	12,18	2,50	0,79	0,57	1,83	0,02
<i>Area (ha)</i>	8,56	4,63	22,43	1,79	14,64	17,36	120,12	0,90	21,94	9,37	44,91	10,76
<i>SDIETG</i>	8,32	3,87	22,30	3,30	8,19	4,91	33,90	2,70	7,07	2,21	11,20	3,80
<i>LVTLU</i>	9,74	10,43	52,12	0,00	40,04	21,40	90,41	9,69	5,92	5,10	17,73	0,18
<i>LVSRL</i>	2,20	2,85	16,05	0,00	6,37	6,23	22,58	0,00	1,73	2,74	8,67	0,00
<i>NBRSA</i>	82	64	339	8	106	74	419	22	89	58	208	18
<i>ANES</i>	1,48	1,50	5,00	0,00	1,90	1,68	6,00	0,00	0,57	0,94	2,00	0,00
<i>CART</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,14	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>FTRAC</i>	0,98	1,54	8,00	0,00	1,32	1,24	5,60	0,00	0,46	0,95	3,40	0,00
<i>SWORKG</i>	5,85	2,82	14,70	2,30	5,83	3,66	23,80	1,80	5,32	1,96	8,30	1,30
<i>NGEST</i>	9,91	4,69	27,00	4,00	9,92	6,04	42,00	3,00	8,36	2,65	14,00	5,00

4.2 Traitement des informations par SIG

Nous avons besoin, pour la réalisation de notre modèle, du parcellaire des agriculteurs découpé en parcelles d'aptitude agricole égale. On doit connaître, pour chacune de ces parcelles: la distance au village et au puits le plus proche et la présence d'un couloir de passage sur la parcelle ou à moins de 50 mètres. De plus, notre modèle doit posséder une situation initiale, avec une affectation initiale du sol. Donner une affectation initiale de manière aléatoire n'aurait aucun intérêt pour l'interprétation ultérieure des résultats. Nous utiliserons donc des cartes d'occupation du sol pour répondre à ce besoin. Il nous faudra donc, pour chacune des parcelles, la surface de celle-ci affectée d'une occupation (cultivée, cultivée fumée, mise en jachère ...)

Nous avons à disposition pour cela, en format de fichier ArcView, les données géoréférencées suivantes :

- Le parcellaire des agriculteurs (1996) (*mgtunits.shp*);
- La carte pédologique ;
- La situation géographique des villages et des puits ;
- Les tracés des couloirs de passages ; l'occupation du sol en 1994, 1995 et 1996 ; sur ces cartes, on distingue les affectations C, CV, VL, J, F et U pour respectivement champ cultivé, champ cultivé fumé, village, jachère courte, jachère longue et terres impropres à la culture.

Dans ce qui suit, nous donnerons les "clefs" permettant de refaire aisément les manœuvres réalisées avec un nouveau jeu de données, pour préciser ensuite les champs et les informations ajoutés à la table d'attribut du nouveau parcellaire.

4.2.1 Création du nouveau parcellaire

Pour réaliser cela, nous avons utilisé la fonction "Union" du logiciel SIG ArcGis, en prenant le parcellaire et la carte pédologique regroupée par aptitude. Le champ "Aptitude", qui peut prendre des valeurs allant de 1 à 5 en fonction de l'aptitude culturale de la parcelle a été ajouté à la table d'attribut du nouveau parcellaire. Les parcelles résultant de cette opération ont été effacées (554 polygones, représentant un total de 3.65 Hectares ont été retirés de la sorte de l'ensemble du parcellaire, soit 8550 hectares) afin de ne pas travailler avec des unités de gestion insignifiantes.

Par ailleurs, les parcelles impropres à la culture, ayant la cote 1 comme aptitude, ont été retirées du parcellaire. Le nouveau parcellaire ainsi construit se trouve illustré dans l'annexe 1.

4.2.2 Affectation de la distance au village et au puits le plus proche

Pour cela, nous avons utilisé la fonction "join table" du logiciel SIG ArcGis en prenant le nouveau parcellaire et la couche de points géoréférençant les villages et les puits. Les champs "distpuits" et "distvill", contenant respectivement la distance en mètres de la parcelle par rapport au village et au puits le plus proche, ont été ajoutés à la table d'attributs du nouveau parcellaire. Il s'agit en fait de la distance du puits ou du village au point de la parcelle le plus proche de celui-ci.

4.2.3 Présence d'un couloir de passage à proximité

Pour cela, nous avons utilisé la fonction "Create Buffers" du logiciel SIG ArcGis en prenant le nouveau parcellaire et la couche vectorielle reprenant les tracés des couloirs de passages.

Les parcelles se trouvant à moins de 50 mètres d'un couloir de passage on reçu la cote de 1 dans le nouveau champ "parcours" créé; les parcelles distantes de plus de 50 mètres on reçu la cote 0.

4.2.4 Affectation de l'occupation du sol de 1996 aux parcelles

Avec l'occupation du sol en 1996 et le nouveau parcellaire, nous avons utilisé la fonction "Tabulate Areas" de l'extension "Spatial Analyst" du logiciel SIG ArcView, en utilisant une maille d'un mètre. Les champs C, CV, VL, J, F et U pour les surfaces (m^2) de la parcelle occupées par respectivement un champ cultivé, champ cultivé fumé, village, jachère courte, jachère longue et terres impropres à la culture ont été ajoutés de cette manière à la table d'attribut du nouveau parcellaire. Nous verrons plus tard que nous avons dû refaire cette manoeuvre avec l'occupation du sol en 1995 et en 1994, à cause de l'incohérence des données obtenues en utilisant l'occupation du sol de 1996. Finalement, nous avons retenu l'occupation du sol en 1995 car elle semblait la plus cohérente. Après cette manoeuvre, de petites sections de champs ont reçu l'affectation VL ; nous avons considéré que ceux-ci formaient

en réalité des champs fumés, et nous avons construit une nouvelle classe CV' $= CV + VL$. Théoriquement, ayant retiré les terres impropres à la culture du parcellaire (manœuvre 1), nous ne devions pas obtenir de sections avec la cote U. Pourtant, nous obtenons 132 hectares affectés de la sorte (sur un total de 8550 hectares). Dans ce cas, nous avons accordé notre confiance à la carte pédologique, et avons considéré ces hectares comme étant en jachère longue : $F' = F+U$.

4.3 Méthode et Outils

Le cadre conceptuel d'un système multi-agents intégré à une simulation par événements discrets ayant été construit et le jeu de données ayant été constitué, nous allons maintenant le rendre opérationnel. Pour cela, nous utiliserons le logiciel de programmation Visual Basic, associé au logiciel Excel, tous deux produits par Microsoft. Notre choix s'est penché vers celui-ci car l'environnement de travail est très simple d'utilisation, les résultats et sous-résultats sont aisément contrôlables et analysables grâce aux objets "feuille de calcul" d'Excel, ce qui rend le code informatique aisément manipulable par des personnes qui souhaiteraient essayer, utiliser ou modifier celui-ci. Notons quand même qu'il existe des langages avec des environnements de travail axés sur la simulation, comme le logiciel Vensim, qui est un freeware distribué gratuitement sur Internet, ou des langages de pure programmation plus évolués, comme C++, mais la complexité plus grande de ceux-ci rendrait le modèle imperméable et difficilement manipulable par tout un chacun.

