

UNIVERSITE DE LIEGE

Faculté des Sciences

Département des Sciences et Gestion de l'Environnement



Modélisation spatiale des flux organiques et minéraux assurant la productivité durable des systèmes culture-élevage dans le sahel nigérien

Thèse présentée par
Bakary DJABY
en vue de l'obtention du grade de
Docteur en Sciences

Année académique 2009-2010

Composition du jury :

Pr. Yves CORNET (Université de Liège, BELGIQUE)	: Président
Pr. Charles BIELDERS (Université Catholique de Louvain, BELGIQUE)	: Membre
Dr. Ir. Bruno GERARD (CGIAR, ILRI, ETHIOPIE)	: Membre
Dr. Pierre OZER (Université de Liège, BELGIQUE)	: Membre
Dr. Ir. Pierre HIERNAUX (CESBIO, FRANCE)	: Co promoteur
Dr. Ir. Bernard TYCHON (Université de Liège, BELGIQUE)	: Promoteur

AOUT 2010

UNIVERSITE DE LIEGE
Faculté des Sciences
Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

**Modélisation spatiale des flux
organiques et minéraux
assurant la productivité durable
des systèmes culture-élevage
dans le sahel nigérien**

Thèse présentée par
Bakary DJABY
en vue de l'obtention du grade de
Docteur en Sciences

Année académique 2009-2010

A ma grand-mère feu Mariam DAO

A mon père feu Alfamoë DIAW

A ma mère Assétou BOLY

Remerciements

*"Le sentier est unique pour tous,
les moyens d'atteindre le but
varient avec chaque voyageur"
Proverbe tibétain*

Ce proverbe tibétain prend tout son sens quand le travail de thèse vous soumet à des choix difficiles dans la vie, tant au niveau social que professionnel, des remises en cause, mais ce qui compte, c'est l'état d'esprit et la motivation nécessaire, et l'essentiel, c'est d'avoir des proches de son côté, des encadreurs, des amis, de la famille sur qui on peut compter pour suivre son chantier et garder le cap.

En premier lieu, je tiens à remercier Dr Bernard TYCHON, promoteur de cette thèse pour la confiance qu'il m'a accordé depuis notre première rencontre à Niamey, son appui scientifique permanent tout au long de ce travail, son soutien constant et une disponibilité jamais démentie. Il m'a fait bénéficier de sa grande expérience en modélisation et dans les questions relatives aux bilans des systèmes. Dans les moments difficiles, il m'a toujours soutenu et tenu la main pour arriver à la fin de ce projet.

Je suis particulièrement reconnaissant à Dr Pierre HIERNAUX, co-promoteur de cette thèse qui n'a cessé de me soutenir dans ce projet et qui a mis à ma disposition cet important travail réalisé à l'ILRI–Niamey. Grâce à sa disponibilité, ses critiques et orientations scientifiques, ses encouragements au cours de cette recherche, j'ai pu trouver la force nécessaire pour poursuivre cette recherche passionnante.

Je remercie Pr Charles BIELDERS d'avoir accepté d'être dans mon comité de thèse, de me guider dès les premières tenues du comité de thèse pour recentrer notre travail, d'avoir consacré du temps à la lecture de ma dissertation et de m'avoir prodigué les conseils et avis scientifiques nécessaires pour améliorer cette recherche.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et mon profond respect à Pr Yves CORNET, pour avoir accepté de présider mon jury et le temps consacré à la lecture de cette dissertation.

Je remercie Dr Bruno GÉRARD d'avoir accepté d'être membre du Jury. Toute ma reconnaissance pour les encouragements tout au long de cette recherche depuis son démarrage au Niger, le temps consacré à la lecture de cette dissertation, les conseils scientifiques et tout le plaisir que j'ai eu dans nos collaborations à travers le projet DGCD et le projet changement climatique.

A Dr Pierre OZER, je tiens à exprimer ma reconnaissance d'avoir accepté d'être dans mon jury de thèse. Nos échanges sur mon travail et sur les multiples sujets brûlants du Sahel lors de mon séjour en Belgique, ainsi que les corrections apportées à mon travail ont été des moments précieux et m'ont permis de bien avancer.

Merci à toute notre équipe de recherche du Département des Sciences et Gestion de l'Environnement du Campus d'Arlon, que nous appelons l'équipe "BT": Abdel MAHTOUR, Louis AMANI, Antoine DENIS, Farid TRAORÉ, Hamid MAHYOU, Joost WELLENS, Djenèba MANÉ, Dr. Moussa EL JARROUDI, Dr Christophe MACKELS pour l'ambiance studieuse et amicale du bâtiment 140, de nuit comme de jour, dans les champs, autour d'un café ou d'un problème à résoudre, les échanges scientifiques et les discussions sur la vie quotidienne. Tout cela a contribué à me rendre heureux et m'a donné la force nécessaire quand le doute s'installait. Merci aussi à l'ancienne équipe "BT" pour les moments inoubliables passés ensemble en Belgique, Dr. Souleymane TOURÉ, Mme Florence DE LONGUEVILLE, Dr. Yvon HOUNTONDJI, Bertrand MARTIN, Dr Riad BALAGHI, pour les

moments agréables passés ensemble sur le campus et dans la vie quotidienne. Merci aux étudiants africains du Campus en particulier Guy-Eric KOUAKOU, Trésor BAYA, Liady Nourou DINE, Abel GUEA, Thierry TANGOU TABOU, et Sitou LAWALI MANI pour leur disponibilité et leur chaleur africaine qui nous a donné du bonheur lors nos rencontres.

Je suis très reconnaissant à Mme Marie-Claire BILCOQ, et Mme Françoise POULLET BLÉROT pour leur précieux temps consacré à la relecture de ma dissertation et aux différentes corrections apportées.

Je suis reconnaissant à tout le personnel du campus d'Arlon, qui de près ou de loin m'a apporté leur soutien au cours de ces recherches. J'exprime ma reconnaissance à la commission de Coopération Universitaire au Développement (CUD) qui a soutenu financièrement ce projet de recherche à travers le Programme Interuniversitaire ciblé (PIC) de renforcement de la formation en agrométéorologie du Centre Régional Agrhymet. Je suis très reconnaissant à Mr Faustin GNOUMOU, Sagnia SANKUNG, Alhassane DIALLO (Ex-Directeur Général du Centre Régional Agrhymet) et au personnel du Centre Régional Agrhymet pour le soutien qu'ils m'ont apporté lors mon séjour au C.R.A au Niger.

Toute ma reconnaissance aux enquêteurs de l'ILRI et de l'ICRISAT et en particulier Khalilou ADAMOU sans lesquels aucune donnée ne sera dans nos ordinateurs pour les modèles. Leurs connaissances du terrain lors de nos visites dans le Fakara ont été un plus dans cette recherche.

A Issa GARBA, Issoufou BAOUA, Amina TIDJANOU, Bodé SAMBO, Thomas LECORGUILLIER Mamadou KONATÉ, tous étudiants que j'ai co-encadrés à Niamey, je suis reconnaissant pour le travail effectué avec moi sur le Fakara. Toute ma reconnaissance à Dr Mehdi SAQUALLI pour ces moments de bonheur au Niger et en Belgique. Merci à Kadidja SOSSEY pour les bons moments passés ensemble à Arlon. Ma reconnaissance à l'équipe italienne du projet AP3A et en particulier Tiziana De Filipis, Patrizio Vignaroli et Andrea Di Vecchia pour les meilleurs moments au Niger.

Ma reconnaissance à Dr Planchenault Dominique pour m'avoir initié très tôt en informatique et statistique appliquées aux productions animales et à Dr Michael Bertelsen pour m'avoir introduit au SIG.

Enfin, mais avant tout, mes pensées vont à mes amis et à ma famille, à qui je dois d'être celui que je suis, qui me supportent depuis toujours et dans toute circonstance et sans qui tout cela n'aurait ni la même saveur ni la même raison d'être. Mes remerciements à mon frère ami Jean François BLEROT, son épouse Françoise POULLET pour les moments agréables passés ensemble en Belgique et en Afrique. Merci à Bruno HERAULT et son épouse Fien pour les agréables moments en Belgique. Ma reconnaissance à Dr Mohamed BOUEZMARNI pour les bons moments passés ensemble à Arlon. Merci à Dr Sibiri ZOUNDI depuis les moments passés ensemble à l'Université de Ouagadougou, Dori, à l'INERA et en Europe, et le temps consacré à la lecture de ma dissertation. Merci à Alpha DIALLO et sa famille pour ces moments passés ensemble depuis notre tendre enfance. Merci à Alou SALL pour les bons moments passés au Niger et en Belgique. Ma reconnaissance à mes frères Idrissa DIABY et Moussa Namoko DIABY et leur famille qui ont été toujours présents à mes côtés. Ma reconnaissance au patriarche de la Famille Diaby, Fatogoma DIABY sans lequel nous ne serons pas ce que nous sommes aujourd'hui.

A mes deux enfants, Béchir et Assétou qui ont souffert de l'absence ou du silence de papa pendant ces périodes de recherche, papa vous embrasse affectueusement. Et surtout merci à toi, Amina Maïmouna, mon épouse, d'être à mes côtés chaque jour, dans nos pérégrinations africaines et européennes et de m'apporter la joie et le bonheur pour accomplir nos rêves, nos passions.

Résumé

L'agriculture et l'élevage occupent plus de 80% de la population des zones semi-arides de l'Afrique de l'Ouest. Ces populations en tirent l'essentiel de leur alimentation et de leurs revenus. L'un des problèmes de cette agriculture est la pauvreté des sols. Dans les pays comme le Niger où prédominent les agroécosystèmes culture- élevage, le rôle du bétail dans le recyclage de la matière organique et des éléments minéraux azote, phosphore et potassium peut constituer un atout pour l'augmentation de la production agricole et animale et assurer une sécurité alimentaire durable. Les bilans et flux de ces matières organiques et éléments minéraux ont été utilisés comme indicateurs d'état qui caractérisent la durabilité des systèmes de production.

Cette recherche porte sur l'évaluation de ces flux et bilans organiques et minéraux aux échelles de l'exploitation agricole et du terroir dans le sud-ouest du Niger et la mise au point d'un indicateur de risque d'épuisement de la fertilité des terres des exploitations. L'étude porte sur trois terroirs agropastoraux de cette région couvrant une superficie de 500 km² et sur un échantillon de 461 exploitations agropastorales. Les trois terroirs diffèrent essentiellement par leur pression agricole sur les terres, et par l'importance de l'élevage. Dans ces systèmes mixtes culture-élevage, la dualité de l'organisation spatiale qui les caractérise avec une gestion des cultures à l'échelle parcellaire centralisée à l'échelle de l'exploitation agricole et une gestion de l'élevage liée aux ressources pastorales communautaires de tout le terroir, fait que les modèles classiques de gestion sont confrontés à cette intégration d'échelles. Deux modèles ont été donc été utilisés pour l'évaluation des flux et bilans partiels de N, P, K à des échelles différentes, celle de l'exploitation agricole et celle des occupations de sol à l'échelle du terroir. NUTMON, un modèle existant, est utilisé dans la détermination des flux à l'échelle de l'exploitation et de ses composants. La modélisation spatiale des flux à l'aide des systèmes d'information géographique est opérée par articulation de NUTMON avec l'outil NUTPAST développé dans cette thèse. Cet outil développé avec les systèmes d'information géographique prend en compte la dynamique spatio-temporelle de la végétation et du cheptel pour l'évaluation de l'ingestion et de l'excrétion animale à l'échelle de l'ensemble des occupations au sein d'un terroir. Un indicateur de risque intégré d'épuisement de la fertilité des terres a été conçu par exploitation à partir de variables de viabilité biophysiques relatives à l'utilisation de l'espace communautaire et de variables socio-économiques en lien avec la propriété des terres et du cheptel.

Les bilans partiels obtenus à l'échelle du terroir montrent globalement un équilibre entre les flux de gestion agricoles et de l'élevage à l'échelle des terres des exploitations, avec des valeurs de N,P,K moyens respectifs de 0.3 ± 0.6 , 1.2 ± 0.2 , $0.9 \pm 0.5 \text{ kg.ha}^{-1}$. Ce bilan fait ressortir une grande disparité entre les exploitations qui montrent un bilan fortement positif chez les propriétaires de bétail et négatif chez les villageois ayant très peu de bétail. Les indicateurs de risque, basés sur les facteurs de pression sur les terres, les dotations en terres et bétail par habitant, laissent apparaître qu'en dépit d'une faible intensification par la fumure, la pression agricole sur les terres combinée à la faible dotation des exploitations agricoles en bétail est un facteur de risque d'épuisement relatif de la fertilité des sols très élevé à l'échelle des villages. Ce qui peut compromettre la durabilité de l'agriculture dans ces régions. Les problèmes d'utilisation des ressources communautaires au profit des seuls propriétaires de bétail posent le problème en termes de politique foncière dans ces agroécosystèmes. Avec la pression agricole actuelle, un autre mode d'intensification agricole est à rechercher avec une politique foncière d'accès aux ressources équitable.

Mots clés: Sahel, Niger, agriculture, élevage, fertilité des sols, bilan, azote, phosphore, potassium, SIG, modèle, risque

Summary

Agriculture (including crop and livestock) employs more than 80% of the work force in semi-arid regions of West Africa and provide most of the food requirements and incomes. In most developing countries, soil nutrient depletion is a major issue for soil degradation. Crop-livestock integration is an effective means by which nutrients can be rapidly recycled within and between farms. In West Niger, where mixed farming systems dominate, livestock's role in recycling organic matter and mineral nutrients (nitrogen, phosphorus and potassium) must be better assessed to increase production and ensure sustainable food security. Nutrient flows through forage uptake and excretion deposit by grazing livestock must be assessed at a wider scale than the farm. Organic matter and nutrients balance and fluxes were used as measurable criteria for sustainable agriculture production. This research focuses on these indicators assessments at farm, land use unit and village level.

This study was conducted in three agropastoral territories in the *Fakara* region of western Niger (Dantiandou District) that lies between the Niger River to the west and the Dallol Boboeye (Bossou), a fossil valley tributary of the Niger, to the east. The area has homogeneous geological characteristics and rainfall conditions, but land use history, human and animal population density and cropping intensity vary within the region. 461 farms were concerned.

In the mixed crop-livestock systems, the duality of the spatial organization, crop management at field level and livestock management with communal rangeland is a major issue for nutrients balance and fertility management modeling. Two models were then used to assess flows and nutrients balances. The NUTMON Toolbox developed by Dutch researchers is used to assess agricultural fluxes at farm parcels level. Spatial modeling was done with NUTPAST, a GIS tool developed in this thesis framework to assess livestock intake and excretion fluxes at land use scale. This tool takes into account the spatiotemporal patterns of vegetation as well as livestock seasonal variation. Statistical modeling was used to assess soil fertility depletion risk indicator based on farm agriculture viability variables and nutrients partial balance.

The results obtained show a less negative partial nutrients balance than in previous studies when the livestock spatio-temporal effect is taken into account. The results bring functional improvement and analytical evaluation of flows and partial nutrients balance calculation, while taking into account the functions of livestock in the organic matter recycling. The overall partial balance of N, P, and K are 0.3 ± 0.6 , 1.2 ± 0.2 , $0.9 \pm 0.5 \text{ kg.ha}^{-1}$. The review highlighted a wide disparity between farms which show a strongly positive balance among livestock owners and negative balance among Fakara small farmers with few land and livestock endowments. Owning animals allows some households to maintain soil fertility by capturing and mobilizing soil nutrients. Risk indicators, based on land pressure indicator at 3x3 km geographic grid level, livestock endowments and land per capita reveal that despite a slow intensification, the trend for a risk of relative depletion of soil fertility is very high. This trend may compromise the sahelian agriculture sustainability. The problems of unequal benefit from communal resources remain a big issue of the sahelian agriculture. With increasing pressure on land, it is necessary to look beyond the traditional free range communal grazing systems to more intensive alternatives and stronger land tenure policies.

Key words: Sahel, Niger, crop, livestock, mixed-farming system, soil fertility, nutrient balance, nitrogen, phosphorus, potassium, GIS, modeling, risk assessment

Sigles et abréviations

ACDI	Agence Canadienne de Développement International
AGRHYMET	Centre Régional de Formation et d'Application en Agrométéorologie et Hydrologie
AMMA	Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine
ASS	Afrique Sub Saharienne
BCR	Bureau Central des Recensements
CEC	Capacité d'Echange Cationique
CEDEAO	Communauté Economique des États de l'Afrique de l'Ouest
CPCS	Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
CSAO	Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest
CUD	Commission Universitaire pour Le Développement
CV	Coefficient de Variation
DGCD	Direction Générale de La Coopération Au Développement
ECLIS	Elevage Climat et Société
ENE	Est- Nord- Est
EPSAT	Estimation des Pluies par Satellite
FAO	Food And Agriculture Organization Of The United Nations
HAPEX	The Hydrology-Atmosphere Pilot Experiment in The Sahel
ICRISAT	International Crops Research Institute for The Semi-Arid Tropic
ILRI	International Livestock Research Institute
INS	Institut National de la Statistique
IRAN	Institut de Recherche Agronomique du Niger
ISRIC	International Soil Reference And Information Centre
JIRCAS	Japan International Research Center For Agricultural Sciences
LEAD	Livestock, Environment And Development
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economique
PNUD	Programme des Nations Unies pour Le Développement
PNUE	Programme des Nations Unies pour L'Environnement
RER	Risque d'épuisement Relatif
RGP	Recensement Général de la Population
RLP	Régression Linéaire Polytomique
SIG	Système d'information géographique
SMIAR	Système Mondial d'Information et d'Alerte Rapide sur l'Alimentation et l'Agriculture
UDE	Unité de Division de l'Exploitation
UNEP	United Nations Environment Programme
UPP	Unité Primaire de Production
US	United States
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodesic System
WHO	World Health Organization

Table des matières

Remerciements.....	iv
Résumé.....	vi
Summary.....	vii
Sigles et abréviations	viii
Table des matières.....	ix
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des figures	xvi
Liste des annexes (CD Joint)	xx
Introduction.....	xxii
1 Introduction	1
1.1 Dégradation des terres et durabilité	1
1.1.1 Les agroécosystèmes : dimension spatio-temporelle	2
1.1.2 Les interactions culture-élevage : flux biotechniques et économiques	5
1.1.3 Les bilans d'éléments nutritifs comme mesure de la durabilité des agroécosystèmes.....	8
1.1.4 Objectif de l'étude.....	10
1.1.5 Organisation de la thèse	12
2 La zone d'étude et la méthodologie générale.....	14
2.1 La zone d'étude	14
2.1.1 Le Niger	14
2.1.2 Les terroirs du Fakara.....	16
2.2 Méthodologie générale	31
2.2.1 Les données du SIG	32
2.2.2 Le cycle saisonnier dans les agroécosystèmes de l'ouest du Niger.....	37
2.2.3 La modélisation spatiale.....	38
2.2.4 Modélisation de l'agroécosystème	40
Partie 1 : Evaluation des stocks et flux liés à l'occupation des sols, aux cultures et à l'élevage ..	46
3 Les stocks de matière organique et des éléments minéraux N, P, K	47
3.1 Introduction	47
3.2 Méthode d'évaluation et de spatialisation des biomasses fourragères	50
3.2.1 Evaluation de la biomasse	50
3.2.2 Spatialisation des stocks organiques liés aux cultures et aux pâturages	58
3.2.3 Couplage de la cartographie de la biomasse avec d'autres éléments spatiaux	62
3.3 Résultats	65
3.3.1 La production de biomasse herbacée en fin de saison de croissance	65

3.3.2	La production de masse foliaire, masse de bois des plantes ligneuses.....	73
3.3.3	Contenu de la masse végétale en macroéléments N, P, K.....	81
3.3.4	Intégration des stocks herbacés et ligneux.	84
3.4	Discussion.....	98
3.4.1	Baisse de la productivité des pâturages et importance des résidus de cultures	98
3.4.2	Les jachères, source première des disponibilités alimentaires du bétail	102
3.4.3	L'origine des ressources alimentaires du bétail et la gestion des terres	103
3.4.4	Les ligneux comme complément alimentaire des fourrages herbacées.....	103
3.4.5	Le contenu en azote, phosphore et potassium des masses végétales.....	106
3.4.6	L'apport des systèmes d'information géographique dans l'évaluation des ressources fourragères.....	106
3.5	Conclusion partielle.....	108
4	Caractéristiques et dynamique temporelle des élevages bovins, ovins et caprins.....	110
4.1	Introduction	110
4.2	Méthodologie.....	112
4.2.1	L'enquête de terrain	112
4.2.2	Le traitement statistique des données.....	116
4.3	Résultats	117
4.3.1	Taille des troupeaux	117
4.3.2	Composition spécifique des troupeaux.....	119
4.3.3	Structure des troupeaux.....	120
4.3.4	La répartition des animaux selon le type de propriété.....	125
4.3.5	Indicateurs zootechniques des troupeaux	126
4.3.6	Etude des durées de transhumance	131
4.3.7	La répartition saisonnière des effectifs du cheptel	133
4.3.8	Les différents modes de conduite des troupeaux au pâturage	135
4.4	Discussion.....	137
4.5	Conclusion partielle.....	143
5	Dynamique spatio-temporelle de l'ingestion et de l'excrétion.....	144
5.1	Introduction	144
5.2	Méthodes	148
5.2.1	Données nécessaires au calcul de l'ingestion et de l'excrétion	148
5.2.2	Les échelles de calcul et d'agrégation de l'ingestion et de l'excrétion	149
5.2.3	Méthode d'évaluation de l'ingestion et de l'excrétion aux différentes échelles	152
5.2.4	Analyse statistique des résultats.....	156

5.3	Résultats	157
5.3.1	Les charges sur les terres de parcours	157
5.3.2	L'intensité de la charge	161
5.3.3	L'ingestion	164
5.3.4	L'excrétion	172
5.3.5	Le recyclage de la matière sèche	179
5.3.6	Le recyclage des éléments minéraux	181
5.4	Discussion.....	187
5.5	Conclusion partielle.....	190
Partie 2 : Evaluation des bilans partiels, et des indicateurs de risque d'épuisement de la fertilité des sols.....		191
6	Evaluation des flux biogéochimiques et bilans partiels des exploitations agropastorales.....	192
6.1	Introduction	192
6.1.1	Historique des bilans d'éléments minéraux en ASS	192
6.1.2	Typologie des bilans d'éléments nutritifs	194
6.1.3	Limites des approches des bilans en ASS	197
6.2	Méthodologie.....	203
6.2.1	NUTMON, une approche, un concept et un outil de gestion	203
6.2.2	L'évaluation, la quantification des flux et bilans partiels dans NUTMON.....	207
6.2.3	Agrégation des flux calculés par exploitation agricole et des flux d'ingestion et d'excrétion.....	212
6.2.4	Adaptation des données des terroirs à la base de données de NUTMON	214
6.2.5	Analyse statistique	225
6.3	Résultats : flux et bilans partiels des UPP et de l'exploitation	227
6.3.1	Les flux et bilans de l'exploitation KG95 par l'approche NUTMON	227
6.3.2	Les flux et bilans de l'exploitation KG95 par l'approche NUTPAST	229
6.3.3	Analyse des flux et bilans partiels de l'ensemble des exploitations suivies	231
6.3.4	Les bilans partiels par terroir, occupation des sols et type d'exploitation NUTMON	238
6.3.5	Les bilans partiels par terroir, occupation des sols et type d'exploitation NUTPAST ..	241
6.4	Discussion.....	248
6.5	Conclusion partielle.....	276
7	Evaluation du risque d'épuisement relatif des terres	278
7.1	Méthodologie.....	280
7.1.1	Les variables de viabilité de la gestion de l'exploitation et/ou des ressources communautaires	280

7.1.2	Recherche des indicateurs pertinents	281
7.1.3	Modélisation du risque d'épuisement relatif de la fertilité des terres	283
7.2	Résultats de l'évaluation du risque d'épuisement relatif des terres.....	287
7.2.1	Déterminations des variables pertinentes pour l'ajustement	287
7.2.2	Risque relatif d'épuisement de la fertilité des terres.....	291
7.3	Discussion.....	307
7.4	Conclusion partielle.....	310
8	Conclusion générale et perspectives.....	312
8.1	Conclusions	312
8.2	Perspectives	323
Bibliographie	.....	326

Liste des tableaux

Table 2-1 : Cumul pluviométrique (mm) dans les stations proches de la zone (mars à novembre).	20
Table 2-2 : Grands types de sols du Fakara et correspondances avec les différentes nomenclatures (FAO, 1998 ; CPCS, 1996 ; US Taxonomy 1990).....	26
Table 2-3: Paramètres physico-chimiques moyens des sols du site étudié	27
Table 3-1 : Estimation de la biomasse des herbacées et des résidus de récolte	66
Table 3-2: Biomasse moyenne, Erreur type (ET), CV par toposéquence et par occupation de sol	69
Table 3-3: Masses végétales moyennes par terroir sur les zones de cultures et de pâturages.....	71
Table 3-4: Contribution relative des taxons dans les pâturages en % pour la saison 1995-1996	72
Table 3-5: Contribution relative des taxons dans les cultures en % pour la saison 1995-1996	72
Table 3-6: Densité et couvert moyen des arbres et des arbustes par occupation de sol.....	73
Table 3-7: Contribution des espèces d'arbres et d'arbustes à la masse foliaire par occupation du sol dans le Fakara.....	75
Table 3-8: Masse foliaire moyenne appétible par terroir et par occupation de sols.....	76
Table 3-9: Devenir des masses végétales dans les terroirs en pourcent (%) de la masse totale.....	79
Table 3-10: Biomasse par terroir sur les zones de cultures et de pâturages en février 1996	80
Table 3-11: Biomasse moyenne par terroir sur les zones de cultures et de pâturages en juin 1996	80
Table 3-12: Quantité moyenne d'azote et de phosphore contenu dans les résidus de mil	82
Table 3-13: Taux d'azote et de phosphore dans les résidus de récolte par période et par terroir	82
Table 3-14: Valeur moyenne d'azote et de phosphore contenus dans les herbacées	83
Table 3-15: Masse totale par terroir et par type de végétation.....	85
Table 3-16: Coefficient de Pearson entre les masses herbacées et ligneuses ($P = 0.05$)	86
Table 3-17: Stocks médian de biomasse végétale appétible par toposéquence	89
Table 3-18 : Stocks moyens d'azote et erreur type d'azote, de phosphore, de potassium par occupation de sol et par terroir	90
Table 4-1 : Catégories d'animaux retenus dans le suivi des troupeaux	114
Table 4-2 : Indicateurs du suivi des troupeaux gestionnaires	115
Table 4-3 : Indicateurs du suivi du bétail des non gestionnaires	115
Table 4-4 : Taille moyenne des troupeaux des gestionnaires	117
Table 4-5 : Taille moyenne des troupeaux villageois	119
Table 4-6 : Quotient de mortalité par classe d'âge, par espèce et par terroir	128
Table 4-7 : Importance des différents types de conduite – gestionnaire	135
Table 5-1 : Durée moyenne de la pâture journalière selon la nature de l'occupation de sol en minutes	161
Table 5-2 : Intensité de charge saisonnière en UBT.heure.km ⁻² par type d'occupation de sol	164

Table 5-3 : Quantités totales de matière sèche ingérée dans les terroirs et par saison	165
Table 5-4 : Ingestion journalière par terroir suivant les 5 saisons	166
Table 5-5 : Temps de broutage dans les unités d'occupation de sol au cours d'une journée;.....	167
Table 5-6: Rapport ingestion et masse appétible dans les terroirs	169
Table 5-7 : Rapport ingestion et disponibilité sur les plateaux	169
Table 5-8 : Quantités annuelles de déjections animales dans les terroirs par saison	172
Table 5-9 : Quantité de déjections annuelles journalières par terroir et par saison.....	173
Table 5-10 : Répartition du temps total de séjour des animaux par occupation des sols.....	176
Table 5-11 : Quantités de déjections fécales des animaux par occupations des sols dans les terroirs	176
Table 5-12 : Quantité journalière de déjections animales par terroir, saison et occupation des sols ..	178
Table 5-13 : Taux de recyclage de la matière sèche dans les occupations de sols par terroir.....	179
Table 5-14 : Flux totaux d'éléments minéraux par terroir (unités = tonne).....	181
Table 5-15 : Flux d'éléments minéraux par unité de surface dans les trois terroirs	181
Table 5-16 : Flux de N, P, K par unité de surface dans les occupations de sol (unité=kg.ha ⁻¹).....	182
Table 5-17 : Résultats de l'analyse de variance des excréptions fécales par unité de surface dans les terroirs et les occupations de sol.	185
Table 5-18 : Analyse de variance par modèle généralisé des excréptions dans l'auréole 2.....	185
Table 6-1 : Quelques études de bilans des éléments minéraux conduits en Afrique entre 1993 et 2004	195
Table 6-2: Forces et faiblesses de certaines méthodologies d'évaluation des flux et bilans minéraux	197
Table 6-3 : Les intrants et extrants dans le calcul de NUTMON	207
Table 6-4 : Les unités de production primaires.....	221
Table 6-5 : Production des différentes UPP	221
Table 6-6: Flux et bilans partiels N, P et K calculés par NUTMON pour KG95	228
Table 6-7 : Flux et bilans partiels N, P et K de KG95 corrigés par NUTPAST	230
Table 6-8 : Importance de la population et des terres dans les exploitations étudiées.....	231
Table 6-9 : Caractéristiques moyennes des exploitations étudiées	231
Table 6-10: Dose moyenne de fumure minérale et organique	235
Table 6-11: Quantité d'azote par hectare par terroir, par type de culture et par type d'engrais.....	235
Table 6-12: Quantité de phosphore par hectare par terroir, par type de culture et par type d'engrais	235
Table 6-13: Quantité de potassium par hectare apporté par terroir, par type de culture et par type d'engrais.....	236
Table 6-14 : Bilan partiel des éléments nutritifs par terroir selon NUTMON	240
Table 6-15: Bilan partiel des éléments nutritifs par type d'occupation des sols selon NUTMON.....	240
Table 6-16 : Bilan partiel des éléments nutritifs par terroir - NUTPAST	241

Table 6-17 : Bilan de N, P, K dans les occupations de sols autres que cultures fumées par NUTPAST	242
Table 6-18: Quantiles des bilans partiels N, P, K par occupation des sols	243
Table 6-19 : Coefficient de corrélation entre les bilans partiels NUTMON et NUTPAST dans les UPP	243
Table 6-20: Bilan partiel par type d'exploitation et par terroir (unité=kg/ha).....	244
Table 6-21: Statistiques descriptives des classes d'exploitations ILRI	245
Table 6-22: Résultats de l'analyse discriminante pas à pas.....	245
Table 6-23: Résultats du modèle linéaire généralisé sur l'effet terroir et classe exploitation	246
Table 7-1: Statistiques descriptives des variables utilisées dans l'ajustement des bilans.....	288
Table 7-2 : Résultats de la régression polytomique par variable suivant l'approche globale (GL) et l'approche par classe d'exploitation gestionnaire (GE) et non gestionnaire (NG).....	291
Table 7-3 : Résultats de la RLP par variable suivant l'approche globale (GL) et l'approche par classe d'exploitation gestionnaire (GE) et non gestionnaire (NG) pour les variables issues de la carte d'occupation des sols	301
Table 7-4 : Résultats de la validation des RLP par la méthode du ‘Bootstrap’.	301
Table 7-5 : Evaluation de l'effet de la localisation et de la classe d'exploitation sur le risque	303
Table 7-6 : Evaluation du risque par terroir, classe d'exploitation suivant les variables issues de l'occupation des sols	303

Liste des figures

Figure 2-1 : Localisation de la zone d'étude et division bioclimatique du Niger.....	15
Figure 2-2: Carte de situation de la zone d'étude par rapport au pays le Niger.	18
Figure 2-3: Localisation des villages des sites d'étude	19
Figure 2-4: Seuil de rupture dans la série climatologique 1905 -2000 de la station de Niamey	21
Figure 2-5 : Carte topo-géomorphologique des trois terroirs.....	23
Figure 2-6: Agencement spatial des unités géomorphologiques de Banizoumbou	24
Figure 2-7 : Grands types de sols du Fakara selon la nomenclature mondiale des sols.....	26
Figure 2-8 : Unités Géographiques pour l'étude des flux organiques, des activités du bétail et la cartographie des bilans du terroir de Kodey.....	33
Figure 2-9: La carte d'occupation de 1992.....	34
Figure 2-10: La carte des sols de la zone d'étude: Topographie, texture et aptitude	35
Figure 2-11: Foncier agricole du terroir de Banizoumbou.....	36
Figure 2-12 : Cycle saisonnier dans les agroécosystèmes sahéliens du Niger.....	37
Figure 2-13: Schéma des flux entre les différentes composantes biophysiques et socio-économiques de la base de données du Fakara	42
Figure 2-14 : Schéma global de liaison des entités spatiales et des données tabulaires.....	44
Figure 2-15 : Schéma de la modélisation des flux organiques et bilans des éléments nutritifs	45
Figure 3-1 : Localisation des sites sur la carte de la zone d'étude avec les différents types de sols (Adaptée de Hiernaux, Ayantunde <i>et al.</i> , 2009).....	51
Figure 3-2 : Séance d'observation des strates lors de relevés dans une jachère de l'unité KB7 ;.....	53
Figure 3-3: Illustration de la méthode de détermination de la distance Q1 correspondant au plant le plus proche du centre du quadrant délimité par les pointillés. (Tiré de Cottam et Curtis (1956) – Page 453).....	54
Figure 3-4: Station de mesure des ligneux dans la brousse tigrée de l'unité K21	57
Figure 3-5 : Schéma de flux pour la spatialisation des masses végétales	61
Figure 3-6: Schéma de création des tables d'analyse avec les variables sols	62
Figure 3-7 : Exemple d'entités géographiques utilisées dans la chaîne de traitement.....	63
Figure 3-8: Biomasse herbacée moyenne, minima et maxima par occupation de sol en fin de saison de croissance	65
Figure 3-9 : Carte de la biomasse dans les trois terroirs du Fakara en Octobre 1995	68
Figure 3-10 : Répartition des stocks de matière sèche herbacée par occupation de sol et par terroir ...	70
Figure 3-11 : Contribution en % des arbres et des arbustes dans les masses foliaires ligneuses	74
Figure 3-12 : Représentation des espèces dominantes des arbres dans le Fakara.....	77
Figure 3-13 : Représentation des espèces dominantes des arbustes dans le Fakara	78

Figure 3-14 : Sites des échantillons de biomasse pour les analyses bromatologiques.....	81
Figure 3-15 : Ajustement linéaire de la relation entre l'azote et le phosphore dans les résidus de culture (figure de gauche) et dans les herbacées (figure de droite) au mois de Février	83
Figure 3-16 : Répartition des stocks de biomasse entre ligneux et herbacées dans les terroirs	85
Figure 3-17: Biomasse végétale aérienne appétible par unité de surface par terroir	86
Figure 3-18 Biomasse végétale aérienne des herbacées et des ligneux à la fin de la saison de croissance - Octobre 1995	87
Figure 3-19 : Origine des stocks de biomasse par terroir.....	88
Figure 3-20 : Stock moyens de macroéléments de la biomasse aérienne herbacée et ligneuse par unité de surface	91
Figure 3-21: Importance des stocks totaux de N, P, K contenus dans les masses fourragères appétibles selon le type d'occupation de sol.....	93
Figure 3-22 : Quantité d'azote contenue dans la biomasse végétale aérienne appétible par unité de surface	95
Figure 3-23 : Quantité de phosphore contenue dans la biomasse végétale aérienne appétible par unité de surface	96
Figure 3-24 : Quantité de potassium contenue dans la biomasse végétale aérienne appétible par unité de surface	97
Figure 4-1 : Carte des villages enquêtés dans les trois terroirs	113
Figure 4-2 : Distribution des troupeaux bovins, caprins et ovin selon le nombre de têtes	118
Figure 4-3 : Composition spécifique des troupeaux des exploitations gestionnaires	120
Figure 4-4 : Composition spécifique des troupeaux des exploitations non gestionnaires	120
Figure 4-5 : Composition des troupeaux des gestionnaires	122
Figure 4-6 : Composition des troupeaux des non gestionnaires	124
Figure 4-7 : Catégories d'animaux achetés dans les troupeaux bovins, ovin et caprins	127
Figure 4-8 : Répartition saisonnière des achats	127
Figure 4-9 : Evolution saisonnière des quotients de mortalité	129
Figure 4-10 : Répartition saisonnière des naissances dans les troupeaux bovins	130
Figure 4-11 : Evolution mensuelle des départs en transhumance et par nombre de départ (la figure centrale représente l'évolution pour l'ensemble des départs)	132
Figure 4-12 : Effectif total saisonnier par terroir - gestionnaire	133
Figure 4-13 : Effectif total saisonnier par terroir – non gestionnaire.....	134
Figure 5-1 : Variation saisonnière de la densité du cheptel dans les trois terroirs	157
Figure 5-2 : Variation saisonnière des charges animales dans les terroirs.....	158
Figure 5-3 : Charge diurne et nocturne en hivernage (1) dans les trois terroirs du Fakara.....	160

Figure 5-4 : Proportion de temps journalier passé dans les occupations de sols	162
Figure 5-5 : L'indice de pression saisonnier par type d'occupation des sols.....	163
Figure 5-6 : Ingestion journalière moyenne dans les unités géographiques (kgMS/ha)	166
Figure 5-7 : Répartition de l'ingestion totale du terroir par type d'occupation des sols.....	168
Figure 5-8 : Rapport de l'ingestion totale sur les masses appétibles mesurées en octobre, et sur les masses appétible totales	170
Figure 5-9 : Rapport de l'ingestion sur les masses appétibles dans les plateaux.....	171
Figure 5-10 : Variabilité spatiale de l'excrétion journalière dans les unités géographiques.....	174
Figure 5-11 : Relation spatiale entre l'ingestion et l'excrétion dans les unités géographiques	175
Figure 5-12 : Répartition des excréptions dans les catégories d'occupation des sols.....	177
Figure 5-13 : Excrétion journalière dans les occupations de sols à Tchigo Tegui	178
Figure 5-14 : Taux de recyclage de la matière sèche dans les trois terroirs.....	180
Figure 5-15 : Répartition du N, P, K excrété dans les occupations de sol	182
Figure 5-16 : Azote ingéré dans les unités d'occupation de sols	183
Figure 5-17 : recyclage de l'azote par le cheptel	185
Figure 5-19 : Recyclage du potassium par le cheptel	186
Figure 5-18 : Recyclage du phosphore par le cheptel	186
Figure 6-1 : Les 5 flux entrants et sortants de la méthodologie des bilans de la FAO (Source : Roy, Misra <i>et al.</i> , 2003) INi représente un flux en entrée et EXi représente un flux en sortie avec i= 1 à 5	193
Figure 6-2 : Concept de l'exploitation dans NUTMON (source=Vlaming, Van den Bosch <i>et al.</i> , 2001)	204
Figure 6-3 : Situation géographique du campement de KG95.....	215
Figure 6-4 : Données climatiques de Dandiré (AGRHYMET et AP3A, 2002).....	216
Figure 6-5 : Unités de sols de l'Ouest –Niger issues de la carte des sols de la FAO (1991)	217
Figure 6-6 : Terres de l'exploitation KG95 dans les unités géographiques	218
Figure 6-7 : Les UDE de KG95	219
Figure 6-8 : Les UPP de l'exploitation KG95.....	220
Figure 6-9 : Zone de parcours des troupeaux de KG95 – Situation NUTPAST.....	224
Figure 6-10 : Zone de parcours des troupeaux de KG95 – Situation NUTMON	224
Figure 6-11: disponibilités des masses végétales par type de parcours et selon la période	229
Figure 6-12: Représentation des unités du circuit de pâture nocturne et diurne	233
Figure 6-13 : Répartition des déjections animales apportées par la pâture dans les catégories d'UPP.....	236
Figure 6-14: Niveau en % des exportations d'azote, de phosphore et de potassium des friches, jachères et sols incultivables pour l'ensemble des zones pâturées en toute saison.....	237

Figure 6-15 : Importance des flux d'azote entrants et exportés hors des exploitations	238
Figure 6-16: Flux partiels d'azote par terroir (unité: kg/ha)	239
Figure 6-17 : Flux et bilans moyens de N, P, K des 3 terroirs	242
Figure 6-18 : Bilan partiel de N spatialisé des unités de production primaire – NUTPAST	247
Figure 7-1: Régression par quantile : Diagramme de couverture par quantile des variables significatives ($p < 0.05$) retenues	290
Figure 7-2: Tendance des coefficients de la régression par quantile selon les quantiles et par variable	290
Figure 7-3 : Représentation des probabilités de risque prédictes par la RLP au niveau global en fonction des variables FUM2 et JAC1	293
Figure 7-4 : Diagramme des valeurs moyennes de risque et leur dispersion avec des valeurs suspectes	295
Figure 7-5 : Diagramme des valeurs moyennes de risque – classe des gestionnaires	295
Figure 7-6 : Représentation cartographique de la pression de culture et de l'intensité de fumure calculée sur des grilles de 3 km x 3 km à partir de la carte d'occupation des sols de 1995.....	297
Figure 7-7 : Représentation cartographique de la pression de culture et de l'intensité de fumure dans les terres des exploitations à partir des valeurs agrégées par grille de 3 km * 3 km.....	298
Figure 7-8 : Représentation cartographique du pourcentage de jachères dans les terres des exploitations à partir des valeurs agrégées par grille de 3km * 3 km.....	299
Figure 7-9 : Représentation des probabilités de risque prédictes par la RLP au niveau global en fonction de la pression de culture CUL1_S.....	299
Figure 7-10: Risque moyen dans les terroirs de Kodey et Tchigo Tegui.....	304
Figure 7-11: Risque moyen dans le terroir de Banizoumbou	305
Figure 7-12 : Caractéristiques moyennes des variables de viabilité selon trois classes de risque	306
Figure 8-1: Synthèse des facteurs et tendances du risque (RER).....	322

Liste des annexes (CD Joint)

- Annexe 2.1: Architecture générale du système
Annexe 3.1 : Détermination des coefficients k par terroir
Annexe 3.2 : Rapport entre les estimations de masses à l'échelle du terroir
Annexe 3.3 : Biomasse herbacée moyenne des cultures sans fumure
Annexe 3.4 : Mosaïque de la répartition des occupations de sol par toposéquence
Annexe 3.5 : Origine des stocks de matière sèche herbacée
Annexe 3.6 : Mosaïque de la répartition de la biomasse par toposéquence dans les terroirs
Annexe 3-7 : Composition de la masse moyenne de la végétation dans un champ de mil
Annexe 3.8 : Contribution des espèces dans le couvert végétal des cultures
Annexe 3.9 : Contribution des différentes espèces au couvert dans les pâturages
Annexe 3.10 : Production de bois dans les terroirs et par occupations de sol
Annexe 3.11 : Variation de masses des cultures entre les périodes de collecte
Annexe 3.12 : Evolution des masses végétales moyenne à l'hectare sur une année complète
Annexe 3.13 : Variation de l'azote dans la biomasse des résidus de récolte
Annexe 3.14 : Variation du phosphore dans la biomasse des résidus de récolte
Annexe 3.15 : Régressions entre taux de phosphore et taux d'azote dans les résidus de récolte
Annexe 3.16 : Régressions entre taux de phosphore et taux d'azote dans les herbacées des pâturages
Annexe 3.17 : Graphiques de relation entre N, P et K (kg/ha)
Annexe 3.18 : Stocks totaux d'azote, de phosphore et de potassium dans les terroirs
Annexe 3.19 : Stock d'azote en % provenant des herbacées et des ligneux par terroir
Annexe 3.20 : Mosaïque de répartition du stock d'azote entre cultures et pâturages
Annexe 3.21 : Mosaïque de répartition du stock de phosphore entre cultures et pâturages
Annexe 3.22 : Mosaïque de répartition du stock de potassium entre cultures et pâturages
Annexe 4.1 : Effectif initial et final des troupeaux bovins dans les trois terroirs
Annexe 4.2 : Distribution de la taille des ovins, bovins et caprins des gestionnaires
Annexe 4.3 : Sexe ratio par espèce et par terroir des troupeaux des gestionnaires
Annexe 4.4 : Structure démographique des troupeaux bovins, caprins et ovins des gestionnaires
Annexe 4.5 : Composition des troupeaux non gestionnaires
Annexe 4.6 : Importance saisonnière des statuts de propriété du bétail dans les troupeaux
Annexe 4.7 : Répartition des ventes selon les classes d'âge
Annexe 4.8 : Dynamique saisonnière des ventes
Annexe 4.9 : Importance des achats dans les troupeaux des gestionnaires
Annexe 4.10 : Taux de fécondité des troupeaux par espèce et par terroir
Annexe 4.11 : Rapport des naissances / lactantes
Annexe 4.12 : Durée moyenne des transhumances par terroir et par espèce
Annexe 4.13 : Evolution saisonnière du nombre moyen d'UBT par troupeau
Annexe 4.14 : Charge saisonnière totale par terroir et par saison
Annexe 5.1 : Paramètres d'ingestion et d'excrétion par espèce, saison et catégorie d'animal
Annexe 5.2 : Contenu en azote des déjections animales
Annexe 5.3 : Pâturage diurne et nocturne
Annexe 5.4 : Pâturage diurne et nocturne au cours des saisons
Annexe 5.5 : Comparaison des temps passés dans les occupations de sols suivant les saisons
Annexe 5.6 : Intensité de charge saisonnière dans les terroirs, occupations de sols
Annexe 5.7: Partitionnement récursif des terroirs selon les déjections animales