De plus, dans un second temps, il serait possible de transposer le code en Visual Basic ArcGis, ce qui permettrait de recalculer des paramètres spatiaux à chaque pas de temps. Ce n'était pas nécessaire en ce qui nous concerne, notre modèle conceptuel n'ayant pas pris en compte un tel niveau de complexité.

Nous commencerons par présenter le langage de programmation utilisé, Visual Basic Excel. Ensuite nous détaillerons l'algorithme construit. Nous commencerons par l'algorithme général, avec des éléments qui seront utilisés par toutes les parties et nous terminerons par l'algorithme de calcul des surfaces fumées par parçage. L'algorithme décrit dans cette section se trouve en Annexe 2.

4.3.1 Le logiciel de programmation : Visual Basic Excel

Visual Basic est un langage de développement Windows ; il est intégré dans tous les logiciels de Bureautique de Microsoft sous le nom de : VBA (Visual Basic Application). C'est un langage de programmation orienté objet qui permet de programmer des applications indépendantes sous l'environnement Windows. Un objet représente un élément d'une application, tel qu'une feuille de calcul, une cellule, ou un graphique pour Excel, ou bien un formulaire, une table ou un état pour Access. Ces objets sont exploités en leur

appliquant un ensemble de méthodes, ou en modifiant leurs propriétés.

L'environnement de travail de Visual Basic est désigné sous le nom de " Environnement de développement intégré " (IDE , Integrated Development Environment) car il intègre dans un environnement de travail la création, la modification, la compilation et le débogage. Un tel environnement facilite l'élaboration du code informatique (algorithme) : par exemple, lorsqu'un code est écrit en Visual Basic, celui-ci l'interprète au fur et à mesure et vous signale immédiatement les erreurs de syntaxe, ou anticipe votre frappe en vous proposant des menus déroulants.

En conclusion, VBA Excel présente donc l'avantage de posséder un environnement de travail " user-friendly ", facilitant la création, la modification, la compilation et le débogage du code informatique ; il est de plus aisément couplable avec un grand nombre de logiciels, comme Microsoft Access. Par contre, VBA Excel n'est pas un langage de programmation performant : le code n'est compilé que partiellement, ce qui rend le programme assez lent à l'exécution; il possède de plus des capacités de programmation limitées, et il est difficile d'encoder des algorithmes évolués.

4.3.2 Le programme de simulation

Principes et objectifs

Le programme a été conçu afin de pouvoir s'adapter en cas d'entrée de nouveaux "jeux" de données : le nombre de parcelles et d'agriculteurs est recompté, et les caractéristiques des agriculteurs associés aux parcelles sont remises à jour au début de chaque simulation. Une interface facilitant la manipulation du modèle et permettant de modifier aisément les paramètres a été réalisée. (Fig 4.1 et 4.2). L'ensemble des paramètres utilisés pour la simulation est contrôlable dans la table principale (main).

Les éléments du programme

Le programme se présente sous la forme d'un fichier Excel. Il contient les tables de calcul suivantes :

- *Main* : Feuille principale, avec le bouton de lancement du programme. Sur cette feuille il est possible de vérifier aisément tous les paramètres de la simulation.

Modification des paramètres

Par Traitement :	Par Groupe :
<input type="checkbox"/> Surfaces fumées par parcage (P)	<input type="checkbox"/> VP (groupe 1)
<input type="checkbox"/> Surfaces fumées par fumier transporté (FO)	<input type="checkbox"/> VR (groupe 2)
<input type="checkbox"/> Surfaces laissée en jachère courte (JC)	<input type="checkbox"/> VRR (groupe 3)
<input type="checkbox"/> Surfaces laissées en jachère longue (JL)	<input type="checkbox"/> VG (groupe 4)
<input type="checkbox"/> Surfaces traitées à la fumure minérale (FM)	<input type="checkbox"/> CP (groupe 5)
<input type="checkbox"/> Surfaces où le premier sarclage n'a pu être réalisé (S)	<input type="checkbox"/> CR (groupe 6)
	<input type="checkbox"/> CT (groupe 7)

Modification des paramètres

Simulation

FIG. 4.1 – Lancement de la Simulation

- *RA*: Contient les valeurs des rendements moyens que nous avons entrées dans le modèle. Ces rendements moyens servent notamment à calculer la production par parcelle et totale pour chaque agriculteur, et permet le choix de la parcelle sur laquelle on fera du parcage.
- *Rsultats*: Contient les résultats de la simulation, c-à-d actuellement la surface fumée par parcage pour chacune des parcelles considérées.
- *P*: Feuille de calcul servant à la simulation du parcage. Il est possible de contrôler sur cette feuille de calcul tous les sous-calculs que le programme à dû réaliser pour obtenir la valeur finale de superficie parquée.
- *FO*: Feuille de calcul servant à la simulation du transport de fumier. Elle n'a pas encore été réalisée.
- *Source_input* et *LU95* sont deux tables permettant de récupérer les

VP | VR | VRR | VG | CP | CR | CT | parcelles / choix

Choix de la parcelle fumée :

Contraintes :

distance au puits : > m

distance au village : > m pour VG, en S12

Rendement attendu (RA) < kg / Ha.an

Score pour le choix des parcelle avec parcage réalisé par ses propres animaux (S11) : $S11 = NA_S11 * RA * (\text{input } 10000 + \text{distpuits}) * (\text{input } 5000 + \text{distvill (pour VG)})$

Score pour le choix des parcelle avec parcage réalisé par contrat de fumure (S12) : $S12 = NA_S12 * RA * (\text{input } 10000 + \text{distpuits}) * \text{input } 0.7$ ssi parcelle adjacente à un couloir de passage

Avec

NA_S11 un nombre aléatoire compris entre et

NA_S12 un nombre aléatoire compris entre et

FIG. 4.2 – *Changement des Paramètres de Parcage*

données initiales, en cas de fausse manœuvre avec la feuille de calcul *P*.

- *Trash* : est une feuille servant au tirage aléatoire des agriculteurs. Les données ne font que transiter par cette feuille.

4.3.3 Description de l'algorithme

Algorithmes généraux

L'algorithme de comptage du nombre de parcelles, du nombre d'agriculteurs et du nombre d'agriculteurs par groupe a été construit tout simplement par la création d'une boucle. Nous ne le détaillerons pas ici.

Un algorithme a été réalisé afin de tirer aléatoirement une proportion définie d'un groupe donné d'agriculteurs. Pour chaque groupe, il procède de la manière suivante :

1. remplissage d'une colonne de la feuille *Trash* avec un nombre allant de

- 1 à n , n étant le nombre total d'agriculteur
2. sur la colonne voisine, à chaque numéro est associé un nombre aléatoire (Rnd). Cette fonction renvoie une valeur aléatoire inférieure à 1 mais supérieure ou égale à zéro. Afin qu'après chaque lancement de programme, on ne tombe pas sur le même nombre en utilisant Rnd, on utilise la fonction RANDOMIZE qui initialise le générateur de nombres aléatoires de la fonction Rnd en lui donnant une nouvelle valeur initiale.
3. on reclasse les deux colonnes par ordre croissant de valeur du nombre aléatoire attribué
4. enfin, chaque agriculteur de la catégorie reçoit à son tour un nombre de la colonne avec les nombres de 1 à n reclassés aléatoirement.