- Annexe 6.1 : Le modèle élevage de NUTMON (Vlaming, Van den Bosch *et al.*, 2001)
- Annexe 6.2 : Composition des engrains minéraux, déchets et déjections animales (unité kg/kg)
- Annexe 6.3 : Les flux quantifiés dans NUTMON
- Annexe 6.4 : Indice de récolte, teneur en matière sèche et éléments nutritifs des principales céréales
- Annexe 6.5 : teneur en matière sèche et éléments nutritifs des autres cultures et leurs résidus
- Annexe 6.6 : Coefficients utilisés pour les catégories d'animaux
- Annexe 6.7 : NUTMON maximum production model
- Annexe 6.8 : Nutrient composition of manure at selected sites in semi-arid West Africa.
- Annexe 6.9 : Composition du ménage exemple (KG95)
- Annexe 6.10 : Caractéristiques des sols de l'exploitation KG95
- Annexe 6.11 propriétés des unités de sols de la carte FAO
- Annexe 6.12 : Unités pâturées par le troupeau de KG95
- Annexe 6.13 Rapport NUTMON KG 95
- Annexe 6.14: Parcellaire des gestionnaires et des non gestionnaires
- Annexe 6.15 : Fréquence de pâture dans les UPP et dans l'unité EXT pour les gestionnaires
- Annexe 6.16 : Répartition du temps de pâture et de repos des troupeaux non gestionnaires
- Annexe 6.17 : Flux de phosphore lié aux déjections hors exploitation
- Annexe 6.18 : Flux de potassium lié aux déjections hors exploitation
- Annexe 6.19 : Bilan partiel des éléments nutritifs par type d'exploitation selon NUTMON
- Annexe 6.20 : Programme SAS
- Annexe 6.21 : Matrice de corrélation entre les variables de viabilité
- Annexe 6.22 : Coefficient de la régression par quantile et de la régression logistique
- Annexe 6.23 : Paramètres du risque selon les exploitations

Introduction

1 Introduction

En Afrique Sub Saharienne (ASS), plusieurs pays et en particulier ceux du Sahel¹ dont fait partie le Niger n'arrivent pas équilibrer leurs bilans alimentaires. Ils doivent faire face régulièrement à des déficits de leur production agricole. Le Niger en particulier, connaît depuis plusieurs années un déséquilibre entre la croissance de sa population estimée à 3.3% (BCR, 2001) et celle de sa production agricole. Le déficit alimentaire est chronique et ne permet pas d'assurer la sécurité alimentaire comme définit par la FAO (FAO/WHO, 1996). Cela reste un défi perpétuel pour la plupart des pays sahéliens et leurs populations. Les raisons qui expliquent cette insécurité alimentaire récurrente ont été largement débattues pendant des décennies et continuent de l'être. Parmi ces raisons, celles qui sont les plus souvent avancées sont **la péjoration voire l'aridification du climat, la dégradation et l'érosion des sols, la baisse de la fertilité des sols, l'impact de la croissance naturelle de la population et les politiques publiques en faveur de l'agriculture. D'autres raisons très ciblées en lien avec l'élevage et l'environnement sont aussi avancées telles que le déboisement, les feux de brousse, le surpâturage ou la surcharge des pâturages.**

1.1 Dégradation des terres et durabilité

Les pertes de matière organique des sols constituent un lien entre désertification et perte de fertilité des sols. Au Sahel, plusieurs pratiques participent à cette baisse de matière organique des sols comme la réduction de la durée et pratique des jachères, le brûlis, et la collecte du bois mort, des pailles et chaumes. Ces pratiques s'ajoutent aux processus essentiels que sont l'érosion éolienne et l'érosion hydrique des sols. Le rapport du PNUE en 2002 (UNEP, 2002) s'alarme d'une augmentation rapide de la dégradation des sols et présage un chaos de l'agriculture si l'Afrique ne suit pas la voie d'un développement qui respecte l'environnement. Ce rapport souligne les différentes causes de la dégradation de l'environnement depuis les indépendances nationales à nos jours. Il met en exergue aussi bien les aspects politiques que socio-économiques et naturels, et remet en cause les méthodes

¹ Selon Hiernaux et Le Houerou, 2006, la Sahel s'étend sur près de 6 000 km des côtes Atlantiques de la Mauritanie et du Sénégal, à l'ouest, à celles de la mer Rouge au Soudan, à l'est, et sur une largeur de 400 à 600 km des confins sud du Sahara aux savanes, forêts claires et parcs agraires de la zone soudanienne.

d'exploitation qui sont incompatibles avec un développement durable. Dans des études plus fines, Niemeijer et Mazzucato (2002) montrent que la dégradation des terres et la destruction de l'environnement dans un pays du Sahel ne sont pas forcément liées aux pratiques agricoles locales. Cette tendance est aussi décrite par Breman, Fofana *et al* (2008) qui montrent que la dégradation des terres est un phénomène plus complexe au Sahel car les terres sont à l'origine très pauvres. Au-delà des polémiques sur l'importance relative des pratiques agricoles locales dans la dégradation des sols, le constat d'une productivité faible ou très faible est une réalité. Cette situation exacerbe le niveau de pauvreté des populations. Elle s'accompagne en outre par une érosion de la biodiversité aussi bien chez les végétaux que dans le règne animal. Elle compromet la disponibilité des ressources pour les prochaines générations, donc le futur du Sahel. Les thèses avancées sur les rôles respectifs des changements climatiques ou de l'homme sur la désertification ont toujours fait l'objet de recherche. Leurs origines varient d'une école à une autre (Binger, 1892; Bernus, 1984b; Reynolds et Smith, 2002; Mortimore et Turner, 2005; Ozer et Ozer, 2009). A ces déséquilibres s'ajoutent l'impact des politiques d'ajustement structurel et les problèmes de gouvernance qui ont un impact plus négatif sur l'environnement sahélien à travers la réduction des dépenses publiques essentielles à l'agriculture et la promotion des mesures contre-productives sur le développement agricole. **Le concept de durabilité de l'agriculture s'impose, il implique la sauvegarde ou l'amélioration du potentiel de production agricole.** C'est un concept qui relie les dimensions écologiques, économiques, sociales et environnementales de l'agriculture. Milleville et Serpantié (1994) définissent la durabilité dans sa dimension écologique en termes de maintien ou de redressement de l'état des ressources productives du milieu en fonction de la nature et de la productivité du système agricole, et en prônant des mécanismes qui peuvent être mis en œuvre par les acteurs eux-mêmes (pratiques de jachère, apports de matière organique, dispositifs anti-érosion).

1.1.1 Les agroécosystèmes : dimension spatio-temporelle

L'agroécosystème est une conceptualisation d'activités agricoles dans un environnement qui prend en compte le fonctionnement de l'écosystème au sein duquel elles se développent, intégrant les dimensions spatiales et les dynamiques temporelles. Pour Belcher, Boehmb *et al.*(2004), l'agroécosystème est un système de production agricole remis dans son écosystème, c'est-à-dire dans un environnement relativement homogène en termes de

végétation, sols, et de géomorphologie. Les processus qui interagissent dans un agroécosystème sont climatiques, biologiques et socio-économiques. Ces processus interviennent à différentes échelles spatiales et temporelles qui rendent très complexes l'analyse de la durabilité des agroécosystèmes et principalement les systèmes de production qui les composent. Les typologies existantes sur les systèmes de production des agroécosystèmes culture-élevage dans le sahel sont basées sur les critères liés à la part de revenu tiré des cultures et de l'élevage, à l'importance du budget annuel dédié à l'alimentation des animaux, à la taille des troupeaux, au degré de mobilité et au niveau d'intégration des activités de production animales et culturales. Ces agroécosystèmes du Sahel résultent d'une transformation progressive de systèmes de culture, et systèmes d'élevage pastoraux suite aux contraintes climatiques, alliées à celles qui sont générées par la croissance démographique et par la croissance du cheptel (Powell, Pearson *et al.*, 2004). De nos jours, la plupart des exploitations agricoles au Sahel possède des animaux et pratique les cultures. Plusieurs définitions des systèmes de production élevage-culture des régions du Sahel existent dans la littérature et dépendent des "écoles". Les premières classifications (Gallais, 1972 ; Bernus, 1974 ; Ruthenberg, 1980) tentent une distinction entre systèmes de culture et systèmes d'élevage, avec des types d'élevage classés selon leur mobilité (sédentaires, transhumants et nomades). D'autres classifications ont tenté d'établir des liens entre les densités de population et les surfaces cultivées (Wint et Bourn, 1994). Les deux grands types de classification les plus utilisés sont ceux de Seré et Steinfeld (1996) et de Schiere, Ibrahim *et al.* (2002). Ces deux classifications sont orientées vers la définition de types agroécologiques replacés dans un contexte de durabilité de la production agricole. La définition de Seré et Steinfeld (1996) met en exergue les aspects agro-écologiques et quantifie les relations qui existent entre l'élevage et les cultures. En revanche la classification de Schiere, Ibrahim *et al.* (2002) est utilisée dans les modèles de type bioéconomique (La Rovere, Hiernaux *et al.*, 2002). Seré et Steinfeld (1996) définissent 6 régions dans le monde basées sur la longueur du cycle de végétation et les températures, et 11 classes de système de production. Les zones sahéliennes appartiennent dans cette classification à la zone semi-aride où la longueur du cycle de végétation est comprise entre 75 et 180 jours. Les agroécosystèmes du Sahel sont classés dans la catégorie "système extensif mixte culture-élevage en zones tropicales et subtropicales arides et subarides". Les caractéristiques générales de ces systèmes définies par Seré et Steinfeld (1996) sont : plus de 10% de l'alimentation des animaux provient des sous-produits

de l'agriculture et des chaumes et plus de 10% de la valeur de la production provient d'autres activités que l'élevage. Williams, Hiernaux *et al.* (1999) définissent les systèmes mixtes culture-élevage en termes d'intégration des activités de production culture et élevage au sein d'une exploitation agricole où les productions animales contribuent aux productions culturales et vice-versa. Pour ces définitions, plusieurs auteurs relèvent qu'entre le système dit pastoral et le système mixte ou agropastoral, plusieurs transitions sont possibles et que le système actuel rentre dans un processus d'évolution des agroécosystèmes (Powell, Pearson *et al.*, 2004).

Les agroécosystèmes culture-élevage gèrent plus de la moitié du cheptel en ASS (Powell et Williams, 1995b). En dépit de l'importance du cheptel dans les pays du Sahel, la productivité de l'élevage par tête et la productivité agricole demeurent parmi les plus faibles dans le monde. En effet, l'offre annuelle en viande est de l'ordre de 8 kg/hbt, 7 kg/hbt, et 6 kg/hbt respectivement pour le Mali, le Burkina Faso et le Niger (CSAO-OCDE et CEDEAO, 2008). Les performances laitières des vaches ne dépassent guère 2 litres/jour en moyenne pendant la lactation avec de fortes variations entre les vaches et entre races. La productivité agricole par unité de surface est également très faible. Les rendements stagnent dans la plupart des pays de la région sahélienne (Pieri, 1989; Bationo, Lombo *et al.*, 1998). En dépit de la faible productivité des agroécosystèmes culture-élevage, liée essentiellement à plusieurs facteurs biophysiques dont les sols, des relations existent entre élevage et culture du fait de la mobilité saisonnière d'une partie du bétail. L'élevage dans ces zones dépend essentiellement des ressources fourragères se trouvant hors des limites de l'exploitation familiale : dans les espaces communautaires ou publics mais il peut également bénéficier librement des résidus de cultures dans les champs privés.

La rapide croissance de la population rurale ramenée à l'espace agricole a entraîné une baisse drastique des disponibilités en terre par habitant. La disponibilité en terres potentiellement cultivables en Afrique sahélienne s'amenuise de plus en plus. Au Niger par exemple, la superficie des terres cultivables estimée à 0.98 ha/habitant en 2000 ne serait plus que de 0.23 ha/habitant (Alexandratos, 2005). Les adaptations locales pour faire face à cette saturation de l'espace ont été comme partout au Sahel, la réduction de la superficie et de la durée des jachères (Floret, Roger *et al.*, 1993; Floret et Pontanier, 2001; Wezel et Haigis, 2002),

l'utilisation des terres marginales pour l'agriculture (Raynaut, 2001), avec pour conséquence la baisse des rendements agricoles (Pieri, 1989) et l'accroissement de l'aide alimentaire (Marinho, 2008). Les baisses de rendements enregistrées dans plusieurs pays mettent en lumière les relations étroites entre l'expansion démographique, la détérioration de l'environnement et la stagnation de l'agriculture (Milleville et Serpantié, 1994). De telles tendances de l'agriculture sahélienne amènent à se demander si les théories Boserupiennes² (Boserup, 1965) qui stipulent que la croissance démographique constitue le moteur de l'intensification, bien vérifié dans plusieurs pays d'Asie, conviennent aux agroécosystèmes du Sahel ?

1.1.2 Les interactions culture-élevage : flux biotechniques et économiques

Dans les zones semi-arides, le rôle des interactions culture-élevage dans la gestion durable des ressources est multiple. Ces interactions reposent sur des échanges ou flux à la fois biologiques et économiques entre les deux activités et se manifestent à plusieurs échelles dont celle des terres de l'exploitation agricole où l'unité de production, et celle du terroir ou la région. Lhoste (2004) regroupe ces interactions en trois piliers biotechniques qui sont le travail de trait qu'assure le bétail dans les exploitations, les aliments destinés aux animaux issus des champs et des jachères, et l'apport de déjections animales comme fumure aux cultures. A cela, il faut ajouter les flux économiques liés aux deux activités. Il faut aussi ajouter l'existence de la compétition des activités pour la main d'œuvre en particulier, mais aussi les investissements, éventuellement l'usage des terres. Les différentes contraintes biophysiques et socioéconomiques des agroécosystèmes culture-élevage sont à la base des transformations de ces systèmes observées ces dernières années. Elles se sont traduites par un transfert graduel aussi bien des éleveurs du nord que de leur bétail dans les zones à dominante culturale (Benoit, 1979; De Bruijn et Van Dijk, 2003). Cette dynamique des systèmes de production s'est accompagnée par la sédentarisation progressive des éleveurs amenés à cultiver la terre. Elle s'est aussi traduite par un investissement progressif des cultivateurs dans le bétail. Ce schéma continue d'évoluer aujourd'hui vers d'autres formes d'appropriation du bétail par les populations urbaines (Turner, 2009). La possession de bovins ou de petits ruminants par les agro-éleveurs du Sahel permet de faire face rapidement au risque de perte

² La thèse de Boserup : au-delà d'une certaine pression agricole sur les terres, on assiste à une évolution des agroécosystèmes tant sur le plan de l'intensification que de la durabilité écologique des ressources

de production agricole, et la possession de volailles permet de faire face aux besoins quotidiens dans des régions où le rapport du PNUD sur le développement humain en 2004 relève une dégradation des conditions de vie de plus en plus sévère (PNUD, 2004a). Le transfert et la sédentarisation d'éleveurs dans les zones de culture exacerbent la pression sur les terres cultivables, la réduction de surfaces et durées de jachère associée au morcellement des terres en réponse à la croissance démographique. La compétition pour les terres de culture peut réduire à son tour la mobilité du cheptel (Turner, 1993) et est source de plusieurs conflits (Williams, 2003; Turner, 2004; Clanet et Ogilvie, 2009).

Dans les unités de production, l'élevage améliore de manière substantielle les revenus des ménages (De Leeuw, Reynolds *et al.*, 1995; Powell, Fernandez-Rivera *et al.*, 1996). L'importance des petits ruminants et de la volaille dans les économies des exploitations est bien connue (Le Gal et Planchenault, 1993; Powell, Fernandez-Rivera *et al.*, 1994). Les animaux peuvent être vendus rapidement en cas de difficultés de trésorerie liées à une mauvaise production agricole ou un besoin généré par l'amélioration des conditions de la vie des ménages. Contrairement aux cultures dont les récoltes ne sont disponibles qu'une fois par an, le bétail permet d'assurer une trésorerie régulière (Lhoste, 1987). Cette dynamique d'échanges dans le bétail permet d'approvisionner les marchés de viande de manière régulière au Sahel et les marchés des pays côtiers (Tiffen, 2006). Ainsi, pendant la dévaluation en 1994, seul le marché du bétail a connu une bonne croissance (CSAO-OCDE et CEDEAO, 2008). Ce commerce international influe considérablement sur le bilan commercial des états concernés (Williams, 1993). Néanmoins, le marché céréalier est aussi approvisionné par ces petits paysans qui assurent une quantité régulière de stock sur l'ensemble du réseau commercial (Mortimore, 2003).

Un des apports majeurs de l'élevage dans les systèmes mixtes est celui des animaux de trait qui démultiplient la capacité de travail du sol pour les cultures (labour), et les animaux de bât qui facilitent et augmentent la capacité des transports du champ à l'exploitation et de l'exploitation au marché (Bosc, 1992; Reardon, 1994). Cependant, force est de constater que cet essor des animaux de trait est surtout remarquable dans les zones de culture de rente (Zone cotonnière et arachidière par exemple au Burkina Faso et au Niger) et très faible dans les autres zones, comme dans l'ouest du Niger. Il n'empêche que l'utilisation des animaux de

bât améliore de manière considérable le transport, et que le bétail joue un rôle majeur dans le recyclage des matières organiques et minérales par ses déjections qui assurent la fumure des champs (Mohamed Saleem, 1998).

Dans les agroécosystèmes culture-élevage du Sahel, l'impact environnemental de l'élevage intervient à des degrés divers dans un écosystème où la dégradation des terres est un risque grave. Dans les systèmes mixtes, l'élevage valorise les ressources organiques des pâturages naturels et ceux des résidus de culture, produits de basse qualité en produits de haute valeur nutritionnelle et commerciale, viande et lait (Ickowicz, Usengumuremyi *et al.*, 1997). La pâture est souvent considérée comme un facteur d'érosion des sols ou de la végétation. Le compactage occasionné par le bétail lors de la pâture par piétinement augmente la densité apparente du sol en surface et baisse le taux d'infiltration (Hiernaux, Bielders *et al.*, 1999). Mais l'effet du piétinement sur la physique des sols dépend de la texture de sol et des états de surface. Selon Hiernaux et Le Houerou (2006), la réduction de la productivité des parcours à court terme attribuable à la pâture, est faible. Dans certaines conditions de charge et de calendrier, la pâture peut même stimuler la production (Hiernaux et Turner, 1996). Les animaux contribuent ainsi à une bonne dissémination des graines et ils peuvent améliorer la qualité des sols en contribuant au recyclage de la matière organique, via leurs déjections. Cette amélioration de la qualité des sols favorise la germination et stimule la croissance des graminées (Hiernaux et Hérault, 2003). La dégradation de la production ou des sols par la pâture intervient dans des situations où la pression animale est très forte notamment autour des points d'eau ou des campements. Mais les plus fortes dégradations du couvert végétal et des sols observées dans les zones semi-arides sont liées essentiellement aux défrichements associés à l'extension des cultures, la réduction des durées de jachère, et, in fine, à la pression démographique (Turner, Hiernaux *et al.*, 2005).

Le dépôt des déjections animales, ou celui du fumier qui en est dérivé contribue au maintien ou à l'amélioration de la fertilité des sols en augmentant la capacité d'échange cationique, la rétention en eau, et en renforçant la structure du sol, ce qui stimule la microflore et la microfaune (Pieri, 1989). Les ruminants des agroécosystèmes culture-élevage assurent un transfert de fertilité, c'est-à-dire une redistribution dans le temps et dans l'espace des éléments fertilisants, en particulier des ressources organiques pâturées dans les jachères et les parcours

vers les terres cultivées. Ce transfert accélère le remplacement des éléments nutritifs dans le cycle de production et réduit de manière considérable les pertes en éléments nutritifs dans les sols très pauvres de ces écosystèmes (Powell, Pearson *et al.*, 2004). En outre, la valorisation des résidus de récolte et la fertilisation organique par les excréptions du bétail n'a qu'un faible coût pour les petits producteurs. Et **l'entretien de la fertilité des sols reste la principale voie pour améliorer la durabilité des systèmes mixtes agriculture-élevage** (Lhoste, 2004). Les bases de ce transfert de fertilité sont cependant dans une phase de transition critique lorsque la pression démographique augmente, menaçant le flux d'atrophie. En effet, les jachères et parcours diminuent avec l'augmentation des surfaces cultivées, et le recyclage se limite à celui des chaumes et résidus de culture. Dans un tel contexte et en l'absence de fertilisation chimique plus coûteuse, les rendements baissent et la satisfaction des besoins alimentaires reste un problème sérieux qui rend les populations vulnérables. La durabilité des agroécosystèmes peut en être mise en cause. En effet, les travaux de Penning de Vries et Van Keulen (1982) ont montré que dans le sud Sahel, la faible disponibilité d'azote et de phosphore est un facteur plus limitant de la production végétale que l'eau. L'azote est déterminant dans la croissance des appareils végétatifs, le potassium joue un rôle déterminant dans l'assimilation chlorophyllienne ainsi que le phosphore (transfert énergétique, métabolisme protéique, régulation ionique et osmotique). On note une complémentarité des besoins en phosphore et en azote de même qu'entre l'azote et le potassium. L'eau peut aussi devenir un facteur limitant dans les zones où la pluviosité est inférieure à 300 mm (Breman et de Wit, 1983).

1.1.3 Les bilans d'éléments nutritifs comme mesure de la durabilité des agroécosystèmes

Compte tenu des baisses de rendements agricoles observés au Sahel, attribuées à la pauvreté et la baisse de la teneur des sols en matière organique et en éléments minéraux, le bilan de ces éléments peut constituer **une mesure concrète de la durabilité** agricole (Van Duivenbooden, 1996; LEAD, 2002). Plusieurs méthodes ont été utilisées en ASS pour évaluer les flux et les bilans des éléments nutritifs dans différents compartiments du cycle (Færgé et Magid, 2004; Schlecht et Hiernaux, 2004; Cobo, Dercon *et al.*, 2010). L'établissement des bilans des éléments nutritifs à travers la modélisation des cycles de ces éléments est une approche qui a souvent été utilisée. Cette démarche a été favorisée par une meilleure connaissance des

processus agro-écologiques et par le développement de l'informatique (Breman, 1993). Ces cycles sont en effet très complexes et souvent plus facilement pris en compte par des modèles de simulation (Tychon, 1993). **Les bilans organiques et minéraux sont devenus des moyens d'exprimer la problématique de la fertilité des sols et la durabilité de ces systèmes de production culture-élevage.** Les bilans établis à l'échelle nationale et continentale par Stoorvogel et Smaling (1990c) et à l'échelle des systèmes d'utilisation des terres, mis à jour par Henao et Baanante (1999) et largement diffusés, ont alarmé l'opinion sur la sévérité de la baisse de fertilité des sols de l'Afrique au Sud du Sahara. Les pertes annuelles d'éléments minéraux étaient évaluées à 22 kg N, 2.5 kg P, 15 kg K en 1982-1984 (Stoorvogel, Smaling et al. 1993a). Toutefois, les auteurs de ces premiers bilans à l'échelle continentale mettaient aussi en avant les limites de ces indications liées à l'absence de données sur les flux liés à l'élevage mobile et aux simplifications utilisées pour le calcul d'autres flux. Depuis, l'approche systémique utilisée pour le calcul des bilans a évolué dans le sens d'une prise en compte des systèmes de production dans toute leur composante (De Jager, Nandwa *et al.*, 1998b). Par ailleurs, l'analyse des processus directeurs des flux qui participent au bilan s'est approfondie en considérant plusieurs échelles aussi bien temporelles que spatiales pour lesquelles la précision de l'estimation varie. Finalement, le résultat des bilans dépend, comme dans le cas des autres indicateurs environnementaux, de l'échelle à laquelle ont été pris en compte les processus biologiques et bioéconomiques correspondants. Il résulte de ces différences de procédure des écarts des résultats et bilans calculés à différentes échelles. La non concordance entre les bilans pose le problème du changement d'échelle nécessaire pour assurer une inter-comparabilité des résultats et leur utilisation opérationnelle. Ces changements d'échelles ont été entrepris sur la base d'extrapolations, de résultats, d'amélioration des modèles par l'utilisation de fonctions de transferts ou d'approche spatiale. Dans sa dernière revue des bilans établis, Cobo, Dercon *et al.* (2010) montrent qu'en dépit des évolutions, la méthodologie la plus utilisée a été celle proposée par Stoorvogel. Les modèles utilisés dans le calcul des bilans vont des outils comme le calculateur NUTMON (Jäger et al. 1998) à des outils plus dynamiques qui intègrent la simulation des processus dans le temps et l'espace (Rufino, Tittonell *et al.*, 2007). Les modèles existants, en dépit de leur performance comportent des insuffisances. En effet, ces modèles distinguent les flux d'éléments qui peuvent être estimés sur la base d'enquêtes sur les exploitations agricoles et les flux qui sont estimés à l'aide de fonctions de transfert (FAO, 2004). Ils s'efforcent de

ramener l'estimation de chacun des flux à la même unité géographique, élément de l'exploitation agricole en général, comme le champ ou la parcelle alors que l'estimation de certains flux n'est pas disponible à cette échelle. Des approximations sont alors effectuées qui affectent la précision du bilan. **Les calculs de bilans sont ainsi confrontés à la dualité de l'organisation spatiale des agroécosystèmes qui caractérise les systèmes mixtes culture-élevage avec une gestion des cultures à l'échelle de la parcelle et centralisée à l'échelle de l'exploitation agricole alors que l'espace sur lequel est géré l'élevage est celui des ressources pastorales communautaires du terroir et éventuellement de la région lorsque la gestion comporte des transhumances.** Dans cette optique la plupart des outils disponibles paraissent inadaptés à l'estimation des différentes composantes du bilan de la matière organique et des éléments minéraux à cause de l'unicité du plan d'information ou de l'échelle de travail. En outre, un des problèmes que pose l'évaluation des bilans à l'échelle de l'exploitation agricole est la représentativité des exploitations échantillonnées. Ainsi, la carence d'une catégorie d'exploitation représentative empêche d'évaluer les interactions entre types d'exploitation et d'acteurs, tels que le confiage d'animaux, les contrats de fumure, qui peuvent être déterminants pour établir le bilan d'une exploitation et donc sa durabilité.

1.1.4 Objectif de l'étude

L'objectif de cette thèse est de proposer un outil opérationnel qui permet une meilleure prise en compte de la dynamique spatio-temporelle des agroécosystèmes culture-élevage dans l'estimation des flux organiques et des bilans partiels d'éléments minéraux qui caractérisent la durabilité de ces systèmes, à l'échelle de l'exploitation et des terroirs.

Cette recherche est dès lors une contribution à :

- (i) l'évaluation de la durabilité des agroécosystèmes culture-élevage par les bilans des éléments minéraux dans un contexte de pression sur les terres et d'utilisation des ressources communautaires par l'élevage
- (ii) la détermination d'indicateurs de risque d'épuisement de la fertilité des sols basés sur les caractéristiques de la gestion des exploitations agricoles et de la gestion communautaire du terroir

Pour ce faire, la quantification des flux de matière organique et celle des bilans sont organisées dans deux systèmes de référence géographique qui conceptualisent les éléments du système agraire et celui des écosystèmes agro-pastoraux. A chacun de ces systèmes de référence correspond un modèle :

- à l'échelle exploitation agricole, le modèle NUTMON (De Jager, Nandwa *et al.*, 1998b) est utilisé pour le calcul des flux liés aux cultures, essentiellement les apports d'engrais organiques et minéraux, et les exportations dans les productions culturales;
- A l'échelle des terroirs agro-pastoraux, un outil a été développé au cours de cette étude : le modèle NUTPAST qui est utilisé pour le calcul des flux liés à l'élevage pastoral, essentiellement ceux de l'ingestion fourragère et ceux de l'excrétion fécale.

Ces deux modèles s'appuient sur les propriétés des systèmes d'information géographique en termes de modélisation spatiale pour simuler la dimension spatiale des flux (Hartkamp *et al.*, 1999; Coppolillo, 2000; Ferge et Magid, 2004). La modélisation spatiale opérée par les systèmes d'information géographiques (SIG) permet, grâce à leur capacité d'intégration des plans d'information (Stoorvogel, 1995; Wade, Schultz *et al.*, 1998; Turner, Hiernaux *et al.*, 2005) d'évaluer les flux de matière organique et d'éléments minéraux à des échelles et organisations spatiale et temporelle mieux adaptées à chacun des processus. Les SIG permettent d'établir le bilan de flux générés par divers processus par intégration géographique puis de l'exprimer par unité géographique appropriée au fonctionnement du système de production agraire (parcelle, exploitation, terroir et communauté). Ainsi, l'articulation des flux issus des deux modèles : ceux qui sont calculés par NUTMON à l'échelle de la parcelle agricole, et ceux qui sont calculés par NUTPAST à l'échelle des unités d'occupation du sol dans le terroir est assurée par les SIG qui en retour préserve la capacité d'analyse des bilans jusqu'à l'unité spatiale élémentaire. Une telle démarche permet de mieux comprendre et d'évaluer avec plus de précision la part de l'élevage dans les flux organiques et minéraux avec des possibilités d'extension aux autres pratiques de gestion des ressources naturelles.

Les bilans partiels déterminés par cette approche d'intégration multi-échelle des flux à l'aide des deux modèles NUTMON et NUTPAST, l'interprétation de leurs variations a été recherchée par comparaison avec les bilans obtenus à l'aide du seul modèle NUTMON, adapté pour une prise en compte de l'utilisation des ressources communautaires. L'évaluation de la durabilité des agroécosystèmes passe par la caractérisation de la situation de fertilité des sols et de son évolution avec la gestion des ressources naturelles avec la perspective de guider les interventions techniques et politiques. Dans cette optique, le maintien de la capacité analytique des bilans permet de faire porter l'analyse, et de proposer des indicateurs à l'échelle des exploitations agricoles dont les bilans peuvent être comparés. Des indicateurs de risque ont ainsi été déterminés par exploitation agricole sur la base d'une typologie des différents niveaux de risque établie sur des caractéristiques propres aux exploitations sahéliennes.

Finalement, ce travail s'inscrit dans l'étude du transfert de fertilité dans les systèmes culture élevage initiée par une équipe de recherche de l'ILRI dans l'ouest du Niger en 1994. En effet, les données analysées dans ce travail proviennent pour la plus part des travaux conduits par l'ILRI entre 1994 et 2006 capitalisés dans un ensemble d'informations (spatiales et tabulaires) sur la région du Fakara (Gerard, Traore *et al.*, 2007). Cette base d'information reste unique dans la région en raison de la taille de l'échantillon (soit 542 familles et une zone de 500 km²) et la prise en compte exhaustive des activités d'élevage dans trois terroirs agro-pastoraux centrés sur les villages de Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey (cf. chapitre 2). Ces informations sont complétées par des données issues de la littérature et de travaux d'étudiants encadrés au cours de cette thèse, et qui ont permis de disposer des informations nécessaires aux calculs des flux et à la compréhension des systèmes de production étudiés. Pour cela, un jeu de données couvrant un cycle annuel complet a été étudié. Les résultats de cette recherche sont en partie d'ordre méthodologique et opérationnel. Ils améliorent en effet la précision des flux et bilans organiques et minéraux et surtout la capacité d'en analyser le fonctionnement.

1.1.5 Organisation de la thèse

Cette dissertation comprend deux parties qui correspondent aux deux plans sur lesquels s'organisent les agroécosystèmes culture-élevage, à savoir la gestion communautaire des

ressources de l'élevage et la gestion des cultures au sein de l'exploitation. La première partie a donc pour objectif l'évaluation des flux et bilans liés à l'ingestion fourragère et l'excrétion fécale à l'échelle des occupations de sols dans le terroir réalisée à l'aide du modèle NUTPAST. Une présentation détaillée de l'évaluation des stocks fourragers (chapitre 3) et de la dynamique temporelle du cheptel du Fakara (chapitre 4) permet de justifier et d'étayer cette démarche d'évaluation du bilan des activités de l'élevage par unité paysagère du terroir (chapitre 5). La seconde partie traite de l'évaluation des flux liés aux cultures à l'aide du modèle NUTMON. Les flux calculés par NUTMON et par NUTPAST sont articulés à l'aide de NUTPAST pour aboutir à l'évaluation des bilans partiels sur les terres des exploitations agricoles (chapitre 6). Ces bilans partiels sont ensuite analysés et mis en regard des caractéristiques des exploitations agricoles. Ils sont finalement utilisés pour la mise au point d'un indicateur de risque d'épuisement de la fertilité des terres et une typologie des exploitations selon les niveaux de risque (chapitre 7).

2 La zone d'étude et la méthodologie générale

2.1 La zone d'étude

2.1.1 Le Niger

Le territoire du Niger se situe en latitude entre 11°37' et 23°33' Nord et en longitude entre 0°06' et 16° Est du méridien d'origine dans l'Afrique Occidentale. Son économie est basée sur l'agriculture, l'élevage et l'exploitation de l'uranium. Le Niger s'étend sur 1 267 000 km², mais une grande partie du pays est désertique. L'agriculture pluviale reste confinée dans une zone qui fait environ 125 000 km². Cette zone agricole est limitée au sud par la frontière nigériane. Elle se rétrécit au fur et à mesure que l'on se dirige d'ouest en est. Le Niger comptait au recensement de 2001 une population de 11 060 291 habitants (INS, 2009). Sa croissance démographique de l'ordre de 3,3% par an (BCR, 2001) est l'une des plus élevées de la sous-région. L'indice de développement humain du Niger est le plus bas de la planète (PNUD, 2009). La population est essentiellement rurale, de l'ordre de 80 % en 2009.

Le Niger comprend 3 grandes zones climatiques (FAO-SMIAR, 2007) :

- ✓ La zone saharienne située au nord avec des précipitations de 0 à 250 mm. Cette région se caractérise par le nomadisme agricole et pastoral dans les oasis et les vallées des massifs montagneux.
- ✓ La zone sahélienne avec une pluviosité comprise entre 250 mm et 500 mm. C'est une zone d'élevage extensif et de culture de mil avec une densité de population élevée au sud. Entre la zone agricole et d'élevage, existe une zone de transition où les deux activités sont intimement liées.
- ✓ La zone soudano-sahélienne (500-900mm) se situe dans quelques régions avec des cours d'eau permanents ou semi-permanents.

Selon la classification agro-bioclimatique de Le Houérou (2009), définie en partie en fonction de la longueur de période végétative active (Figure 2-1), le Niger comprend une zone aride (période de végétation < à 75 jours) et une zone semi-aride (entre 75 et 180 jours).

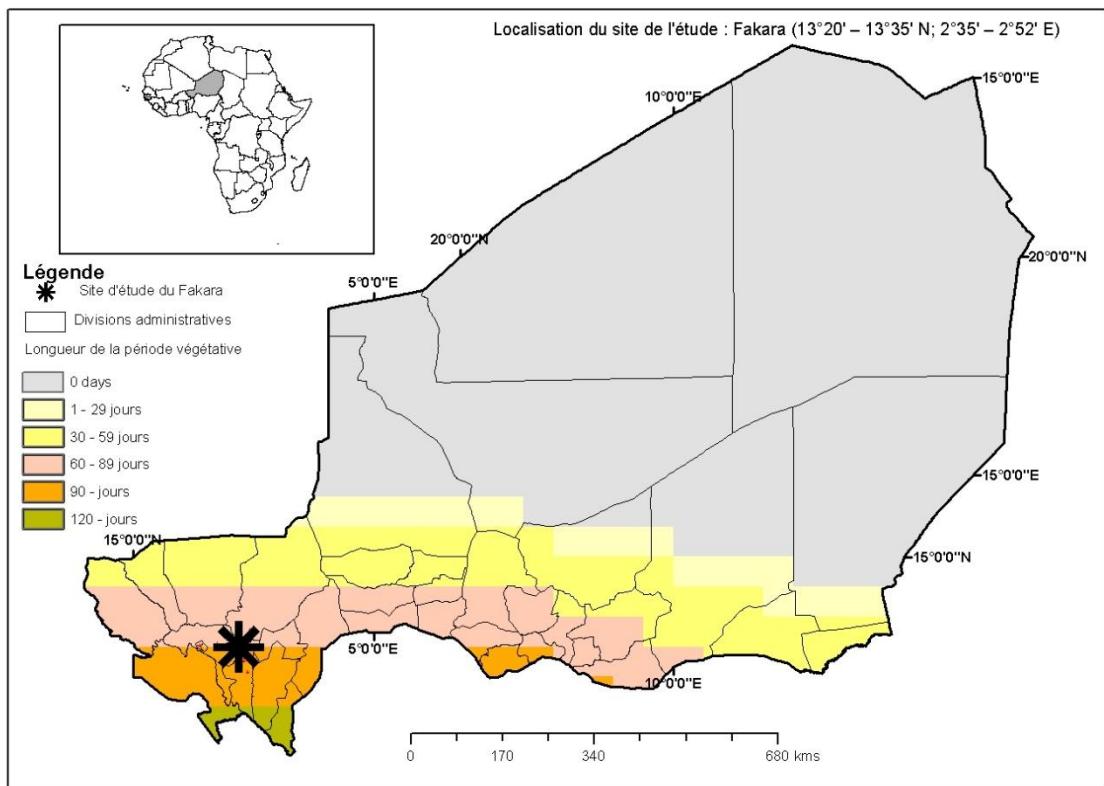


Figure 2-1 : Localisation de la zone d'étude et division bioclimatique du Niger

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 annuels à cycle très court. Dans la zone nord-sahélienne, dominent les arbres, des arbustes épineux dans une formation très ouverte et des graminées annuelles. Cette zone demeure la région de prédilection de l'élevage. Le principal cours d'eau permanent qui traverse le pays est le fleuve Niger sur une longueur de 550 km. Les sols ont été essentiellement marqués par la période du quaternaire. La caractéristique générale des sols agricoles du Niger est leur faible niveau de fertilité et leur sensibilité à l'érosion éolienne. Parmi les sols qui supportent l'agriculture au Niger, on retrouve essentiellement les sols ferrugineux tropicaux les plus utilisés pour l'agriculture pluviale. Les sols hydromorphes ont une fertilité moyenne à bonne et supportent les cultures de diversification (oignons). Les vertisols sont utilisés pour la riziculture mais ils sont peu aménagés.

Le pastoralisme et l’agropastoralisme sont les principaux systèmes de production existants au Niger. L’agriculture et l’élevage sont pratiqués par 88% de la population active et représentent 12% du PIB. L’agriculture nigérienne se caractérise par un niveau de croissance moyen de l’ordre de 4.5% entre 2002 et 2007 soit une croissance par habitant en dessous de 2%. Les superficies cultivées sont en croissance continue et l’occupation des sols atteint les sols incultes. L’une des causes de l’extension des zones agricoles est la croissance démographique. Des mesures de sécurité amènent les agriculteurs à augmenter les surfaces cultivables. Cette tendance ne peut se poursuivre à cause de la pauvreté des sols. A l’inverse des superficies, les rendements agricoles n’‘évoluent guère. Les rendements de la culture principale, le mil, stagnent à un niveau moyen national de 400 à 500 kg /ha (FAO, 2010) avec une croissance des superficies agricoles évaluée à 2.4%.

Trois grands types d’élevage existent au Niger avec des variantes : le pastoral pur ou nomade, le pastoral transhumant et l’agropastoralisme. Ce dernier comprend aussi le système d’élevage sédentaire des zones agricoles. Les élevages urbain et périurbain se sont développés ces dernières années autour des grandes villes (Bodé, 2004). Ils assurent l’approvisionnement en produits laitiers des centres urbains.

2.1.2 Les terroirs du Fakara

Le Fakara se situe dans l’ouest du Niger. Il a fait l’objet de nombreuses recherches scientifiques depuis les années 1990 (Hiernaux et Ayantude, 2004) à nos jours. Ces interventions scientifiques dans la région se sont intéressées à plusieurs questions dont les plus importantes sont le transfert de fertilité, l’agriculture et l’élevage, le climat, en somme tous les facteurs qui engendrent ou qui expriment la pauvreté de ces régions (Goutorbe, Lebel *et al.*, 1994; Hiernaux et Ayantude, 2004; Fernández-Rivera, Hiernaux *et al.*, 2005). Face à ces enjeux de taille, plusieurs projets de recherche sont intervenus dans la zone d’étude. Les plus importants sont TropSoils (1991), EPSAT-SG (‘Estimation des Précipitations par Satellite’, Lebel et al. 1997), HAPEX-Sahel (‘Hydrology Atmosphere Pilot Experiment’, Goutorbe et al. 1997). La recherche sur les systèmes de production par le consortium ILRI-ICRISAT-INRAN (‘International Livestock Research Institute’, ‘International Crop Research Institute for the Semi-Arid Tropics’, et ‘Institut National de la Recherche Agronomique au Niger’ respectivement), le PAD (Projet d'aide à la décision-Financement Belgique DGCD) ,

le Projet Changement Climatique (ACDI- AGRHYMET) , le Projet Engrais FAO (GCP/NER/041/BEL) et AMMA ('African Monsoon Multidisciplinary Analysis). Parmi les projets qui continuent de contribuer à la valorisation des données de ces sites, on peut citer les projets du JIRCAS (Japan International Research Center for Agricultural Sciences) ou ECLIS, (Elevage, Climat et Société).

Les localités concernées par la présente étude se situent dans la zone ouest du Niger, dans l'arrondissement de Kollo et dans la commune rurale de Dantiandou dont le chef-lieu Dantiandou (lat. 13°20'-13°35' N; 2°35'- 2°52' E) est situé à 75 km à l'est de la capitale du Niger Niamey (Figure 2-2). Avec la loi N°2002-014 du 11 juin 2002³, le canton de Dantiandou (avec pour toponymie Diantchandou) est devenu une commune rurale avec pour chef-lieu Diantchandou). Une autre commune appelée Fakara a été créée dans le même arrondissement avec pour chef-lieu Kobodey (13°9'50N, 2°31'31E)

Les trois terroirs étudiés, Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey couvrent une zone de 500 km² environ et sont situés dans cette région naturelle entre le fleuve Niger à l'ouest et la vallée fossile du Dalol Boboïe ou Bosso à l'est. Le choix de cette zone, outre le fait qu'il caractérise une grande bande zonale du Sahel, est justifié par l'existence d'une grande homogénéité dans les facteurs biophysiques et de grandes disparités dans les pratiques paysannes (Turner, 1995a; Hiernaux et Ayantude, 2004). Dans le domaine de la gestion des ressources naturelles, la notion de terroir reste toutefois variée. Nous reprenons ici celle donnée par Loireau (1998) qui définit le terroir comme "*un espace rural géré par une communauté qui affirme y exercer des droits d'exploitation et d'occupation dans un cadre socio-économique et culturel défini*". Cette définition exprime le contenu sociologique, juridique et socio-économique du terme terroir. Cet espace rural peut être composé de plusieurs villages. Dans la mise en place du système d'information géographique des terroirs (Turner, 1995a) et des activités relatives au suivi des troupeaux (Turner, 1995b), 34 villages sont géoréférencés (Figure 2-3). Les villages enquêtés pour le suivi des troupeaux sont les suivants :

³ **Loi 2001-023 du 10 août 2001** organise la République du Niger en régions, les régions sont subdivisées en départements, les départements en arrondissements et les arrondissements en communes.

- ✓ Site de Banizoumbou: Banizoumbou, Tondi Kiboro, Sama Dey, Koma Koukou, Boundou, Bani Kan, Maourey Zeno, Banka Dey, Youloua
- ✓ Site de Tchigo Tegui : Tchigo Tegui, Gorou Yena, Boundou Warou, Katanga, Bagouwa
- ✓ Site de Kodey: Kodey, Dandiré, Komoguindi Zou, Komoguindi Beri, Teguey, Niabere Djambé.