Un nombre aléatoire ayant été attribué à chaque agriculteur, il est maintenant facile de choisir aléatoirement un certain nombre d'agriculteurs : par exemple, si 10 % des agriculteurs de la classe VP (contenant 90 ménages) sélectionnés au hasard réalisent des contrats de fumure, on prendra tous les agriculteurs ayant une valeur aléatoire associée inférieure ou égale à 9.)

L'algorithme de production par parcelle et par ménage calcule pour chaque parcelle la somme des produits "rendement moyen attendu à l'état E^* superficie de la parcelle se trouvent à l'état E ". Les superficies fumées dérivées de l'occupation du sol ont été réparties également entre les 4 états de champs fumés, soit CV1-4. Les superficies cultivées dérivées de l'occupation du sol ont été réparties également entre les 5 premiers états de champs cultivés, soit C1-5. Etant donné que nous n'avons pas encore attribué de valeur initiale pour les superficies fumées par fumier transporté et les superficies traitées à l'engrais minéral, nous n'avons pas tenu compte de ces états lors de ce calcul. Cela ne devrait pas modifier trop significativement les résultats.

Il additionne ensuite la production de chacune des parcelles gérées par le ménage pour obtenir la production totale de mil produite par le ménage.

Nous obtenons de cette manière 118 ménages avec un rapport production totale / besoin nutritionnels du ménage (en équivalent consommateur adulte) inférieur à 150 kg par équivalent consommateur adulte et 53 ménages avec ce même rapport supérieur à 800 kg par équivalent consommateur adulte (sur un total de 363 ménages). Un agriculteur calcule ses besoins en prévoyant de pouvoir remplir les besoins de son ménage sur 2 ans (P. Hiernaux, ILRI, communication personnelle). Les besoins annuels en mil par adulte étant de 250 kg [AGRHIMET, 2000], un agriculteur devrait produire environ 500 kg. On pourrait se demander si les rendements moyens attribués étaient mal

évalués. En examinant cela de près, il semble en effet qu'un grand nombre de ménages possède une très grande majorité de sa superficie gérée en zone de jachère. Par ailleurs, si les rendements moyens étaient sous-évalués, nous ne trouverions pas autant d'agriculteurs cultivant de si grandes quantités de mil par rapport à leurs besoins, ce qui est quasiment inconcevable pour la région étudiée.

Trouvant ces résultats peu satisfaisants, nous avons refait cette manœuvre en utilisant les données d'occupation du sol 1994 et 1995. Il s'est avéré que c'est l'occupation du sol 1995 qui donne les moins mauvais résultats : nous obtenons 103 ménages avec un rapport Production total/ besoins nutritionnels du ménage (en équivalent consommateur adulte) inférieurs à 150 kg par équivalent consommateur adulte (76 inférieur à 100 et 26 inférieur à 50) et 31 ménages avec ce même rapport supérieur à 800 kg par équivalent consommateur adulte (18 supérieur à 1000 et 5 supérieur à 1500).

L'algorithme de parcage.

1. Calcul de la superficie totale potentiellement parcable

Dans notre modèle conceptuel, nous avons défini qu'un champ pouvait être parqué soit avec ses propres animaux, soit par contrat de fumure. Les agriculteurs de type VP, VR, VRR ne possèdent que trop peu d'animaux pour faire du parcage : les surfaces parquées ne seront fonction pour eux de la possibilité conclure des contrats de fumure. Les agro-pastoralistes de type CP, CR et CT ont des animaux, ils pourront donc parquer leurs champs avec ceux-ci. Ceux-ci ne réalisent pas de contrat de fumure. Les agriculteurs de type VG (Djermas possédant des animaux) pourront fumer leurs champs avec leurs propres animaux, ou par contrat de fumure.

Pour les agriculteurs Djermas, la réalisation de contrats de fumure dépendra donc de leur revenu (coût du contrat) et d'un facteur aléatoire (possibilité de contrat de fumure, qu'un éleveur itinérant passe par son village ou par son champ, et autres facteurs que nous ne pouvons pas déterminer qui font que tel agriculteur, dans cette situation, conclue un contrat de fumure, à l'opposé d'un autre, qui dans les mêmes conditions apparentes, ne le réalise pas). Nous avons donc utilisé les équations et paramètres suivants :

Le tirage aléatoire se fait donc grâce à l'algorithme décrit plus haut.

Les agriculteurs du type VG font aussi du parcage avec leurs propres animaux. Il arrive néanmoins très souvent qu'ils confient ceux-ci à un Peul quand le cheptel est très petit. Nous considérerons qu'en dessous de 7 UBT

VP:	tire aléatoirement	5% des exploitations pour lesquelles pour les pour les 95 % restants	P=3 ha P=0
VR:	tire aléatoirement	5% des exploitations pour lesquelles 10% pour lesquelles pour les pour les 85 % restants	P=6 ha P=3 ha P=0
VRR:	tire aléatoirement	10% des exploitations pour lesquelles 10% pour lesquelles pour les pour les 80 % restants	P=6 ha P=3 ha P=0
VG:	tire aléatoirement	5% des exploitations pour lesquelles 10% pour lesquelles pour les pour les 85 % restants	P=6 ha P=3 ha P=0

possédés, il confie son bétail aux Peuls, et donc ne réalise pas de parcage. Au dessus de ce seuil, il arrive encore, mais c'est plus rare que pour des besoins de main d'œuvre et par facilité, ils confient leurs animaux aux Peuls. Nous considérerons qu'il s'agit d'environ 20% de ceux-ci.

Nous considérerons que la surface totale parquée est directement proportionnelle à la taille du cheptel géré, avec cependant 25 % de marge prise aléatoirement sur ce produit. Nous n'avons pas de variable sur laquelle nous pouvons compter pour obtenir la taille du cheptel géré. Nous utiliserons donc la variable $LVTLU$, représentant le cheptel possédé en UBT. Ce qui nous donne, finalement:

Si $LVTLU \leq 7$: $P = 0$
Si $LVTLU > 7$: Tirer aléatoirement 80 % des exploitations pour lesquelles $P = 0.7 * LVTLU * NA(1.25 - 0.75)$; Pour les 20 % restants: $P = 0$

où $NA(1.25 - 0.75)$ représente un Nombre Aléatoire compris entre 0,75 et 1,25.

Pour les agriculteurs Peul, nous avons vu que ceux-ci envoient leurs animaux en transhumance, surtout quand le cheptel est de taille importante. Ils sont traditionnellement éleveurs, et même si leur cheptel est très retreint, ils ne le confieraient pas à un autre agriculteur. La superficie parquée sera donc directement proportionnelle au cheptel, jusqu'à un certain seuil que nous fixons à 15 UBT. Au-delà de ce seuil, la superficie parquée ne sera plus

directement proportionnelle mais tendra vers une constante (Figure 4.3).