La description des terroirs de Banizoumbou et des deux autres terroirs a été en grande partie réalisée par Loireau (1998) et par Hiernaux et Ayantude (2004) en relation avec les thèmes de la dégradation du milieu et du transfert de fertilité. La présentation des trois terroirs se basera surtout sur ces deux publications, en mettant l'accent sur les informations biophysiques, socio-économiques, et du système d'information géographique de la base de données ILRI qui ont fait l'objet de plusieurs publications (Turner, 1995a; Turner, 1999c; Turner et Hiernaux, 2002; Turner, 2003; Hiernaux et Ayantude, 2004; Turner, Hiernaux *et al.*, 2005; Hiernaux, Ayantude *et al.*, 2009).

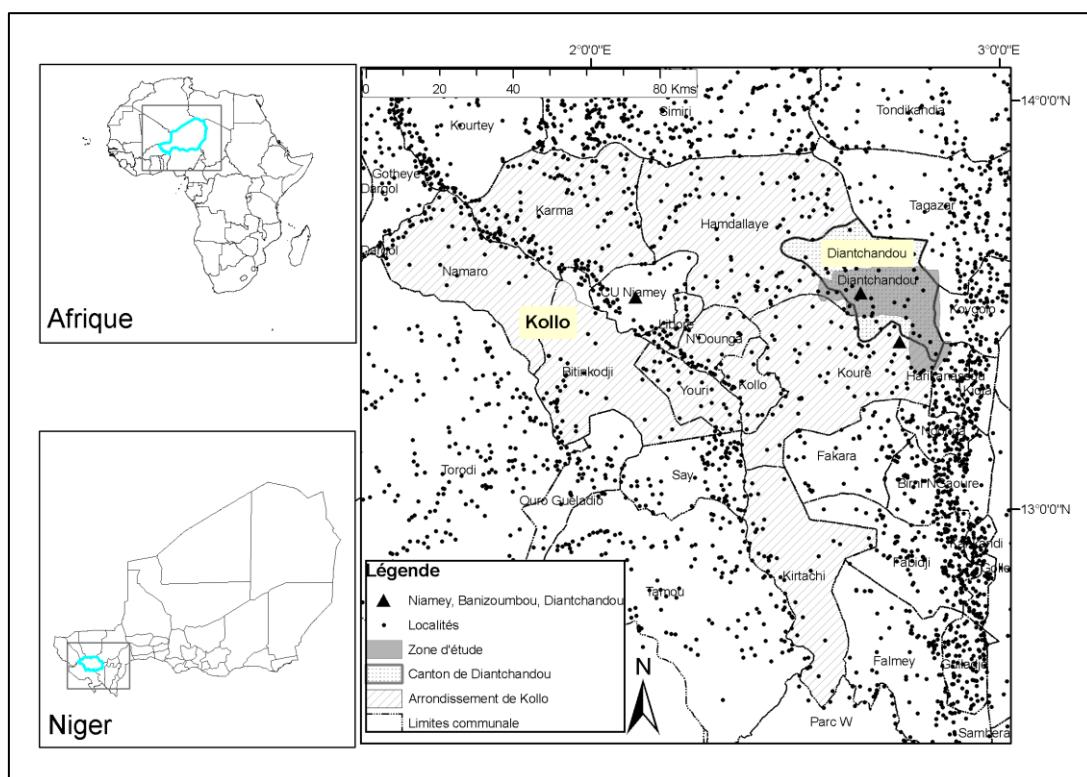


Figure 2-2: Carte de situation de la zone d'étude par rapport au pays le Niger.

Cette carte présente la densité des villages le long du Dalol à l'Est du site et le long du fleuve Niger à l'ouest

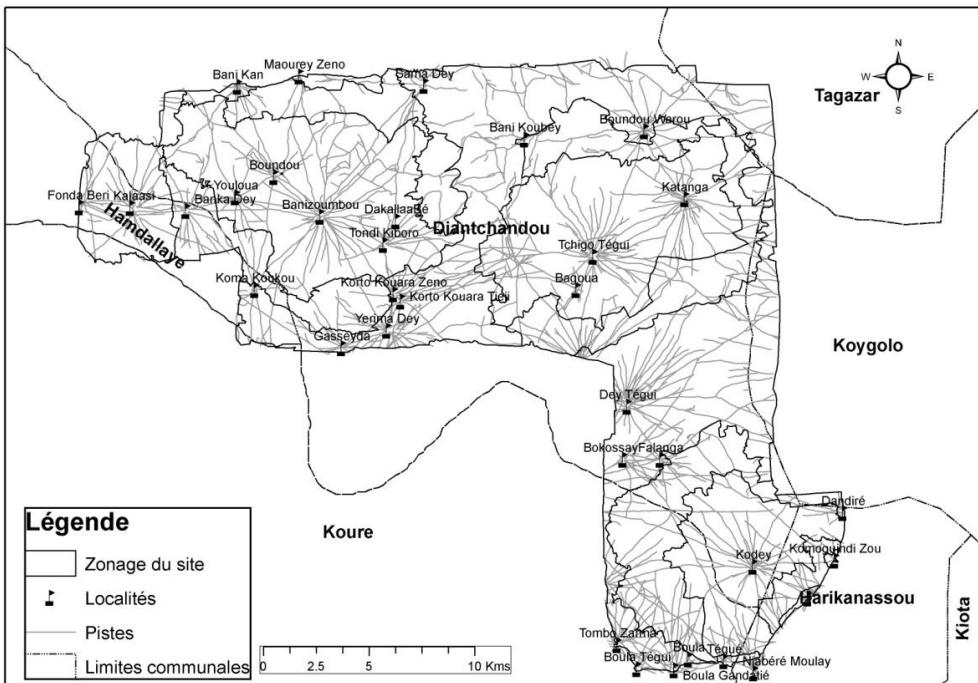


Figure 2-3: Localisation des villages des sites d'étude

2.1.2.1 Le climat

Le site d'étude se trouve dans la zone semi-aride de l'Afrique de l'Ouest (cf. Chapitre précédent) avec une variabilité interannuelle du régime pluviométrique, elle-même déterminée par celle de la mousson uest-africaine (Cappelaere, Descroix *et al.*, 2009). La station pluviométrique qui a longtemps été utilisée pour caractériser la pluviosité de ce site a été celle de Niamey et des stations de mesure du projet EPSAT et HAPEX à partir des années 1992 (Lebel et Le Barbe, 1997; Lebel, Taupin *et al.*, 1997). Les séries les plus longues sur la station de Niamey débutent en 1905 (AP3A, 2002). La moyenne de la pluviosité annuelle de Niamey (1905-1989) est de 564 mm avec 99% entre le 15 avril et le 15 octobre (556 mm) et 95% entre le 1er mai et le 1er octobre (539 mm) (Lebel, Taupin *et al.*, 1997). La pluviosité annuelle de la station de Banizoumbou (1991-1993) est respectivement de 462 mm, 453 mm et 440 mm pour la moyenne et les mêmes intervalles de jours considérés pour Niamey. (Lebel, Taupin *et al.*, 1997). Les climatologues distinguent au cours des 50 dernières années, deux grandes périodes sur le plan de la pluviosité annuelle : la période située avant 1968 et la période d'après cette année. En effet, en analysant les données de la station de Niamey, la période 1950-1967 est considérée comme une période de référence pour les conditions humides extrêmes et la période 1968-1989 comme une période de référence pour les années

sèches (Lebel, Taupin *et al.*, 1997) . Ces périodes sèches se sont poursuivies après 1989 et les déficits calculés sur la période 1968-1997 étaient de l'ordre de 30% (Cappelaere, Descroix *et al.*, 2009) . Ces déficits sont essentiellement liés aux variations saisonnières de la pluviosité du mois d'août (Lebel et Ali, 2009). Les valeurs standardisées de la série de Niamey montrent une grande fréquence de valeur en dessous de la moyenne entre 1970 et 2000. La pluviosité moyenne des différentes stations autour de Niamey jusqu'en 2000, a un maximum à Niamey de 539 ± 15 mm. Les coefficients de variation sur l'ensemble des stations dépassent les 20% avec un quantile 25%, correspondant à une pluviosité d'une année sur quatre, ne dépassant guère 450 mm (Table 2-1). L'identification des périodes de rupture par la méthode de Rodionov (2004) entre 1905 et 2000 indique une tendance à la hausse du cumul pluviométrique en 1918, en 1988 et des tendances à la baisse en 1931, 1980 et 2000 (Figure 2-4).

Table 2-1 : Cumul pluviométrique (mm) dans les stations proches de la zone (mars à novembre).

NOM	LATITUDE	LONGITUDE	ANNEE	Min	Max	Mean	CV	Quantiles25
NIAMEY AERO	13.48	2.17	1943 - 2000	224	914	533	27	433
NIAMEY VILLE	13.50	2.13	1905 - 2000	233	1127	539	26	450
KOLO	13.30	2.35	1931 - 2000	170	932	528	27	429
KARMA	13.67	1.82	1977 - 2000	115	663	420	30	341
HAMDALLAYE	13.55	2.40	1981 - 2000	243	541	399	20	340
DANTCHANDOU	14.40	2.75	1981 - 2000	257	602	423	22	370
KOURE	13.30	2.57	1981 - 2000	267	666	441	24	372

Source : (Base de données AP3A – SGBD 5.2)

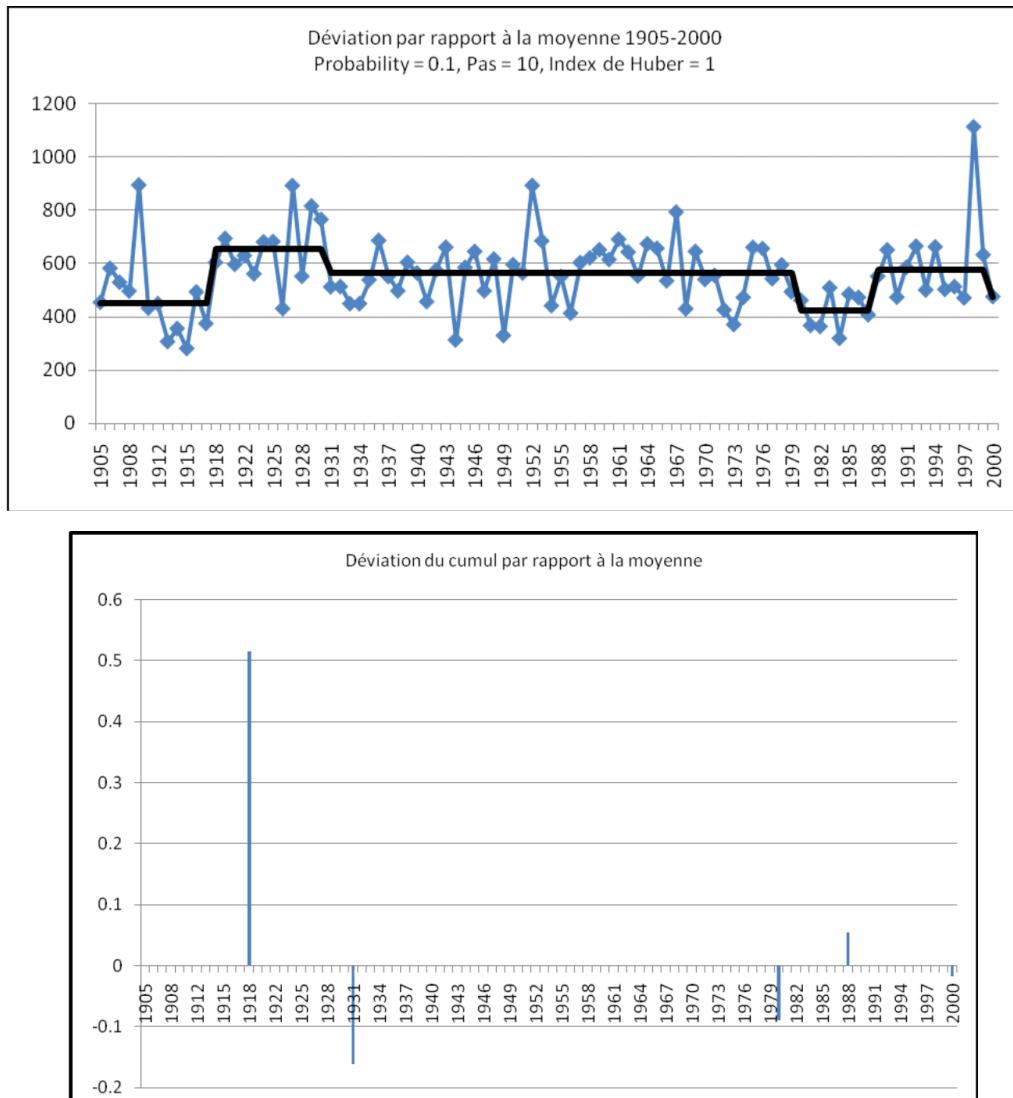


Figure 2-4: Seuil de rupture dans la série climatologique 1905 -2000 de la station de Niamey
(1905-2000)

Cette élaboration a été réalisée par le programme de Rodionov (2006)

2.1.2.2 Morphopédologie, Relief

Le relief est très peu marqué avec un dénivelé maximum de 100 m sur la surface totale. La structure géologique est de type continental terminal formée de grès des dépôts du miocène. Ce dernier couvre le complexe cristallin du précambrien. Les zones du continental terminal sont localement couvertes par un dépôt sableux du quaternaire qui forme des dunes orientées ENE, OSO dans la partie nord et nord ouest. L'ensemble de la zone se trouve dans le bassin sédimentaire de l'Iullemmeden. Ce bassin couvre une grande partie de l'ouest du Niger et de l'est du Mali selon les études écologiques (Hiernaux et Ayantude, 2004). Sur le plan de la géomorphologie, on peut distinguer 3 grands faciès ou ensembles morphopédologiques (Figure 2-5, Figure 2-6) organisés le long des pentes selon Ambouta et Valentin (1996):

Les plateaux cuirassés

Les plateaux de la région sont de vastes plateaux tertiaires, reposant sur un soubassement cristallin très profond qui n'affleure qu'en bordure du fleuve en système granitique et gréseux assez tourmenté. Ces plateaux sont formés de terrains silico-argileux ayant une carapace ferrugineuse de latérite de 0.5 à 4 mètres d'épaisseur. L'infiltration est faible, le ruissellement et l'évaporation sont importants. Ces plateaux s'élèvent en pente douce vers le nord. Ce sont des cuirasses ferrugineuses qui abritent une 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, quelques ensablements sont réservés à la culture. Après les plateaux suit un talus avec une pente forte de l'ordre de 35% composé de gravillons sombres.

Les replats de mi-pente, les talus ou jupes sableuses

Ils sont situés à la base des plateaux et sont constitués de sables rouges. Ce sont des dépôts de l'erg ancien datant de l'Ogolien. Deux zones existent, 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 (Loireau, 1998). Ces jupes sableuses⁴ supportent une couverture pédologique constituée de sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés (Ambouta et Valentin, 1996) et font l'objet d'une intense mise en culture. Ils sont creusés de ravines dues à

⁴ Selon Ambouta et Valentin (1996) qui sont à l'origine de cette terminologie, cette structure ressemble à l'image d'une jupe enserrant les hanches d'une femme (Page 270)

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.

Les bas-fonds ou vallées

C'est le plus bas niveau de la toposéquence représentée par des fonds de vallées sèches. La texture est sableuse à argilo-sableuse avec des sables plus clairs et une pente faible. Sur les bas-fonds on distingue les replats et contre-pentes très dégradés. Ce sont des koris où viennent stagner les eaux de ruissellement ; c'est le domaine des sables clairs et des cordons dunaires avec des pentes de l'ordre de 1 %. L'infiltration est très élevée, par contre le ruissellement et l'évapotranspiration sont limités. Les cordons dunaires forment une macro-structure superposée aux ensembles précédents très cultivée et recouverte de sable alluvial des anciennes vallées du fleuve que constituent les Dallols. Le Dallol présent dans le Fakara, est orienté nord-sud et constitue la limite est du Fakara. Selon la cartographie réalisée par l'ILRI sur les trois terroirs, les replats de mi-pente et les talus (jupes sableuses) représentent 64% de l'espace, les plateaux 24% et les vallées 12%.

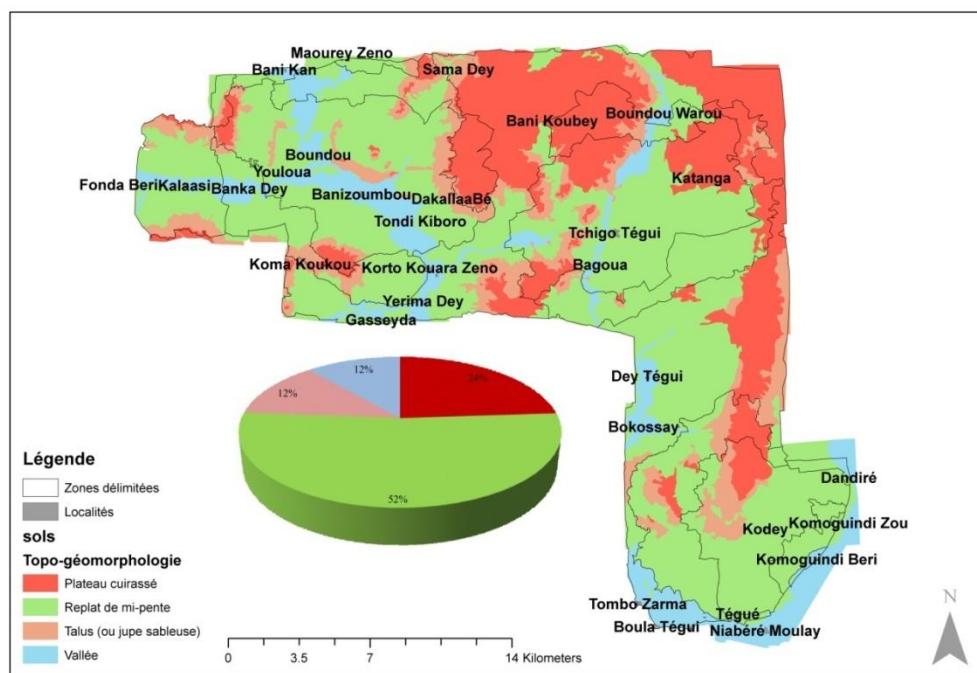


Figure 2-5 : Carte topo-géomorphologique des trois terroirs

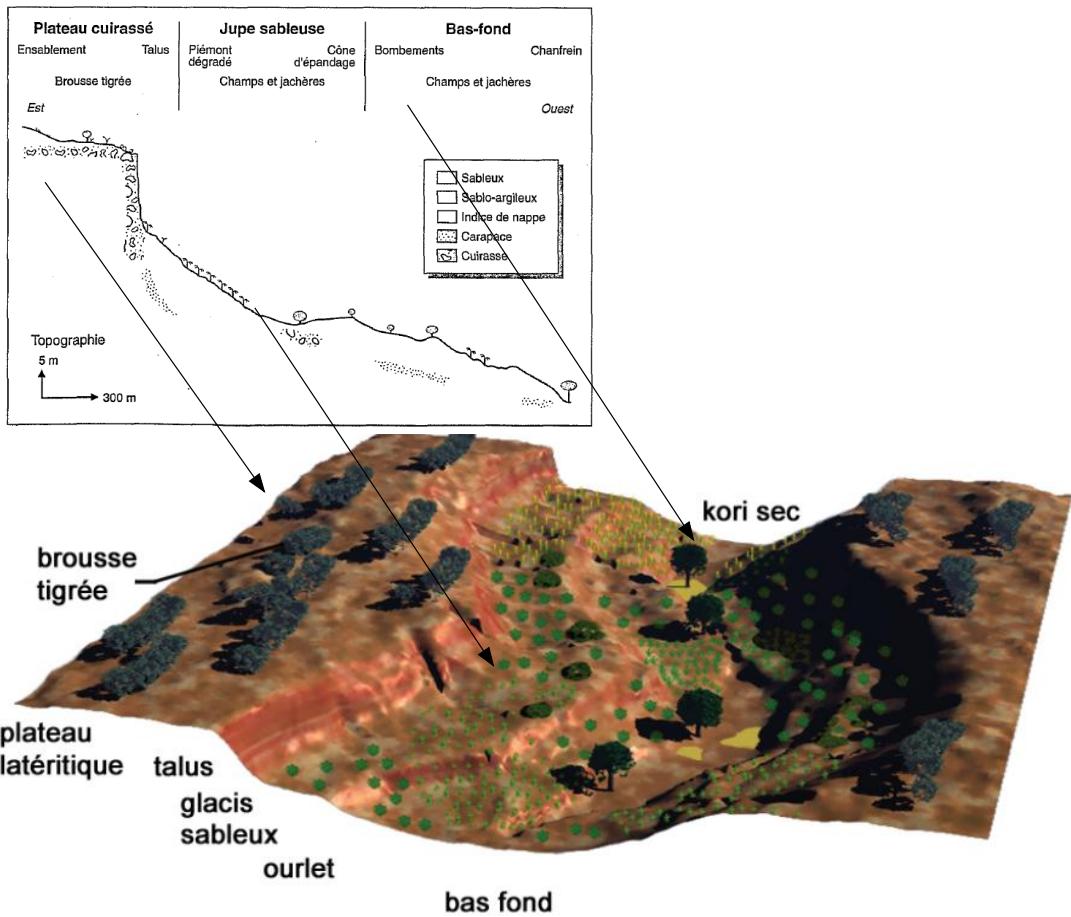


Figure 2-6: Agencement spatial des unités géomorphologiques de Banizoumbou

(source : Ambouta et Valentin, 1996) combinées aux systèmes de paysage d'une région similaire au Fakara la région de Kollo sur le plan géomorphologique (repris de : Massuel, 2005 et modifiée)

2.1.2.3 Les sols

La cartographie des sols de la région d'étude a été réalisée par Hiernaux (1996) sur l'ensemble des terroirs sur la base de quatre critères qui sont la topographie, la géomorphologie, les caractéristiques texturales et la profondeur. La superficie cartographiée dans le système de coordonnées WGS 1984 et UTM Zone 31 Nord est de 52107 hectares soit environ 521 km². La classification retenue pour le tableau des caractéristiques physico-chimiques est celle de la base mondiale des ressources en sols (FAO/ISRIC/ISSS, 1998) avec un tableau des correspondances avec les autres nomenclatures, française, américaine (US Taxonomy) et les appellations en langues locales. La nomenclature FAO retenue est formée d'une part des

nom des unités de sols et des noms des groupes de référence⁵. Les groupes de référence existants sont les Leptosols (LP), les Arenosols (AR), les Lixisols (LX), les Cambisols (CM) et les Gleysols (GL). A chaque groupe de référence retenu parmi les 32 groupes contenus dans la base mondiale, un suffixe est ajouté (Nachtergael, Spaargaren *et al.*, 2000). Les différentes dénominations depuis la classification mondiale jusqu’aux dénominations locales sont des règles fortement recommandées dans la cartographie des sols à grandes échelles inférieures à 1:250 000 (FAO/ISRIC/ISSS, 2006). Au niveau mondial, la carte des sols de la zone ouest du Niger comprend essentiellement les grands groupes de sols de type Arenosols et Lixisols. Dans les autres classifications (Table 2-2), ces sols appartiennent respectivement au Psamments et aux Alfisols de la taxonomie américaine, aux sols minéraux bruts, sols peu évolués et sols lessivés ou sols ferralitiques faiblement appauvris de la classification française (Commission de Pédologie et Cartographie des Sols, CPC). Ce type de sol présent en partie dans les zones arides et semi-arides est très pauvre en éléments nutritifs et très sensible à l'érosion. Les Lixisols, très fréquents dans le sud sahel sont connus aussi pour leur faible capacité de rétention des cations. Le matériel initial des sols actuels provient des modifications intervenues au Pléistocène donnant aux sols du Fakara leur caractère polygénique. L'ensemble des sols cartographiés dans le Fakara (Figure 2-7) se décompose suivant les deux grands groupes en Arénosols et Lixisols qui représentent respectivement 38% et 48%. Les autres grands groupes représentent 14%. En prenant en compte les différents types de sols (grands groupes de sols et leurs suffixes), cette répartition ne change pas. Les Arénosols Ferralic (ARfl) et les Lixisols Arenic (LXar), les plus importants, représentent respectivement 27% et 55% dans les trois terroirs.

Plusieurs études conduites dans les sites étudiés ont permis de faire des relevés des sols et des analyses des propriétés physico-chimiques (Bielders, Rajot *et al.*, 2002; Olivier, 2005; Manyame, 2006). Les paramètres physico-chimiques indiquent des sols dont le rapport C/N reste inférieur à 12% et une toxicité aluminique de 97% (Table 2-3).

⁵ La nomenclature des sols de la base mondiale de référence des sols retenue en 1998 par la l'Union Internationale des Sciences de Sols comprend 30 groupes au 1^{er} Niveau.

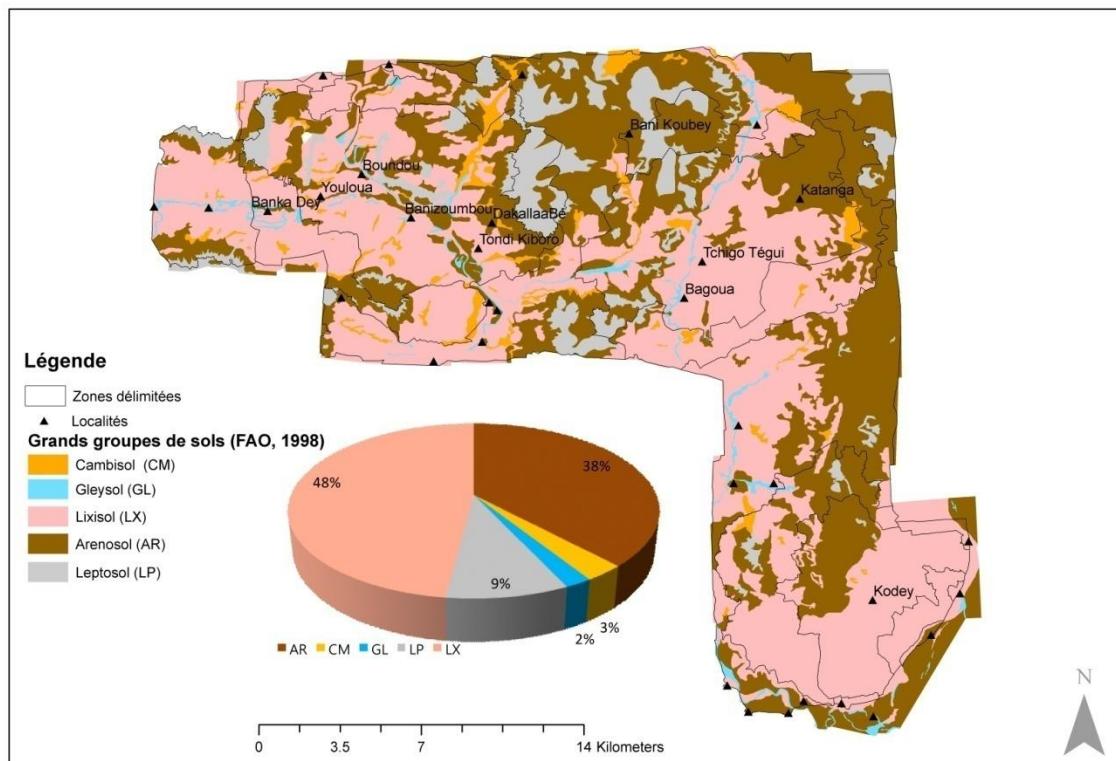


Figure 2-7 : Grands types de sols du Fakara selon la nomenclature mondiale des sols

Table 2-2 : Grands types de sols du Fakara et correspondances avec les différentes nomenclatures (FAO, 1998 ; CPCs, 1996 ; US Taxonomy 1990)

Classification FAO (1998)	Classification Française (CPCS, 1966))	Classification américaine (1990)
Leptosol Skeletic (LPsk)	Sols peu évolués d'érosion régiques à facies ferrugineux	Petroferric Kanhaplustalfs, loamy sands
Arenosol Ferralic (ARfl)	Sols ferrugineux peu lessivés, évolués, série très rubéfiée de plateau	Psammentic Paleustalfs, loamy sands
Lixisol Arenic (LXar)	Sols ferrugineux lessivés faiblement différenciés	Pasammentic Haplustalfs, sandy
Cambisol Arenic (CMar)	Sols peu évolués d'apport, facies ferrugineux sur colluvions ,	Psammentic Haplustalfs, sandy
Lixisol Leptic (Lxle)	Sols régiques sur gravillons ferrugineux, facies ferrugineux	Petroferric Kanhaplustalfs, sandy
Arenosol Gleyic (ARgl)	Sols ferrugineux lessivés a pseudogley de profondeur	Psammentic Haplustalfs, sandy
Gleysol Arenic (GLar)	Sols hydromorphes a gley sur colluvium des vallées sèches	Aquic Quartzipsamments lsandy loams

Les propriétés physico-chimiques des sols du Fakara (Hiernaux, 1996) sont les suivantes :

- ✓ La texture des sols évaluée à une profondeur de 30 cm se caractérise par un taux de sable compris entre 34 et 50% pour les sables grossiers et 35% à 53% pour les sables fins soit un taux de sable de l'ordre de 90 à 95%.
- ✓ Le taux d'argile ne dépasse pas 12%. Le pourcentage de limon varie entre 2 et 8%.
- ✓ Le taux de matière organique est très faible et est compris en 0.15 et 0.2%
- ✓ les sols sont acides avec un PH compris entre 4.6 et 6.2.
- ✓ La CEC est inférieure à 2 meq/100 mg.
- ✓ Les teneurs en azote et potassium sont respectivement de l'ordre de 60 à 250 mg/kg et entre 0.7 et 2.5 mg/kg pour le P-bray1.
- ✓ Les bases échangeables ne dépassent guère 0.09 cmol/kg;

Table 2-3: Paramètres physico-chimiques moyens des sols du site étudié

Paramètres des sols	Unités	(Bielders, Rajot <i>et al.</i> , 2002)		(Olivier, 2005)	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Ph (H ₂ O)		5.10	0.14	5.56	0.33
Ph (KCl)		4.30	0.15	4.51	0.30
P-Bray1	mg/kg	2.10	0.39	5.34	1.51
C organique	%	0.19	0.02	0.17	0.01
Total N	mg/kg	159.00	21.00	Pas de mesure	
K+ Echangeable	cmol/kg	0.07	0.01	0.11	0.02
Ca++ Echangeable	cmol/kg	0.42	0.09	0.20	0.10
Mg ++ Echangeable	cmol/kg	0.17	0.04	0.09	0.05
Acidité échangeable	cmol/kg	0.26	0.10	0.30	0.12
Saturation en Al	%	21.00	8.70	24.00	5.45
CECE ⁶	cmol/kg	0.87	0.09	0.67	0.13
Sable	%	95.00	0.70	93.00	1.50
Limon	%	2.00	0.40	4.00	0.60
Argile	%	3.00	0.60	3.00	0.20
Densité apparente	kg /m ³	1620.00	22.00		

⁶ Dans les expérimentations de Olivier (2005), La capacité d'échange effective (CECE) a été choisie à cause la complexité de la détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et sa variabilité selon le mode opératoire.

2.1.2.4 Végétation

La végétation de la zone varie suivant les unités géomorphologiques, les types de sols et l'intensité des cultures (Hiernaux et Le Houerou, 2006; Hiernaux, Ayantunde *et al.*, 2009) avec une richesse spécifique croissante des zones cultivées vers les pâturages. Les trois espèces dominantes du tapis herbacé dans les zones cultivées sont *Mitracarpus scaber*, *Eragrostis tremula*, *Jacquemontia tamnifolia*. Les autres espèces présentes du tapis herbacé sont des poacées tels que *Cenchrus biflorus*, *Aristida spp*, *Digitaria gayana*, *Ctenium elegans*, et des fabacées telles que *Zornia glochidiata*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Thephrosia spp*, les espèces vivaces sont représentées essentiellement par : *Andropogon gayanus*, *Aristida sieberiana*, *Waltheria indica*. Certaines espèces sont très présentes dans les zones à très forte pression sur les ressources (*Cenchrus biflorus*, *Walteria indica*, *Sida cordifolia*).

Pour les ligneux, l'espèce la plus fréquente est *Guiera senegalensis* qui représente plus de la moitié des masses foliaires avec 71.4% dans les jachères (Hiernaux et Ayantude, 2004). Les espèces toujours présentes dans les parcs agraires sont *Combretum glutinosum*, *Acacia albida*, *Prosopis africana*, *Detarium microcarpum*, et *Sclerocarya birrea*. La répartition de la végétation suivant les toposéquences est la conséquence des actions anthropiques et de la résilience de certaines espèces aux conditions du milieu.

Les plateaux sont caractérisés par une formation à dominance de combrétacées (*Combretum micranthum*, *Combretum nigricans*, *Guiera senegalensis*) (Ichaou, 1995 ; Ambouta, 1996). Cette formation est contractée, c'est la brousse tigrée. Le recouvrement moyen de la végétation sur ces plateaux se situe entre 30 et 50% (Ambouta, 1996). Les herbacées sont surtout à dominance de *Zornia glochidiata*. L'utilisation de ces formations est de type sylvopastoral ;

Les glacis et les jupes sableuses sont caractérisés par une végétation de type savane arbustive. Le tapis herbacé est composé essentiellement des espèces annuelles telles que *Aristida mutabilis*, *Eragrostis tremula*, *Zornia glochidiata*, *Mitracarpus scaber*. La strate ligneuse est toujours dominée par des Combrétacées dont *Guiera senegalensis* et *Combretum glutinosum* (Loireau *et al.* 1995; Lecorguillé, 2000) ;

Les bas-fonds sont caractérisés par une végétation ligneuse composée des espèces comme *Acacia albida*, *Acacia nilotica* et *Piliostigma reticulatum*. La strate herbacée est dominée par des dicotylédones des genres *Corchorus*, *Sida*.

2.1.2.5 Démographie et Activités agro-pastorales

La population du canton de Dantiandou est de 24 948 hbts selon les résultats définitifs du RGP 2001 (BCR, 2001). La population est composée essentiellement par l'ethnie Djerma majoritaire, de Peul, d'Haoussa et des minorités Kel Tamacheck. La zone d'étude qui comprend 10 gros villages et les terres rattachées comptait environ 6000 personnes en 1998. L'agriculture pratiquée par ces populations se caractérise comme dans la plupart des régions du Sahel par des techniques culturales manuelles et par l'élevage. C'est aussi une agriculture de subsistance basée essentiellement sur la satisfaction des besoins alimentaires des ménages. Les cultures les plus fréquentes dans la zone sont le mil, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., en cultures pures ou associées avec le niébé, *Vigna unguiculata* (L.) Walp. Les récoltes sont stockées dans des greniers sous forme de paillote et des quantités de mil sont prélevées suivant les besoins alimentaires du ménage. L'instrument aratoire le plus utilisé est une houe appelée 'Iler' et sert au labour et au sarclage. La pratique de la jachère pour le maintien de la fertilité est courante. Les déjections animales constituent l'apport essentiel de fertilisants quand l'exploitation comporte du bétail. La pratique du parage nocturne dans les champs ou les jachères permet un recyclage de matière organique par le transfert opéré des parcours vers les champs (Powell, Fernandez-Rivera *et al.*, 1995; Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.*, 1997). La culture du mil est très souvent associée au niébé, au voandzou ou à l'oseille. La proximité des marchés de Dantiandou favorise l'émergence depuis quelques années de cultures maraîchères alimentées par de l'eau provenant de puisards. Les terres appartiennent initialement au Djerma et peuvent être prêtées pour de longues périodes ou cédées. On compte en moyenne dans la région 1 à 2.3 hectares par actif avec des variations très importantes entre les ménages.

La pratique de l'élevage est courante dans la plupart des exploitations. Il est surtout pratiqué par les Peuls, mais connaît de plus en plus une répartition dans toutes les ethnies selon le niveau de richesse. Dans cette région, le bétail constitue comme dans la plupart des régions du Sahel, un moyen d'investissement des liquidités. Les espèces présentes sont les bovins

(race Azawak, Mbororo, Djelly et métis), ovins (race Ara ara, Oudah) et caprins. Les équins, les asins et la volaille sont présents avec un effectif faible. Une tendance à l'augmentation des petits ruminants, liée plus au système social de gestion des exploitations qu'à une adaptation environnementale, se constate dans cette zone comme dans toutes les régions du Sahel (Turner, 1999b). La conduite de l'élevage se fait essentiellement au pâturage, dans les zones non cultivées en hivernage et dans l'ensemble du terroir en saison sèche après la libération des champs. Le circuit journalier du bétail est rythmé par la pâture, la traite et l'abreuvement de 6 à 19h. Certains éleveurs pratiquent la pâture nocturne ou "Thogal" de 2h à 6h (Turner, 1995b; Ayantunde, Fernandez-Riviera *et al.*, 2002; Bodé, 2004). Les distances parcourues par le bétail en cette période de l'année sont environ de 7 km. En revanche, en saison sèche, des déplacements en dehors des terroirs sont plus longs et peuvent conduire les troupeaux dans l'Azaouak, plus au nord entre juillet et novembre. En mars et juillet, des déplacements ont lieu dans le sud sur le long du Dallol. L'accès aux pâturages du nord et du sud est menacé par la pression agricole. Les éleveurs rencontrent alors des difficultés d'accès au pâturage, ce qui conduit à des conflits réguliers (Williams, 2003; Turner, 2004). L'embouche des petits ruminants est pratiquée dans quelques exploitations, mais reste limitée à la satisfaction du marché de la fête de tabaski.

Les différentes pratiques agricoles et le système foncier façonnent l'habitat de la zone. Les Djerma qui sont les propriétaires des terrains vivent dans des villages sédentaires et les Peuls, le plus souvent dans les campements à cause de la mobilité, mais aussi du système d'accès à la terre.

2.2 Méthodologie générale

Cette recherche dans l'ouest du Niger utilise en grande partie la base de données issue des travaux de l'ILRI et de l'ICRISAT qui a été largement décrite dans plusieurs rapports et articles :

- ✓ Le système d'information géographique et l'établissement des cartes de pression pastorale sur la base des activités des troupeaux dans Turner et Hiernaux (2002);
- ✓ Le suivi de la végétation herbacée et ligneuse dans Turner, Hiernaux *et al.* (2005) et Hiernaux, Ayantunde *et al.* (2009);
- ✓ Une synthèse détaillée de l'ensemble des méthodologies dans le cadre du rapport du projet DMP par Hiernaux et Ayantude (2004).

Trois éléments essentiels ont orienté la démarche méthodologique de la présente étude:

- ✓ La valorisation des données spatiales ou géographiques. Ces données spatiales ont été très peu utilisées dans les évaluations de bilans précédents (Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.*, 1997; Buerkert et Hiernaux, 1998; La Rovere, 2001; Busqué, 2002; Schlecht, Hiernaux *et al.*, 2004).
- ✓ L'utilisation d'un outil performant à même de permettre une modélisation adéquate dans les règles de l'art des données tabulaires existantes.
- ✓ La recherche et l'application de méthodes de modélisation statistique qui permettent d'améliorer le rendu des bilans des éléments minéraux, pour en dériver des indicateurs de risque.

Les trois éléments cités font dès lors l'objet de ce sous-chapitre à savoir un bref aperçu du système d'information géographique à travers les entités géographiques et les données tabulaires utilisées dans la présente étude, des modèles de bilan utilisés et des approches statistiques retenues.

2.2.1 Les données du SIG

Six objectifs ont été assignés au SIG établi dans la recherche conduite par l'ILRI (Turner, 1995a) dont les deux derniers sont :

In (Turner, 1995a)

- 5. Allow for standard geographic analysis (e.g. buffer analysis, layer intersection) that may be needed to estimate nutrient flows and that may as well prove useful in deriving spatial relationships from empirical data useful for making estimations at a regional level.*
- 6. Provide an effective means by which to graphically present nutrient budget estimations.*

Les données du SIG utilisées dans cette étude sont constituées par les entités géographiques suivantes :

La carte des unités géographiques : les unités géographiques constituent la base de référence à laquelle toutes les données de l'étude du programme de transfert de fertilité se réfèrent notamment celles relatives aux données écologiques, aux activités de l'élevage et au suivi des troupeaux. Les tracés des limites tiennent compte de la géomorphologie du territoire. Une attention particulière a été accordée à l'homogénéité dans l'utilisation de la terre et de la géomorphologie dans les unités, de même que la présence de l'élevage. C'est une unité fonctionnelle qui permet de résoudre le problème de la variabilité spatio-temporelle des occupations de sols à partir d'une approche globale par unités paysagères majeures (d'Herbes, 1995). En effet, eu égard à la dynamique interannuelle de l'occupation des sols dans ce milieu, un champ ou une jachère susceptible d'être laissé en jachère ou cultivée ne pouvait pas être utilisé(e) au cours des enquêtes comme unité de compte pour la comptabilisation des flux liés à l'élevage et aux cultures. Les unités géographiques constituent une alternative stable dans le temps tant au niveau des limites que de la superficie. Dans ces unités, il est possible de définir une proportion d'unité d'occupation de l'espace. Cette notion diffère de celle de terroir. La carte couvre l'ensemble de la zone soit environ 500 km² avec 679 unités géographiques (Figure 2-8)

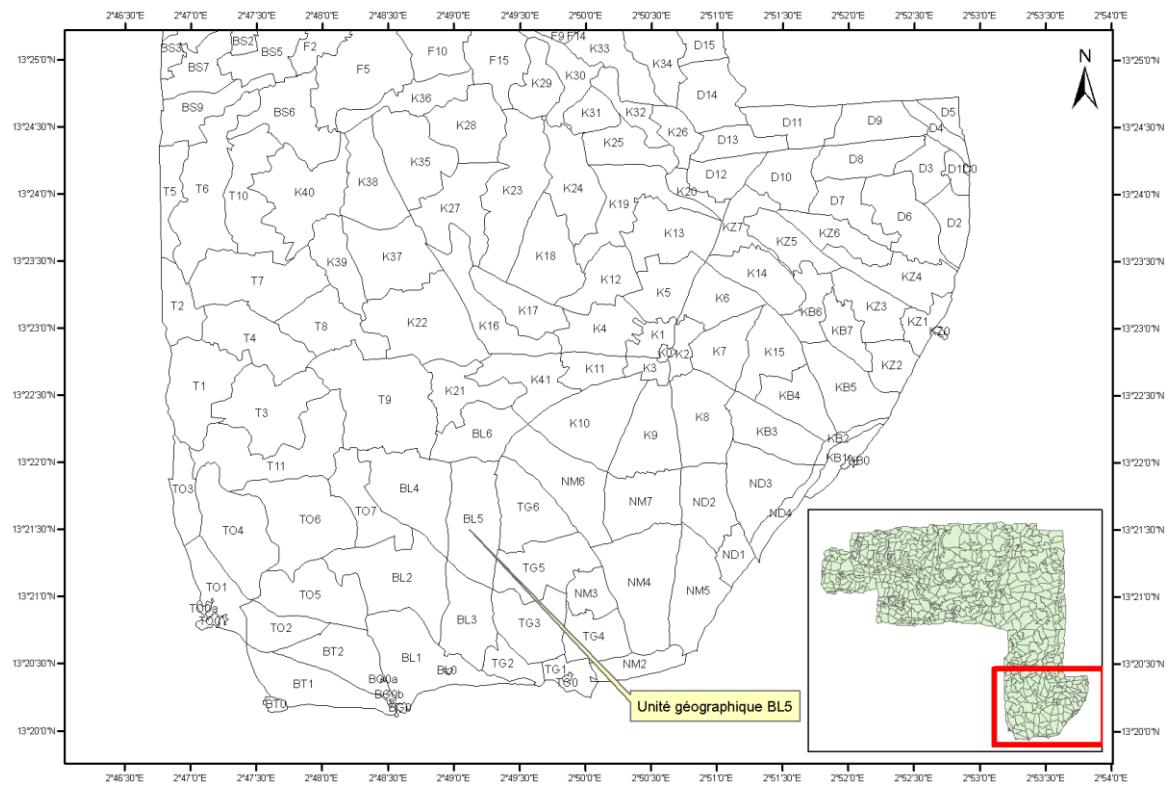


Figure 2-8 : Unités Géographiques pour l'étude des flux organiques, des activités du bétail et la cartographie des bilans du terroir de Kodev.

du bétail et la cartographie des biens du territoire de Kodey
Cette carte représente une partie des unités géographiques dans la région de Kodey. Chaque unité géographique est représentée par un code

Les cartes d'occupation des sols: les cartes d'occupation des sols de la base de données existent pour les années 1950, 1975, 1992, 1994, 1995, 1996 et 2004 et couvrent les trois sites de Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey. A l'exception de la carte de 2004, établie à l'aide d'images de télédétection (Coq, 2005), les cartes ont été établies sur la base de photographies aériennes (Hiernaux et Ayantude, 2004). Les cartes numériques couvrent les trois terroirs avec une nomenclature qui permet de distinguer les zones cultivées, les jachères, les friches, les sols incultes et les zones habitées (Figure 2-9). Les zones cultivées sont subdivisées en deux modalités : cultures avec ou sans fumure dans les cartes d'occupation des sols de 1992 à 2004.