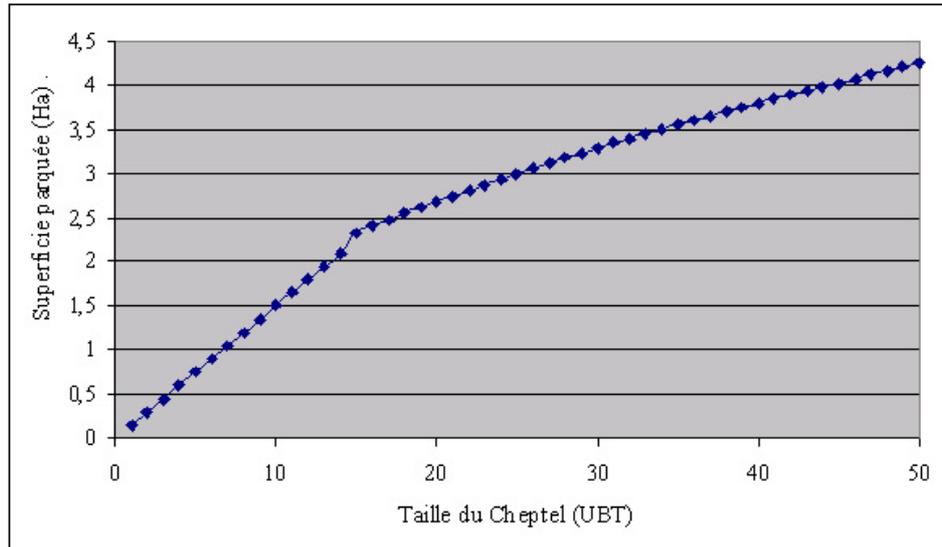


FIG. 4.3 – *Superficie parquée en fonction de la taille du cheptel pour un agro-pastoraliste de type CP*

Nous considérons aussi que la probabilité que les animaux soient gardés sur les parcelles en cas de grand troupeau est plus grande pour CT que pour CP que pour CR.

Nous avons donc posé les paramètres et équations suivants pour le calcul du parcage :

CP : si $LVTLU \leq 15$:	$P = 0.15 * LVTLU * NA(1.25 - 0.75)$
si $LVTLU > 15$:	$P = 0.6 * LVTLU^{1/2} * NA(1.5 - 0.5)$
CR : si $LVTLU \leq 15$:	$P = 0.15 * LVTLU * NA(1.25 - 0.75)$
si $LVTLU > 15$:	$P = 0.6 * LVTLU^{1/2} * NA(1.3 - 0.3)$
CT : si $LVTLU \leq 15$:	$P = 0.15 * LVTLU * NA(1.25 - 0.75)$
si $LVTLU > 15$:	$P = 0.6 * LVTLU^{1/2} * NA(1.7 - 0.7)$

2. Détermination de la parcelle fumée

Comme nous l'avons établi dans notre modèle conceptuel, tous les champs ne conviennent pas pour parquer les animaux : on fumera en priorité les champs à faible rendement et situés à proximité d'un puits pour abreuver ses animaux ; de plus pour les Djermas qui possèdent des animaux, ces derniers sont gardés à proximité du village. Par ailleurs, les contrats de fumure se

font plus fréquemment sur les champs situés près d'un couloir de passage des animaux.

L'algorithme attribue un score à chacune des parcelles répondant aux contraintes de distance au puits, de rendement et de distance au village suivantes :

$$\begin{aligned} DistPuits &< 2000\text{m} \\ RA &< 400 \text{ kg/ha} \\ DistVill &< 750\text{m pour VG} \end{aligned}$$

Avec RA = rendement attendu par l'agriculteur l'année suivante. On considère que l'agriculteur estime correctement ce rendement. C'est la parcelle de l'agriculteur possédant le score le plus faible qui est choisie, sur laquelle le parcage est réalisé (S11 pour le parcage de ses animaux, S12 pour les parcelles fumée par contrat de fumure).

Score (S11) =

$$NA(0,7 - 1) * RA * (10000 + DistPuits) * (5000 + DistVill \text{ pour VG})$$

Score (S12) =

$$NA(0,7 - 1) * RA(*0,7 \text{ si PARCOURS} = 1) * (10000 + DistPuits)$$

4.4 Synthèse des données utilisées et conclusion

Dans les deux première parties de ce chapitre, nous avons constitué un jeu de donnée utilisable pour notre modèle. A chaque parcelle est lié une série d'informations sur elle-même et sur son propriétaire. Voici donc un récapitulatif des éléments repris dans la table d'attribut destinée à être simulée:

Les données nécessaires à la mise en œuvre du modèle conceptuel:

ANES	nombre d'âne possédé par le ménage.
APTITUDE	Aptitude culturale du sol de la parcelle : peut prendre les valeurs 2, 3, 4, 5 pour sol marginal, pauvre, moyen et riche respectivement.
AREA_ HA	Surface totale gérée par le ménage.
C	surface (m^2) de la parcelle cultivée en 1995.
CART	nombre de charrettes possédées par le ménage.
CHEPT	rapport LVTLU / SDIETG
CODU	nom de code de l'agriculteur
CV	surface (m^2) de la parcelle cultivée et fumée en 1995.
CV(+VL)	surface (m^2) de la parcelle que nous considérerons comme cultivée et fumée en 1995 (voir partie "traitement SIG")
DISTPUIS	Distance (en mètres) entre la parcelle et le puits le plus proche
DISTVILL	Distance (en mètres) entre la parcelle et le village le plus proche
ETHN	Ethnie du chef de ménage, P pour Peulh, D pour Djerma.
F	surface (m^2) de la parcelle en jachère longue en 1995
F(+U)	surface (m^2) de la parcelle que nous considérerons comme en jachère longue en 1995 (voir partie " traitement SIG ")
GRPBEN	Typologie des ménages réalisés : peut prendre les valeurs 1, 2,3, 4, 5,6 et 7 pour le groupe VP, VR, VRR, VG, CP, CR, CT respectivement. (voir partie " Typologie et choix des données ")
HABIT	Type d'habitat du ménage : V : habite dans un village, C : habite dans un campement.
J	surface (m^2) de la parcelle en jachère courte en 1995, en m^2
LVTLU	Cheptel total possédé (UBT) par le ménage

PARCOURS	Proximité d'un couloir de passage : si la parcelle se trouve à moins de 50 mètres d'un couloir de passage ont la cote 1 ; sinon, elles reçoivent la cote 0.
SDIETG	besoins nutritionnels du ménage en équivalent consommateur adulte ; il a été calculé de la manière suivante : age ≤ 1 an : consommation = 0,3 ; 1-5 ans : consommation = 0,5 ; 5-15 ans : consommation = 0,9 (garçon) ou 0,8 (fille) ; 15-60 : consommation = 1 (homme) ou 0,9 (femme) ; âge > 60ans : consommation = 0,8 (homme) ou 0,7 (femme)
SURFACE	Superficie (hectare) de la parcelle
SWORKG	indice de force de travail disponible du ménage, ne prenant pas en considération les travaux domestiques : âge < 9 ans : travail = 0 ; 9-15 ans : travail = 0,5 (garçon) ou 0,4 (fille) ; 15-60 : travail = 1 (homme) ou 0,8 (femme) ; âge > 60ans : travail = 0,8 (homme) ou 0,6 (femme)
TERRE	rapport AREA_HA / SDIETG
U	surface (m^2) de la parcelle en terres impropres à la culture en 1995
VL	surface (m^2) de la parcelle occupé par le village en 1995