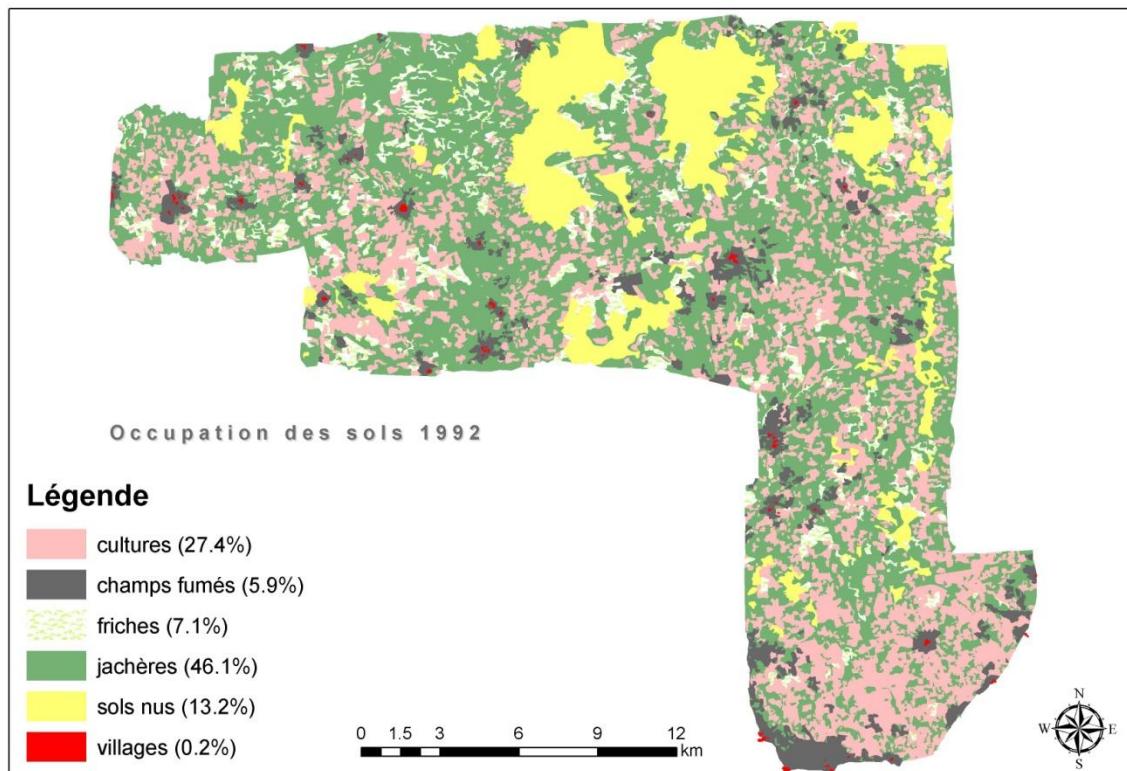


Figure 2-9: La carte d'occupation de 1992

La carte des sols : la carte des sols (Figure 2-10) à l'image de l'occupation des sols, provient d'une interprétation des photographies aériennes et couvre une superficie de 500 km² avec un cadrage géographique de latitude nord 13°20 à 13°35 et de longitude 2°35 à 2°52' (Hiernaux, 1996, Hiernaux et Ayantude, 2004; Hiernaux, Ayantude *et al.*, 2009). Plusieurs travaux menés dans la région ont permis de compléter la base de données sur la carte des sols. Plusieurs critères ont servi à la cartographie des sols dont la position topographique, la morphologie et les caractéristiques texturales. Cette carte donne aussi la nomenclature des classes de sols en langues locales (Peul, Djerma) et leur aptitude agricole.

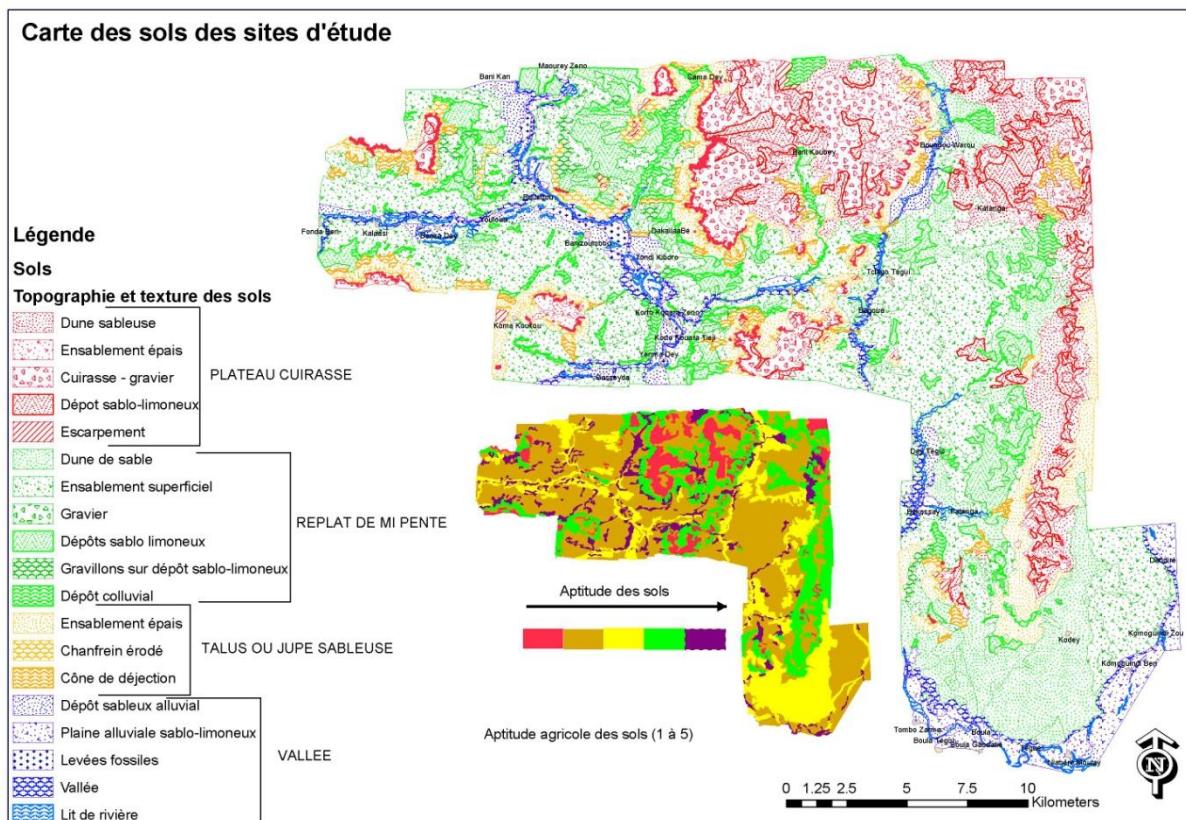


Figure 2-10: La carte des sols de la zone d'étude: Topographie, texture et aptitude

Le parcellaire du Fakara : le parcellaire du Fakara (Figure 2-11) a été réalisé sur la base d'une enquête systématique auprès des chefs de ménage à l'aide des cartes d'unités géographiques. Ce parcellaire a permis de tracer les limites de l'ensemble des terres appartenant à une exploitation du Fakara. Ces terres peuvent être cultivées, en jachère et/ou des terres incultes. Ce parcellaire a été très peu utilisé dans les études conduites dans le Fakara à l'exception des études sur la dispersion du parcellaire et la gestion du risque du projet DGCD (Minet, 2007 ;Akponikpé, 2008).

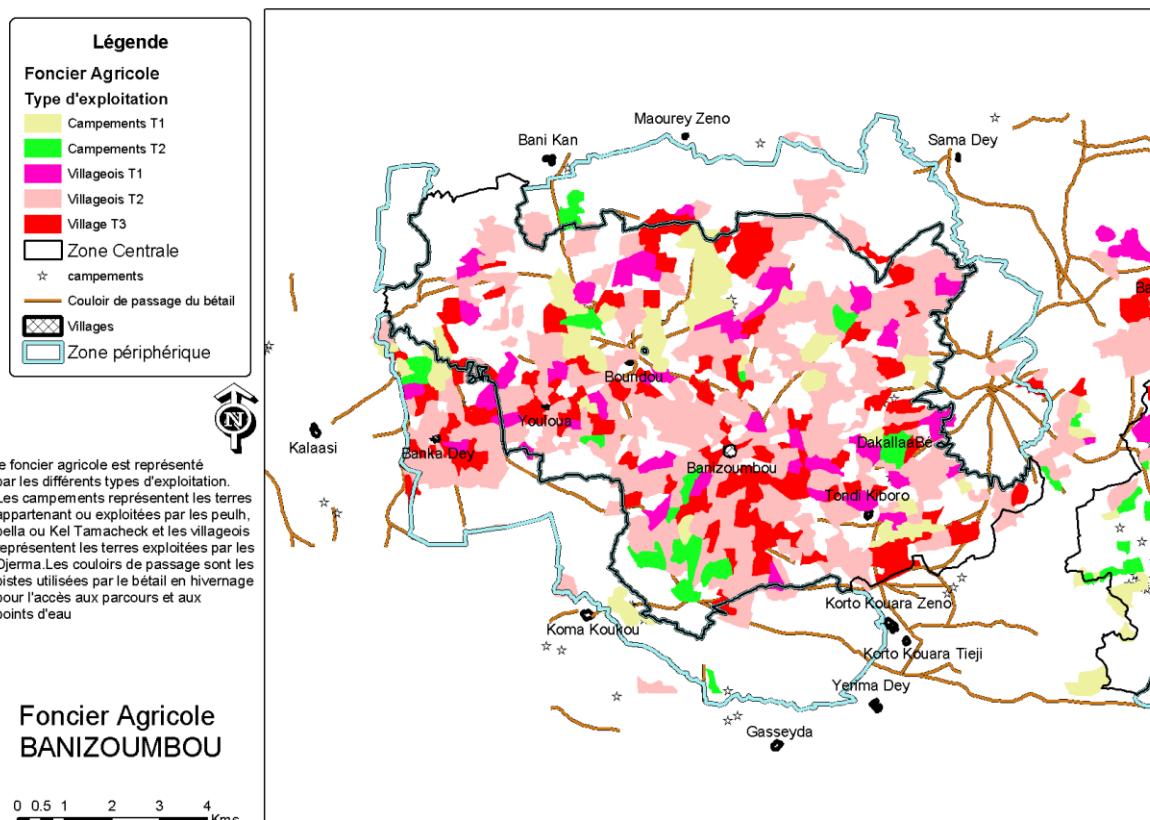


Figure 2-11: Foncier agricole du territoire de Banizoumbou

Les autres couches ponctuelles et linéaires contenues dans la base de données sont:

- ✓ Les campements des Peul
- ✓ Les mares et les points d'eau
- ✓ Les pistes rurales
- ✓ Le réseau hydrographique
- ✓ Les pistes à bétail
- ✓ Les haies

2.2.2 Le cycle saisonnier dans les agroécosystèmes de l'ouest du Niger

La modélisation des systèmes d'élevage extensif posent plusieurs difficultés d'ordre méthodologique à cause de la variabilité temporelle des ressources et des exigences que cela impose aux acteurs en termes de pratique de conduite. L'un des principes admis dans ces approches est le découpage du temps en fonction de pratiques d'élevage et des événements qui marquent le fonctionnement des systèmes étudiés (Landais et Balent, 2001). Les saisons considérées dans cette étude sont fonction du climat et de l'accessibilité aux ressources fourragères (Turner, 1995b). Le découpage qui découle de cette approche comprend 5 saisons (Figure 2-12), dont deux en saison des pluies (HV1 et HV2) et trois en saison sèche (SS1, SS2 et SS3). Ces saisons correspondent à des activités agro-pastorales spécifiques. La distinction en deux périodes de la saison des pluies se justifie par le fait que le démarrage de la saison au Sahel est très variable et peut s'étaler du 15 mai au 15 juillet (Sivakumar, 1988). Dans les cas d'installation tardive de la saison, la période considérée HV1 a un niveau de production très faible par rapport à la seconde période HV2. Les besoins alimentaires du bétail sont assurés par les zones non cultivées. La période SS1 correspond à l'ouverture des champs pour l'utilisation des résidus de récolte. Cette période est relayée par une période très difficile pour l'élevage tant au niveau de la disponibilité des fourrages que de l'eau. C'est aussi la période de départ en transhumance.

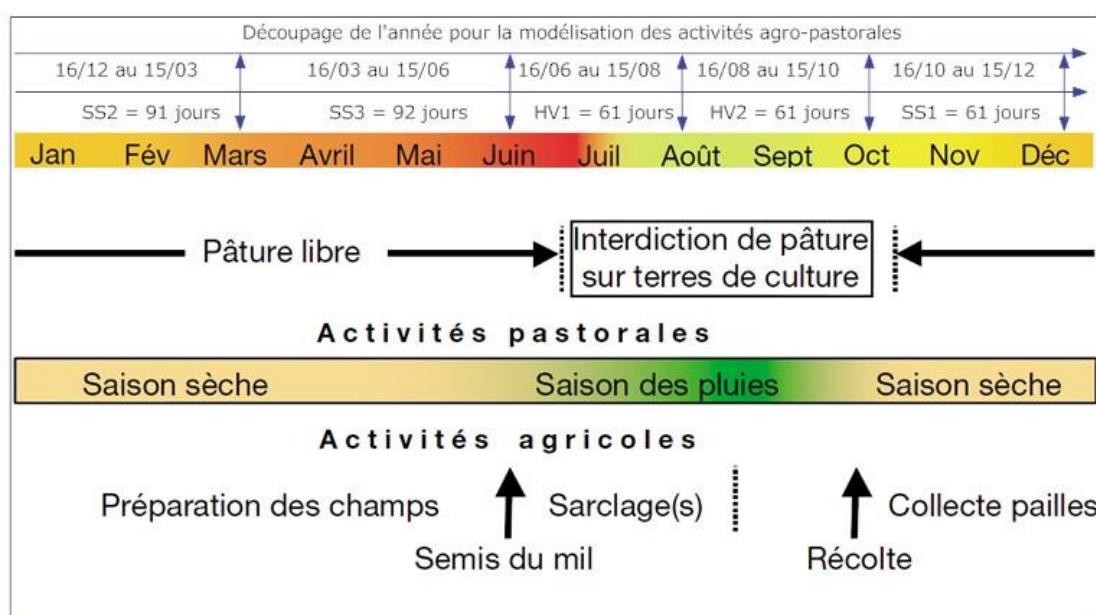


Figure 2-12 : Cycle saisonnier dans les agroécosystèmes sahéliens du Niger

(adapté de Bielders, Rajot *et al.*, 2004 – Page 3)

2.2.3 La modélisation spatiale

Ce sous chapitre introduit l'approche spatiale dont le détail fait partie des méthodologies traitées dans les chapitres 3 à 6. L'utilisation des systèmes d'information géographique pour analyser et représenter les aspects relatifs à la production de masse végétale, les itinéraires des troupeaux ou la notion de risque qui sont des phénomènes très complexes, est une forme de simplification de phénomènes réels. Une telle utilisation passe par une modélisation dans un espace à deux dimensions (coordonnées d'un point) ou trois dimensions (la notion temporelle en plus). L'analyse spatiale consiste en des requêtes, des mesures, des transformations, des analyses statistiques, et/ou de l'optimisation (Longley, Goodchild *et al.*, 2005). La combinaison de ces éléments permet de faire de la modélisation statique pour atteindre un seul but ou de la modélisation dynamique pour simuler des processus biophysiques et socio-économiques. Les modèles spatiaux peuvent ainsi être utilisés dans la simulation, l'évaluation de scénarios, pour la création d'indicateurs de viabilité (pertinence) ou de vulnérabilité. Les modèles spatiaux permettent de simuler des processus de déplacement (érosion ou déplacement d'animaux par exemple), des processus sociaux (transport routier), d'optimiser la recherche de lieu ou de calculer des indicateurs par combinaisons de couches. Selon Cohen et Mering (2001), les modèles spatiaux permettent de répondre à plusieurs types de questionnements tels que la localisation mais aussi de tester plusieurs hypothèses dans un processus pas à pas, et d'étudier les relations entre les aspects sociaux et les autres phénomènes naturels (relation entre les activités pastorales et leurs conséquences sur le milieu par exemple). Turner (2003) dans ses travaux dans l'ouest du Niger, fait ressortir l'importance des SIG à travers la modélisation spatiale pour établir un lien entre les problèmes environnementaux et l'activité humaine.

Les processus utilisés dans ces modèles manipulent des couches géographiques en plusieurs étapes (Cohen et Mering, 2001) pour la création de sorties ou la simulation dans le temps. Leur caractéristique principale réside dans la prise en compte de la variabilité spatio-temporelle des phénomènes. Ces modèles sont dits statiques quand ils ne font pas référence au temps. Dans les modèles qui font référence à l'espace et au temps, on distingue les modèles individuels (simulation d'un seul animal) ou agrégés (simulation de plusieurs troupeaux). Parmi les modèles agrégés, on distingue les modèles de type cellulaires (Type raster avec plusieurs états de la cellule en fonction du temps et des règles de dépendance avec

les cellules voisines) et les modèles multi-agents (plusieurs individus) dans lesquels le comportement d'un individu peut influencer les autres et la géométrie de leur environnement. L'analyse spatiale diffère du modèle spatial en ce sens que le premier est une approche statique qui intervient sur un seul point à la fois avec une répétition des hypothèses à chaque recherche de forme ou d'anomalies (Longley, Goodchild *et al.*, 2005). L'analyse spatiale nécessite une manipulation des données pour retrouver des tendances éventuelles. En revanche, le modèle spatial travaille sur plusieurs points et les hypothèses sont implémentées au départ sur la base d'expérimentations et de scénarios et des propriétés systémiques de l'espace à modéliser. Dans la dynamique des systèmes, Voiron et Chery (2005) définissent trois propriétés systémiques de l'espace géographique qui constituent l'enjeu de la modélisation :

- ✓ le caractère spatio-temporel d'un lieu et les relations existant entre ce lieu et les différents champs de force (financiers, culturels, démographiques) existants,
- ✓ les interactions entre les éléments spatiaux et les éléments anthropiques,
- ✓ le repositionnement des lieux et des objets dans le système en fonction.

Parmi les modèles existants, les modèles spatialisés ou spatialement explicites, dont l'unité de simulation est constituée de cellules de même nature fonctionnelle (unité d'occupation de sols, unité agro-écologique), ont été les plus utilisés dans les études du transfert de fertilité. Ces modèles font intervenir plusieurs composantes des agroécosystèmes tant sur le plan spatial que temporel à savoir:

- ✓ l'occupation des sols qui résulte essentiellement de l'empreinte de l'agriculture et des pratiques de gestion des ressources naturelles,
- ✓ l'utilisation des parcours avec une composante spatiale basée sur une dynamique temporelle liée au calendrier cultural et la saisonnalité de la végétation,
- ✓ la dynamique temporelle des effectifs du cheptel liée essentiellement aux pratiques de gestion des troupeaux, à la saisonnalité des parcours,
- ✓ la gestion de la fumure dans les unités d'occupation des sols.

Ces modèles font généralement intervenir plusieurs types de données qui constituent une des limites de leur mise en œuvre aussi bien dans le temps que dans l'espace. Stoorvogel et Smaling (1998), en comparant les régions de l'Afrique et l'Amérique Centrale en termes d'utilisation des modèles pour l'étude de la fertilité des sols fait ressortir ce problème crucial des données en Afrique sub-saharienne qu'il appelle à juste titre "the tropical parameter crisis".

2.2.4 Modélisation de l'agroécosystème

La complexité des données sur les agroécosystèmes nécessite une modélisation de l'architecture d'ensemble du système. Cette action tient compte des informations sur les différentes composantes tant sur le plan biophysique que socio-économique, des aspects spatiaux et de l'architecture du modèle (De Jager, Nandwa *et al.*, 1998b). L'ensemble des données utilisées pour l'évaluation des flux peut être décomposé en un schéma conceptuel (Figure 2-13) comprenant les composantes biophysiques (la composante sol et ses occupations, la végétation) et les composantes socio-économiques (élevage, homme).

Une modélisation simple des données a été retenue afin de prendre en compte la dimension temporelle et la dimension spatiale des phénomènes étudiés. Elle permet également de séparer les entités spatiales et les tables de données. Sur la base du cadre conceptuel développé, les différentes composantes des agroécosystèmes ont été adaptées à des plans spatiaux pour le calcul des bilans partiels aux différentes échelles. Les données tabulaires utilisées dans cette étude, sur lesquelles nous reviendrons dans le troisième chapitre plus en détail, sont les suivantes:

- Les données de suivi de la végétation ligneuse et herbacée (Hiernaux et Ayantunde, 2004; Hiernaux, Ayantunde *et al.*, 2009) qui expriment, par unité d'occupation des sols dans l'unité géographique, les masses et la description des herbacées et des ligneux (résidus des cultures, herbacées des parcours, arbres et arbustes); Trois mesures ont été réalisées sur des sites échantillons représentatifs des faciès de végétation pour chaque année (octobre, février et juin). L'évaluation du rendement grain fait partie de ces données.

- Les données issues d'une comptabilité régulière, tous les 21 jours, au cours d'une période de 36 mois⁷ de troupeaux d'exploitations suivies, selon les classes d'âge, le sexe et l'espèce.
- Les données relatives aux itinéraires et aux activités des troupeaux suivis (temps de pâture, d'abreuvement, de repos) sur 19 mois. Les suivis font référence aux unités géographiques et aux unités d'occupation des sols fréquentés.
- Les caractéristiques démographiques de chaque exploitation suivie.
- Les paramètres relatifs au contenu en éléments minéraux des productions végétales et des déjections animales suivant les différentes catégories.

⁷ La variable date des bases de données du suivi des troupeaux pour le recensement des effectifs débute le 24/01/1994 et se termine 28/12/1996. Le suivi des itinéraires relatif aux activités débute le 13/04/1995 au 1/12/1996 soit environ 19 mois selon Turner, Hiernaux *et al.* (2005).