Pour information et pour permettre éventuellement le choix d'autres variables lors de la manipulation du modèle, nous avons laissé dans la table les données suivantes :

BOEU	Nombre de boeufs possédés par le ménage
CAME	Nombre de chameaux possédés par le ménage
CHEV	Nombre de chevaux possédés par le ménage
FTRAC	Force de traction possédée par le ménage (1*boeuf, 1*chev, 1.2*came, 0.5*anes)
GRP_JP	Classification "ILRI 20002" réalisée par Juan Busqué et Pierre Hiernaux (voir partie " Typologie et choix des données ") NAG1, NAG2, NAG3, NAG4, NAG5 : nombre d'individu dans le ménage par tranche d'âge (NAG1 : <5 ans, NAG 2 : 5-15 ans, NAG 3 : 15-30 ans, NAG 4 : 30-60 ans, NAG 5 : => 60 ans)
NGEST	Nombre d'individu dans le ménage
NSEXF	Nombre d'individu de sexe féminin dans le ménage
NSEXM	Nombre d'individu de sexe masculin dans le ménage
UBTOT	Taille moyenne du cheptel géré sur une année, en UBT
UBTOTP	Taille moyenne du cheptel géré sur une année, en UBT
UBTOTX	Taille maximum du cheptel géré, en UBT
UBTOTXP	Taille maximum du cheptel possédé, en UBT
VILLPROCHE	nom du village le plus proche de la parcelles, dont la distance est donnée par distvill
ZERREUR	rapport $\frac{ Mgtunits-LCR }{(Mgtunits+LCR)/2}$

Dans la seconde partie de ce chapitre, une interface d'utilisation et les algorithmes généraux du modèle ont été créés. De plus, l'algorithme de simulation de la fertilisation des champs par parcage sur une année a été réalisé. Pour rendre cette simulation dynamique, et donc de pouvoir simuler le parcage sur plusieurs années, il sera nécessaire de construire les algorithmes relatifs aux autres pratiques étudiées (jachère, fumier transporté, ...), la réalisation d'une pratique de fertilisation sur un champ étant dépendante de la fertilisation réalisée sur celui-ci l'année précédente.

Par ailleurs, le langage utilisé, VB Excel, répond au besoin de la mise en oeuvre notre modèle conceptuel, en tout cas pour ce qui est de l'implémentation du parcage. Il semble que l'utilisation de ce langage soit adéquate pour la programmation des autres parties du modèle.

Chapitre 5

Analyse de sensibilité du modèle et discussion

L'analyse de sensibilité, ou la “conception de plans d'expérience”, peut intervenir à différents niveaux dans un travail de modélisation et de simulation. Cela peut être au niveau de la vérification du programme de simulation, au niveau de la validation du modèle ou encore lors de l'exploitation et de l'exploration de celui-ci. Dans ce travail, nous resterons au niveau de la vérification du programme de simulation : le modèle complet n'étant pas construit, il n'est pas possible de valider le modèle conceptuel ou encore d'explorer et exploiter le programme.

Nous commencerons, dans ce chapitre, par donner les résultats de simulation obtenus avec les paramètres initiaux entrés. Nous examinerons ensuite la sensibilité du modèle à la variation de différents paramètres.

5.1 Résultats

Le programme de simulation, dans son état actuel, est capable de simuler le parage réalisé par nos 363 agriculteurs sur une année. Les résultats techniques sont satisfaisants : le système fonctionne correctement, les délais d'attente sont acceptables (1 pas de temps / 45 sec, avec un ordinateur cadencé à 1.4GHz et 512 Mo de RAM). La visualisation des résultats peut se faire après la simulation sans aucun problème (Annexe 3). Lors de nos tests, nous avons simulé une année de culture 300 fois afin de tester différents types de paramétrages de notre modèle. Les valeurs moyennes obtenues

étaient stables à partir de 20 simulations d'une même configuration. Sur 20 simulations, nous obtenons une superficie totale parcagée moyenne pour l'ensemble des parcelles simulées de 281,5 hectares (St. Dev. : 2.48).

La figure 5.1 donne la répartition de cette surface par terroir. Les terroirs de Tigo-Tegui et de Kodey se partagent la grande majorité de la superficie parcagée. La figure 5.2 compare le rapport superficie parcagée totale par nombre de ménage par terroir. Nous voyons que la surface parcagée par ménage est la plus importante à Kodey, avec un peu plus de 1 hectare par ménage. Le terroir de Banizoumbou obtient le rapport le plus faible, avec un peu moins de la moitié de ce qu'obtiennent les ménages du terroir de Kodey, soit 0.48 hectares par ménage. Ces résultats s'avèrent raisonnables, étant donné la proportion importante d'agro-pastoraliste Peuls sur le terroir de Kodey, et la faible importance de ceux-ci sur le terroir de Banizoumbou (Fig. 5.3).

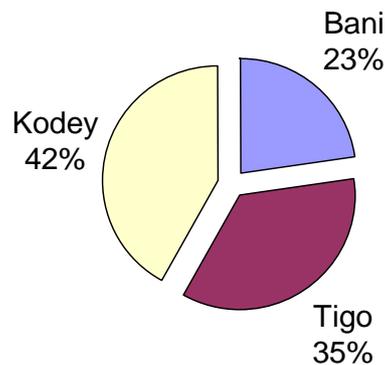
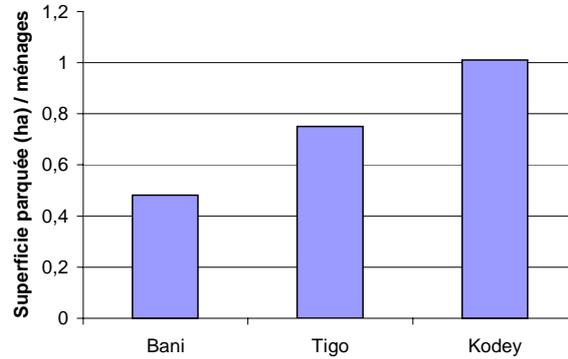
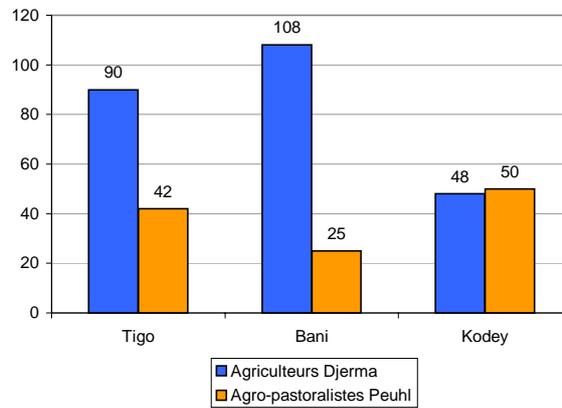


FIG. 5.1 – Répartition du parcage par terroir

5.2 Analyse de sensibilité

Dans cette partie, nous analysons la sensibilité du modèle programmé aux variations de différents paramètres pris un par un. D'autres méthodes de plan d'expérience plus complexes existent, mais ne se justifient pas ici. Pour de plus amples informations à ce sujet, le lecteur intéressé pourra notamment se référer à ???. La réalisation de ces plans d'expérience en envisageant de nombreuses combinaisons de paramètres permet notamment de faire émerger des faits extrêmement rares (peu probables), aberrants ou non (test de vérification).

FIG. 5.2 – *Superficie parquée par ménage*FIG. 5.3 – *Répartition des ethnies par terroir*

Nous examinerons la valeur moyenne de la surface parquée obtenue pour les différentes expériences. La simulation est toujours réalisée 20 fois pour avoir un bon estimateur de la moyenne des résultats pour la configuration étudiée.

5.2.1 Paramètres liés aux contraintes

La distance au puits

Les animaux devant être abreuvés quotidiennement, nous avons posé que les parcelles situées à plus de 2000 mètres d'un puits ne pouvaient pas être fumées par parcage. La simulation a été effectuée en plaçant cette contrainte

à 500m, 1000m, 2500m et 5000m (figure 5.4). Nous pouvons observer que la surface parquée tend vers une valeur limite de 300 hectares environ lorsque cette contrainte augmente, ce qui est normal étant donné que la quasi totalité des parcelles est située à moins de 2500 mètres du puits le plus proche. Si on resserr la contrainte, le nombre de champs parcables diminue, et la superficie totale parquée tend vers 0.

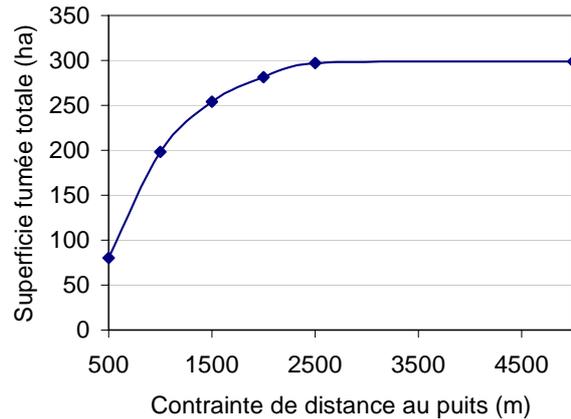


FIG. 5.4 – Influence de la modification de la distance au puits sur la superficie fumée

Contraintes de rendement

Nous avons pris comme hypothèse que si l'agriculteur prévoyait un rendement supérieur à 400 kg/ha sur son champ, il ne prendrait pas la peine de fumer celui-ci. La figure 5.5 montre comment varient les surfaces totales fumées en prenant pour cette contrainte les valeurs de 200, 300, 500 et 800 kg/ha. Dans notre situation, nous observons que fixer cette contrainte ou ne pas en tenir compte revient au même pour le calcul de la superficie totale parquée. Le modèle n'étant pas complet, nous ne pouvons cependant pas dire à ce niveau que cette contrainte est inutile.

Remarquons néanmoins que si on resserr cette contrainte, la superficie parquée chute mais de manière peu accentuée, ce qui est conforme à ce qu'on peut attendre de notre modèle.

Nous pourrions aussi nous demander ce qui se passe si nous changeons les valeurs établies pour les rendements attendus par état de la parcelle (tableau 3.4).

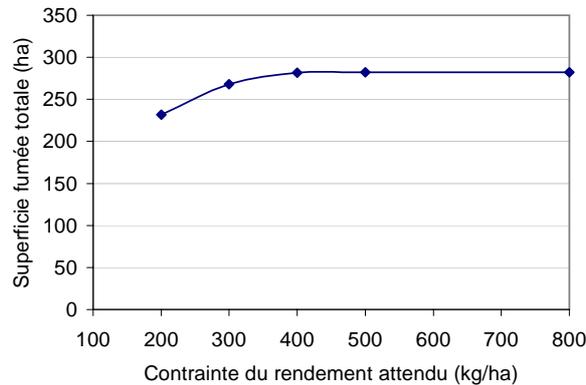


FIG. 5.5 – Influence de la modification du rendement attendu sur la superficie fumée

Une nouvelle série de rendements beaucoup plus faible a été rentrée. Nous obtenons alors une superficie totale fumée de 279 hectares, ce qui, comme attendu, est sensiblement égal au scénario initial.

Si nous multiplions tous les rendements initiaux par un facteur 1.5, nous observons une diminution faible mais significative de la superficie totale fumée (269 hectares). Nous avons alors cherché à savoir si un type de sol particulier était responsable de cette chute en multipliant indépendamment chacune des colonnes de rendements associées à une aptitude de sol particulière (ou un groupe d'aptitudes pour la deuxième colonne). Suite à cette manipulation, nous obtenons une très faible diminution de la superficie totale fumée avec les sols riches et marginaux (275 hectares et 279 hectares respectivement), et une diminution plus significative avec la colonne des sols moyens et pauvres (268 hectares), ce qui est normal étant donné que c'est le type de sol le plus représenté.

Autres paramètres

Nous avons aussi fait varier la distance maximale du village au champ. Nous n'avons pas trouvé de variation significative des résultats dans ce cas précis, cette contrainte n'affectant qu'un très faible échantillon (24 agriculteurs concernés). Nous avons aussi modifié les paramètres définissant les scores S11 et S12. Il n'y a eu dans ce cas une fois encore, aucun changement significatif, ce qui est heureux étant donné que ceux-ci ne sont pas des contraintes mais servent à faire un choix parmi les parcelles potentiellement

parcable de l'agriculteur.

5.2.2 Paramètres liés au calcul de la superficie totale fumée par agriculteurs

Proportion d'agriculteur touché par les contrats de fumure

Si on diminue de moitié tous les facteurs, on obtient une surface parcagée totale de 223 ha. Si par contre on double ces mêmes paramètres, on obtient une surface parcagée totale de 351 ha. Il y a deux conclusions à tirer suite à l'analyse de ces chiffres : Une fois de plus, ces résultats sont cohérents. Le modèle semble répondre de manière adéquate aux modifications de ce paramètre. La surface parcagée totale est très sensible aux variations de ce facteur. Il conviendrait donc d'effectuer des études plus approfondies afin de situer l'occurrence précise des contrats de fumure au sein du terroir étudié si cette sensibilité restait aussi marquée lors de la phase de validation du modèle complet.

Coefficient d'intensité du parcage pour les agropastoralistes Peuls

Nous avons posé comme équation pour le calcul de la surface totale parcagée par agriculteur une équation du type $P = I * LVTLU^x * NA(a - b)$ avec I , coefficient d'intensité de la pratique, NA nombre aléatoire péché entre a et b , et x un facteur de proportionnalité (voir le chapitre mise en œuvre du modèle, partie méthode et outils)

Si on divise tous les coefficients d'intensité I par un facteur 2, on obtient une surface parcagée totale de 203 ha. Si on multiplie ces mêmes coefficients d'un facteur 2, on obtient alors une surface parcagée totale de 381 ha. Le modèle est donc très sensible aux variations de ce facteur. Le parcage étant essentiellement réalisé par des agropastoralistes Peuls sur le périmètre étudié, ces résultats sont cohérents.

5.3 Conclusion et perspectives

Le tableau 5.3 synthétise les résultats obtenus, de manière qualitative, par l'analyse de sensibilité. Les résultats des plans d'expérience pour la partie du modèle traitant le calcul de la superficie parcagée montrent que le programme

tourne correctement.

TAB. 5.1 – *Synthèse des résultats obtenus*

Paramètres	Peu Sensible	Sensible	Très Sensible
Contrainte de distance au puits			+
Contrainte de distance au village (VG)	+		
Contrainte de rendements		+	
Rendements par état /table entière		+	
Rendements par état /col. d'aptitude	+		
Intensité - Contrats de fumure			+
Intensité - CP, CR, CT			+

L'analyse de la sensibilité à la contrainte de la distance entre la parcelle et le puits le plus proche nous laisse supposer l'intérêt que présentera l'exploration du modèle par la réalisation de plan d'expérience. Pour expliquer cela, prenons comme hypothèse que les résultats obtenus par l'analyse de sensibilité dans ce chapitre se situent dans une phase d'exploration du modèle. Dans une telle situation, le modèle étant sensible à ce facteur, nous pourrions essayer d'obtenir des informations plus précises sur la distance maximale qu'un éleveur envisage de réaliser avec son troupeau pour l'abreuver quotidiennement. Si, après une enquête préliminaire, il s'avérait que cette distance se situe aux alentours des 3000 m, nous pourrions conclure que si le modèle devrait être appliqué à un terroir présentant des caractéristiques assez semblables, il ne serait à ce moment plus nécessaire de se préoccuper de ce paramètre, ce qui simplifierait l'utilisation et l'interprétation du modèle. Si au contraire, l'enquête préliminaire situait cette contrainte aux environs de 1000 mètres, ce paramètre présenterait alors une importance capitale. Une étude plus précise serait alors nécessaire pour préciser la valeur exacte de cette contrainte. Dans un second temps, on pourrait réaliser l'étude de scénario de développement promouvant la construction de puits sur le terroir, et d'en évaluer l'impact en terme de gestion de la fertilité des sols, par l'augmentation de superficie parcourue qui en résulterait. Par l'établissement de liens entre les entités du système étudié, le modèle permettrait donc de révéler des propriétés non triviales de celui-ci et pourrait s'avérer être un outil remarquable à intégrer dans un système expert.

Conclusion et Perspectives

L'exploitation de systèmes multi-agents couplée à des simulations à événements discrets ouvre une multitude de perspectives pour évaluer les interactions entre divers systèmes de production dans différents contextes socio-économiques.

Au cours de ce travail, nous avons examiné les différents problèmes que pose une approche système dans le cadre de l'étude de la gestion de la fertilité des sols en milieu sahélien. Ceci nous a donné l'occasion de confronter des données provenant de différentes sources et collectées par différents procédés ; ce qui nous a conduit à observer bon nombre de contradictions. Nous avons ainsi pu faire ressortir l'importance du choix des procédés d'enquête et de la vérification de la cohérence des sources. Les enquêtes effectuées sur place nous ont permis de prendre conscience d'une multitude de facteurs non triviaux influençant les pratiques des agriculteurs ; facteurs dont eux-même n'ont souvent pas conscience tellement ils réagissent de manière traditionnelle ou par habitude. C'est l'étude de ces différents comportements qui a constitué la base du modèle que nous avons développé.

Tout cela nous a permis de confirmer que la compréhension d'un système de culture en vue de sa modélisation et de sa simulation doit nécessairement passer par des études intégrées associant sur un même terrain agronomes, pédologues, hydrologues, sociologues et économistes.

Nous avons par ailleurs posé de premiers jalons dans la modélisation des pratiques de gestion de la fertilité, et implémenté un modèle restreint à une configuration spatiale statique, simulé sur une année, et s'intéressant au parcage des animaux sur les différentes parcelles. Les simulations effectuées ont permis de dégager l'importance relative de certains facteurs par rapport à d'autres, ce qui permettrait de fixer des priorités dans la mise en place de plans de développement si ces différences se maintenaient dans une phase de test d'un modèle plus complet. Par ailleurs, le bon fonctionnement de notre

simulation de petite taille encourage à la simulation de modèles plus détaillés, prenant en compte un plus large éventail de facteurs comme l'influence du comportement d'un agriculteur sur ses voisins au fil des années, . . . À cette fin, notre code Visual Basic pour Excel pourrait facilement être transposé au Visual Basic d'ArcGIS qui offre la possibilité d'effectuer des analyses spatiales, ce qui permettrait de recalculer aisément l'évolution temporelle des paramètres liés à chaque parcelle.

Il pourrait ainsi être possible de tester la réactivité du système étudié face à un large éventail de sollicitations : pression démographique changeante, modification des infrastructures (ajout de points d'eau, déplacement des couloirs de passage des animaux, . . .), sécheresse prolongée, campagnes de vulgarisation, . . .

Les informations issues d'un tel modèle, intégrées à un système d'aide à la décision, devraient permettre de guider efficacement les différentes politiques de développement.

Bibliographie

- [Abdoulaye & Lowenberg-DeBoer, 2000] Abdoulaye, T., & Lowenberg-DeBoer, J. 2000. Intensification of Sahelian farming systems: evidence from Niger. *Agricultural Systems*, 67–81.
- [AGRIMET, 2000] AGRIMET, Centre. 2000. *Projet Alerte Précoce et Prévision des Productions agricoles (Ap3a) : Système de gestion des bases de données*. CILSS (Comité Inter-états pour la Lutte contre la Sécheresse au Sahel), Coopération Italienne et OMM (l'Organisation Météorologique Mondiale).
- [Amblard, 1999] Amblard, F. 1999. *Modèles multi-agents pour la décision collective*. M.Phil. thesis, Academie de Montpellier, Université Montpellier II. 78 pages.
- [Baidou-Forson, 1999] Baidou-Forson, J. 1999. Factors influencing adoption of land-enhancing technology in the Sahel: lessons from a case study in Niger. *Agricultural Economics*, 231–239.
- [Baidou-Forson & Renard, 1996] Baidou-Forson, J., & Renard, C. 1996. Comparing productivity of millet-based cropping systems in unstable environments of the Sahel: possibilities and challenges. *Agricultural Systems*, 85–95.
- [Batty & Jiang, 1999] Batty, M., & Jiang, B. 1999. Multi-agent simulation: new approaches to exploring space-time dynamics within GIS. *Annual meeting of GISRUUK (Geographical Information Systems Research - UK), University of Southampton*, April. 31 pages.
- [Booltinka *et al.*, 2001] Bootlinka, H.W.G., van Alphen, B.J., Batchelor, W.D., Pazc, J.O., Stoorvogel, J.J., & Vargas, R. 2001. Tools for optimizing management of spatially variable fields. *Agricultural Systems*, 445–476.
- [Bousquet *et al.*, 2000] Bousquet, F., Barreteau, O., Mullon, C., & Weber, J. 2000. Modélisation d'Accompagnement : Systèmes Multi-Agents et Gestion des Ressources Renouvelables. *Actes du Colloque international "Quel*

- environnement au 21ème siècle? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie".* Paris, France, 8 pages.
- [CNEDDN, 2000] CNEDDN. 2000. *Conseil National de l'Environnement pour un Développement Durable du Niger, Programme d'action national de lutte contre la désertification et de gestion des ressources naturelles.* Tech. rept. Rép. du Niger. 80 pages.
- [Coquillard & Hill, 1997] Coquillard, P., & Hill, D.R.C. 1997. *Modélisation et simulation d'écosystèmes: des modèles déterministes aux simulations à événements discrets.* 1ère edn. Recherche en écologie. Paris: Masson Editeur. 265 pages.
- [Cordellier & Didiot, 2000] Cordellier, S., & Didiot, B.(dir.). 2000. *L'état du monde 2000: annuaire économique et géopolitique mondial.* 19ème edn. Paris: Edition La Découverte et Syros. 675 pages.
- [de Rouw, 1997] de Rouw, A. 1997. Gestion de la fertilité des sols pour la culture du mil au Niger. *Actes de l'atelier "Jachères et maintien de la fertilité"*, 77–87.
- [de Rouw, 1998] de Rouw, A. 1998. Gestion de la fertilité du sol sur un terroir sahélien. Fumure animale, matière organique et encroûtement superficiel du sol dans les systèmes de culture de mil, étude au Niger. *Agriculture et Développement*, 63–70.
- [Gandah, 1999] Gandah, M. 1999. *Spatial variability and farmer resource allocation in millet production in Niger.* Ph.D. thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. 115 pages.
- [Gérard, 2002] Gérard, B. 2002. *In situ evaluation of hill placed application of mineral fertilizer in South-Western Niger. An ICRISAT, ILRI and FAO Projet Intrants collaborative research.* Tech. rept. 8 pages.
- [Gérard *et al.*, 2002] Gérard, B., Stuber, E., Hiernaux, P., Yamoah, C., & Marchal, D. 2002. *La gestion de la fertilité des sols et réduction des risques face aux fluctuations climatiques.* Présentation pour un séminaire Agrhimet.
- [Hartkamp *et al.*, 1999] Hartkamp, D., White, J.W., & Hoogenboom, G. 1999. Interfacing Geographic Information Systems with Agronomic Modeling: A Review. *Agronomy journal*, **91**, 761–772.
- [Herve *et al.*, 2002] Herve, D., Genin, D., & Migueis, J. 2002. A modelling approach for analysis of agropastoral activity at the one-farm level. *Agricultural Systems*, 187–206.
- [Hiernaux, 2002] Hiernaux, P. 2002. *The soils in villages lands in western Niger, opportunities and constraints for rural development.* 24pp, en cours de publication.

- [Hiernaux & Gérard, 1999] Hiernaux, P., & Gérard, B. 1999. The influence of vegetation pattern on the productivity, diversity, and stability of vegetation : The case of ' brousse tigrée' in the Sahel. *Acta Oecologica*, **3**(20), 147–158.
- [Hoepffner *et al.*, 1992] Hoepffner, M., Lebel, T., & Monteny, B. 1992. *Experiment plan for Hapex-Sahel*. Paris: ORSTOM. 177 pages.
- [ILRI & ICRISAT, 2002] ILRI, & ICRISAT. 2002. *Base de donnée ILRI et ICRISAT - Niamey*. Tech. rept. ILRI - ICRISAT Niamey.
- [Jennings *et al.*, 1998] Jennings, N. R., Wooldridge, M., & K., K. Sycara. 1998. A roadmap of agent research and development. *International Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, **1**(1), 7– 38.
- [Kanté, 2001] Kanté, S. 2001. *Gestion de la fertilité des sols par classe d'exploitation au Mali-Sud*. Ph.D. thesis, Wageningen University. 240 pages.
- [Lambin & Rounsevell, 2002] Lambin, E., & Rounsevell, M. 2002. *SIG : Course note 9 -GEOG2151- : GIS Modelling*. 3 pages.
- [Monsef, 1996] Monsef, Youssef. 1996. *Modélisation et simulation des systèmes complexes*. 1ère edn. Paris: Lavoisier TEC & DOC. 277 pages.
- [Neef, 2001] Neef, I. 2001. Ethnic groups in Niger. *Soil fertility management in West African land use systems. Proceedings of a Regional Workshop, University of Hohenheim, ICRISAT, INRAN, Niamey, Niger*, 86–93.
- [Piroux *et al.*, 1997] Piroux, M., Buldgen, A., Steyaert, P., & Dieng, A. 1997. Intensification of farming in the Sahelian-Sudanese region. 1. Crop management sequence in a risk context, Biotechnologie. *Agronomie, Société et Environnement*, **1**(3), 172–182.
- [Poix & Michelin, 2000] Poix, C., & Michelin, Y. 2000. Simulation paysagère : un modèle multi-agents pour prendre en compte les relations sociales. *CyberGeo*, 102–112.
- [Powell *et al.*, 1996] Powell, J.M., Fernandez-Rivera, S., Hiernaux, P., & Turner, M.D. 1996. Nutrient cycling in integrated rangeland / cropland systems of the Sahel. *Agricultural Systems*, **2**(52), 143–170.
- [Rockström & de Rouw, 1997] Rockström, J., & de Rouw, A. 1997. Water, nutrients and slope position in on-farm pearl millet cultivation in the Sahel. *Plant and Soil*, 311–327.
- [Rovere, 2001] Rovere, R. La. 2001. *Livestock roles and agro-environmental sustainability of Sahelian Niger mixed cro-livestock systems under intensification*. Ph.D. thesis, Bologna University, Animal Production Department, Bologna, Italy. 198 pages.
- [Schlecht *et al.*, 2002] Schlecht, E., Achard, F., Gandah, M., Hiernaux, P., & Turner, M. 2002 (april). *Trade-offs in soil fertility management in*

crop-livestock farming systems of western Niger. 23 pages, en cours de publication.

- [Stephene, 2002] Stephene, N. 2002. *A dynamic simulation model to understand land-use change processes in the Sudano-Sahelian region*. Ph.D. thesis, Université Catholique de Louvain, unité de géographie. 131 pages.
- [Stoorvogel & Antle, 2001] Stoorvogel, J.J., & Antle, J.M. 2001. Regional land use analysis : the development of operational tools. *Agricultural Systems*, 623–640.
- [Thornton & Herrero, 2001] Thornton, P.K., & Herrero, M. 2001. Integrated crop-livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment. *Agricultural Systems*, **70**, 581–602.