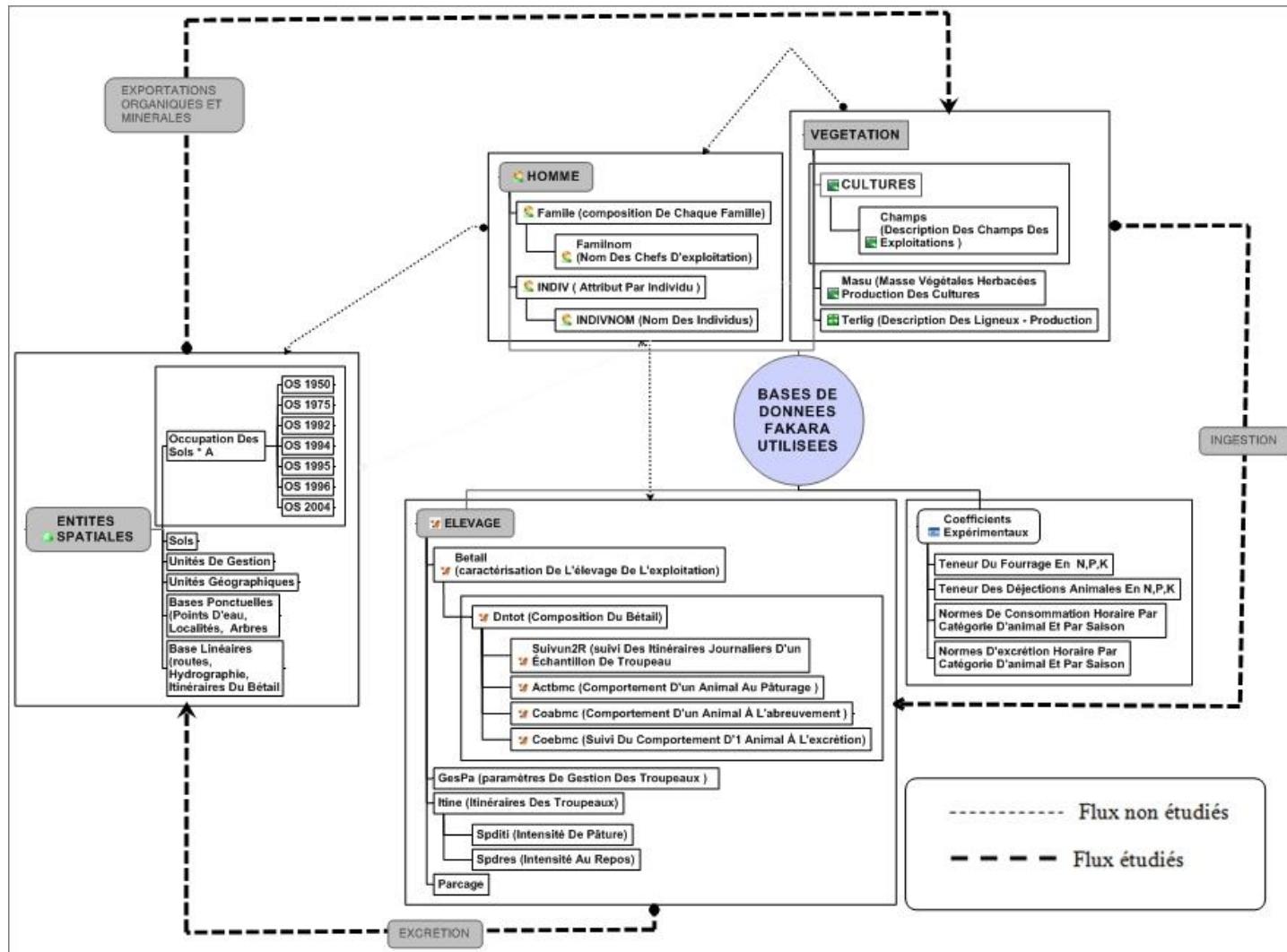


Figure 2-13: Schéma des flux entre les différentes composantes biophysiques et socio-économiques de la base de données du Fakara

Les données géographiques et tabulaires ont été structurées dans l'optique de fixer les différentes relations entre les tables et les objets géographiques mais aussi de faciliter la gestion des données. Le schéma (Figure 2-14) donne une version simplifiée du modèle dans lequel certaines variables ont été omises pour la représentation des différentes entités géographiques (les géodatabase) et des différentes bases tabulaires.

Les calculs des flux et bilans partiels ont été réalisés à travers :

- L'évaluation et la spatialisation saisonnière des masses végétales par unité d'occupation dans l'unité géographique
- L'évaluation et la spatialisation de la pression des troupeaux à la pâture et au repos dans les unités d'occupation des sols au sein des unités géographiques

Les calculs des flux liés à l'élevage au niveau de l'espace des terroirs ont été réalisés par l'outil NUTPAST élaboré au cours de cette recherche. Les flux liés à l'exploitation ont été calculés par NUTMON qui est un modèle de calcul des bilans minéraux basés sur le concept de Stoorvogel (1990a). Une architecture d'articulation et d'emboîtement spatial fait le lien entre les deux modèles pour la génération des entités et des données tabulaires nécessaires au calcul des flux et bilans sur différentes unités (Annexe 2.1). Les flux et bilans, ainsi que les paramètres caractéristiques des exploitations, ont été soumis à une modélisation statistique en vue de caractériser la durabilité des agroécosystèmes à partir des bilans partiels (Figure 2-15). L'approche statistique suivie vise d'une part à déterminer un indicateur de risque d'épuisement relatif de la fertilité des sols, à l'ajuster avec les variables caractéristiques des exploitations, et à en déterminer l'erreur de généralisation. Les précisions obtenues dans cette démarche d'ajustement d'un indicateur de risque devraient permettre de proposer une démarche visant à en évaluer à d'autres échelles avec un jeu de données plus accessible que les enquêtes fines de terrain. Eu égard à la nature des données de bilan, des modèles non paramétriques et paramétriques ont été utilisés dans le schéma d'analyse qui se décompose comme suit :

- Analyse statistique des tendances et comparaison des données de végétation et des troupeaux par des modèles d'analyse de variance et des tests de distribution afin d'identifier les différences entre les modalités existantes.
- Recherche des variables caractéristiques des exploitations agricoles qui ont un effet significatif sur les bilans partiels par la méthode des régressions par quantile.
- Evaluation des tendances logistiques des variables caractéristiques significatives obtenues à l'étape précédente pour l'évaluation d'un indicateur de risque relatif d'épuisement de la fertilité naturelle des sols.
- Ajustement d'un indicateur de risque moyen relatif d'épuisement de la fertilité naturelle des sols par la méthode linéaire généralisé
- Cartographie des risques partiels et du risque moyen d'épuisement de la fertilité des sols.

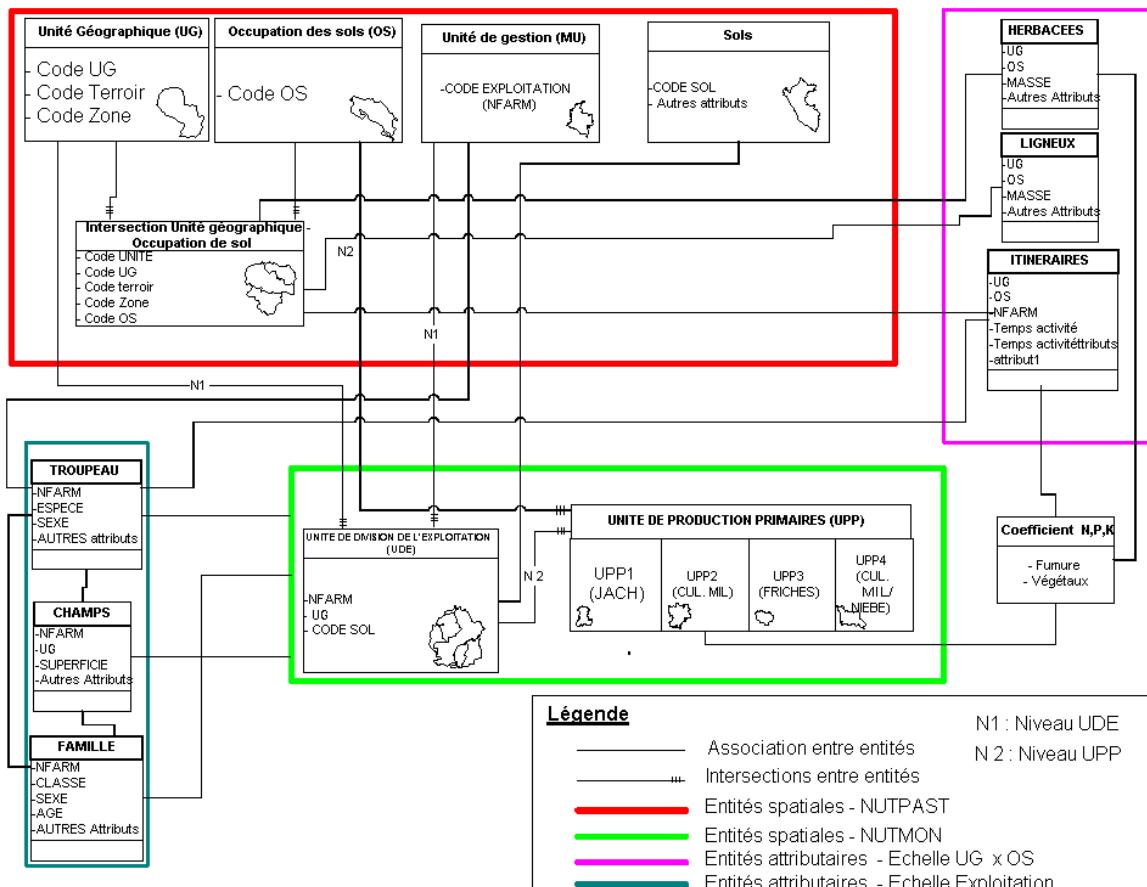
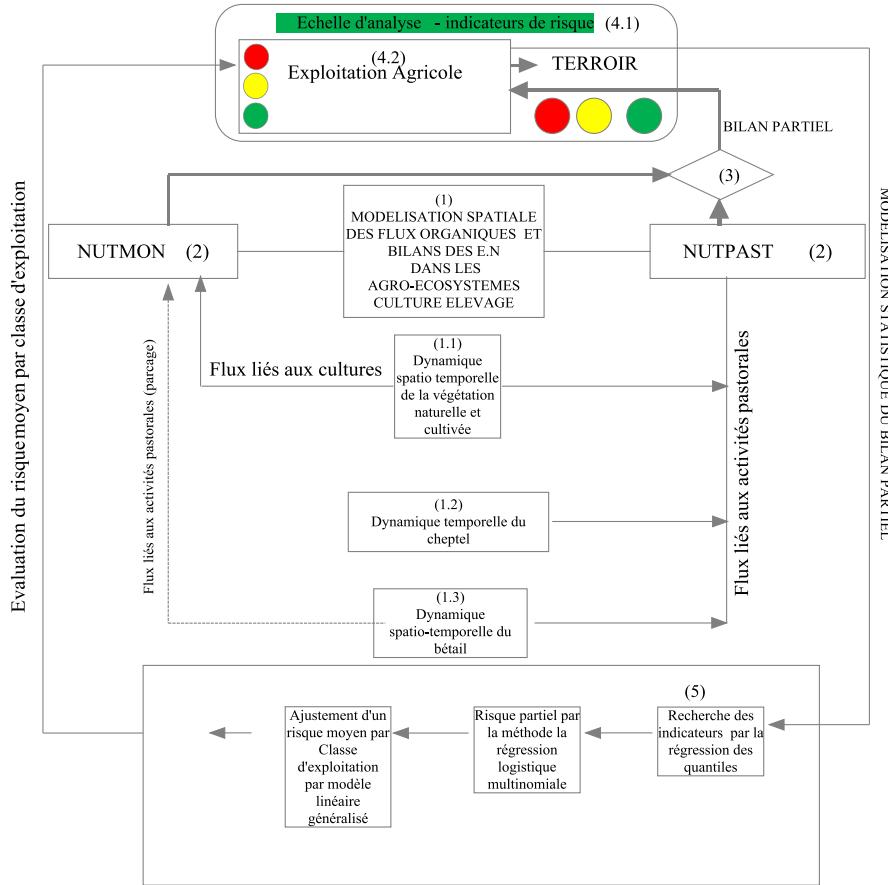


Figure 2-14 : Schéma global de liaison des entités spatiales et des données tabulaires



- Point de départ : modélisation des flux organiques et bilans des éléments nutritifs dans les agro-écosystèmes culture – élevage
- La modélisation s'appuie sur deux approches et deux échelles différentes :
 - L'approche NUTMON à l'échelle de l'exploitation agricole
 - L'approche NUTPAST à l'échelle du terroir dans les occupations de sols

NUTMON est utilisé pour le calcul des flux liés aux cultures au niveau de l'exploitation agricole
- NUTPAST est utilisé pour le calcul des flux liés à l'élevage et intègre les flux de NUTMON pour l'évaluation des bilans partiels ;
- Les flux calculés par NUTPAST à l'aide des flux liés à l'élevage à l'échelle des unités d'occupation et des flux liés aux cultures à l'échelle des champs des exploitations agricoles permettent de déterminer les bilans partiels des éléments minéraux N.P.K.
 - Bilan partiel des unités d'occupation des sols dans les terroirs
 - Bilan partiel des terres de l'exploitation agricole
- Les bilans partiels sont ajustés par des méthodes statistiques pour déterminer des indicateurs de risque d'épuisement de la fertilité. Ces indicateurs sont dits partiels quand ils proviennent de la modélisation d'un seul indicateur et global (moyen) quand ils sont construits sur la base de l'ensemble de plusieurs indicateurs. Les estimateurs des indicateurs donnent leur précision statistique.

Figure 2-15 : Schéma de la modélisation des flux organiques et bilans des éléments nutritifs

Partie 1 : Evaluation des stocks et flux liés à l'occupation des sols, aux cultures et à l'élevage

3 Les stocks de matière organique et des éléments minéraux N, P, K liés à l'occupation des sols et aux cultures

3.1 Introduction

La végétation au Sahel est une des ressources alimentaires principales de l'élevage et une composante majeure de l'écosystème (Hiernaux, 1983) . L'étude de la végétation des pâturages vise à évaluer leur productivité, leur dynamique pour assurer une meilleure exploitation. C'est aussi un moyen d'établir un diagnostic de leur gestion pour en évaluer les potentialités (Boudet, Carriere *et al.*, 1987). Plusieurs facteurs influencent la productivité des pâturages dans les zones semi-arides dont les plus importants sont la disponibilité en eau découlant des pluies et les caractéristiques des sols. Dans ces zones semi-arides, Penning de Vries et Djitèye (1991) ont mis en évidence qu'en dessous de 250 mm, l'eau est le facteur le plus limitatif de la production des pâturages naturels et qu'au dessus de cette valeur de pluviosité, une croissance optimale de la végétation n'est assurée qu'avec une offre en macro-éléments suffisamment importante, essentiellement N, P. Cette disponibilité en éléments nutritifs pour la végétation, en l'absence d'apports artificiels, est définie par Breman et de Ridder (1993) comme étant la fertilité naturelle du sol.

Les méthodes d'études des pâturages dans les pays sahéliens ont évolué sur la base de connaissances nouvelles depuis les études conduites par l'IEMVT (Boudet, 1978). Boudet (1961) décompose ces études en une phase analytique qui comprend l'inventaire détaillé de la végétation et l'appréciation de la valeur bromatologique, et une phase synthétique avec une description des types de pâturages, la spécification de leur valeur fourragère et la cartographie. Dans son étude sur le Gourma malien après les sécheresses de 1971-1973 qui ont décimé plus du tiers du cheptel, Boudet (1979) pour la sauvegarde de l'équilibre écologique du Sahel recommande la mise en place d'un système de surveillance continue qui prend en compte l'évolution des ressources et la charge du bétail. Il préconise les relevés pluviométriques, la mise en place de réseaux de sites d'observation proches des points de mesure pluviométrique de la végétation herbacée et ligneuse et l'inventaire régulier des effectifs du bétail dans les unités pastorales. Plusieurs travaux ont été consacrés par la suite aux méthodes d'étude des pâturages sahéliens (Hiernaux, 1983; Poissonet, Toure *et al.*,

1986; Breman et de Ridder, 1993 ; Bellefontaine, Gaston *et al.*, 1997). Ces observatoires sont aujourd’hui une réalité et couvrent l’ensemble des zones arides et semi-arides (Loireau, Sghaier *et al.*, 2007). Ils concernent la végétation herbacée et ligneuse.

Dans les études de végétation et des ressources fourragères, Hiernaux (1983) distingue trois phases dont :

- ✓ une phase descriptive de stratification de l’environnement étudié et qui sert aussi à évaluer la production fourragère de chaque strate ;
- ✓ une phase diagnostic d’identification des contraintes liées à l’alimentation animale et de propositions visant à résoudre ces contraintes.
- ✓ une phase expérimentale pour évaluer l’impact d’une variable système ou d’une innovation technique.

Les mesures de biomasse végétale et leur évaluation s’effectuent soit par méthode destructive (coupe des herbacées suite à un échantillonnage) ou par estimation indirecte par les données satellites (Hiernaux et Justice, 1986; Justice et Hiernaux, 1986; Hanan, Prince *et al.*, 1991; Djaby, 2000; Crépeau, Bennouna *et al.*, 2003), ou par des mesures indirectes au sol. La mesure des ligneux quant à elle, reste complexe et en raison du caractère destructeur des mesures directes, les mesures sont effectuées à partir des relations d’allométrie (Cissé, 1980 ;Hiernaux, 1980; Le Houerou, 1980; Breman, Kessler *et al.*, 1991a) et aussi par satellite (Franklin et Hiernaux, 1991).

Dans le cadre des recherches de l’ILRI, un suivi de la végétation du Fakara par méthode destructive a été réalisé de 1994 à 2006 (Hiernaux et Ayantude, 2004; Hiernaux, Ayantunde *et al.*, 2009). L’objectif principal de ce suivi a été d’évaluer les variations saisonnières et interannuelles des ressources fourragères. L’évaluation de la dynamique spatio-temporelle de la végétation naturelle et cultivée analysée ici, s’appuie essentiellement sur ces travaux, les travaux complémentaires d’étudiants encadrés au cours de cette thèse (Garba, 2002; Baoua, 2003 ; Tidjani, 2004; Konaté, 2002) et les données de la littérature. Dans ce chapitre, l’objectif est de réaliser plusieurs plans d’information spatiaux sur les stocks de matière organique et des éléments minéraux N, P, K. Ces stocks sont liés à l’occupation des sols et aux cultures, en somme les productions des pâturages cultivés ou non, leur contenu en éléments minéraux N, P et K par occupation des sols dans les unités géographiques. Une

analyse comparative des tendances spatiales permet d'identifier les facteurs de différentiation entre les terroirs, les modalités topographiques et d'occupation des sols.

Les stocks de matière organique et des éléments minéraux N, P, K liés à l'occupation des sols et aux cultures proviennent des compartiments source suivants : les résidus de cultures, la production de grains de céréales, les productions herbacées des zones non cultivées, les productions ligneuses de l'ensemble du terroir. L'accent a été mis sur les ressources végétales vouées à l'alimentation du bétail. Ces ressources ont été quantifiées et leur contenu en éléments minéraux N, P et K a été évalué afin de les intégrer par la suite dans l'évaluation des bilans organiques et minéraux aux échelles de la parcelle, de l'exploitation agricole, de la communauté et du terroir. Ce chapitre comporte les aspects suivants :

- i) la méthodologie d'évaluation et de spatialisation des masses végétales.
- ii) la spatialisation des flux de matières organiques à l'échelle des unités géographiques et des occupations de sol.
- iii) La mise en relation des flux organiques avec l'occupation des sols et la toposéquence, la dynamique temporelle de ces flux, leur contenu en macro-éléments et enfin l'évaluation des stocks de matière sèche aux échelles spatio-temporelles et de gestion.

3.2 Méthode d'évaluation et de spatialisation des biomasses fourragères

3.2.1 Evaluation de la biomasse

Les ressources végétales alimentent une partie importante des stocks de macro-éléments liés à l'occupation des sols et aux cultures. Ces stocks ont été évalués à partir de la quantification des états du couvert végétal à différentes dates du cycle annuel. Les observations sont réalisées sur des faciès⁸ qui correspondent à une combinaison entre types de sol, toposéquence et composition de la végétation cultivée ou non. Les mesures sont répétées à plusieurs dates (octobre, février et juin) pour évaluer les disponibilités en ressources alimentaires du bétail et leur variation saisonnière. La période d'octobre correspond à la fin du cycle annuel de production végétale (herbacées et cultures comprises). Les mesures effectuées au cours de cette période représentent une situation moyenne à la fin de la période des pluies. Les pertes qui interviennent au cours de la saison sèche sont évaluées au mois de février et de juin. Le mois de juin correspond à la fin de saison sèche, et les ressources végétales sont épuisées. Les mesures de cette dernière période permettent de faire les différences de stocks entre les masses mesurées en fin de saison végétative et les masses présentes au début de la saison suivante.

Le nombre total de sites de mesure (Figure 3-1) est de 73, répartis entre les trois terroirs : Banizoumbou (26), Tchigo Tegui (20) et Kodey (27). Sur ces sites, 29 sont retenus pour le suivi des ligneux et 13 pour celui des haies vives. Les sites sont répartis dans les trois terroirs en fonction du type de sol. L'occupation des sols dans les sites a été variable d'une année à l'autre au gré des décisions du gestionnaire de la parcelle. Un équilibre dans l'échantillon, en termes de répartition des sites par type d'occupation des sols est maintenu à chaque fois par des nouvelles sélections de site. Les sites n'étaient pas protégés, très discrètement balisés et étaient totalement laissés sous l'emprise de la gestion des populations du Fakara. Pour chaque site retenu, les coordonnées géographiques (latitude, longitude) sont relevées par GPS et servent de repérage pour les campagnes de mesure. Le type d'occupation de sol de chaque site est noté pour la constitution de la base des données. Les catégories d'occupation de sol sont :

⁸ Un faciès dans le contexte de cette étude est la plus petite unité de paysage homogène quant à sa physionomie, sa dynamique et sa composition végétale. Chaque faciès peut être caractérisé par sa topographie et ses caractéristiques phytosociologiques.

- les cultures sans fumure
- les cultures avec fumure
- les jachères
- les friches
- les sols incultivables.

L'appellation jachère correspond ici aux jeunes jachères avec des buissons peu développés et les friches sont des vieilles jachères où la strate buissonnante est très développée. Des axes de relevés déterminés sur base de photographies aériennes ont été fixés par unité de végétation. Les mesures sont effectuées sur ces axes représentatifs de l'unité de végétation dans laquelle ils se trouvent sachant que l'axe choisi doit être entièrement dans l'unité en question. Dans le cas d'une pente, l'axe est placé dans le sens de la pente avec comme repère les arbres les plus proches.

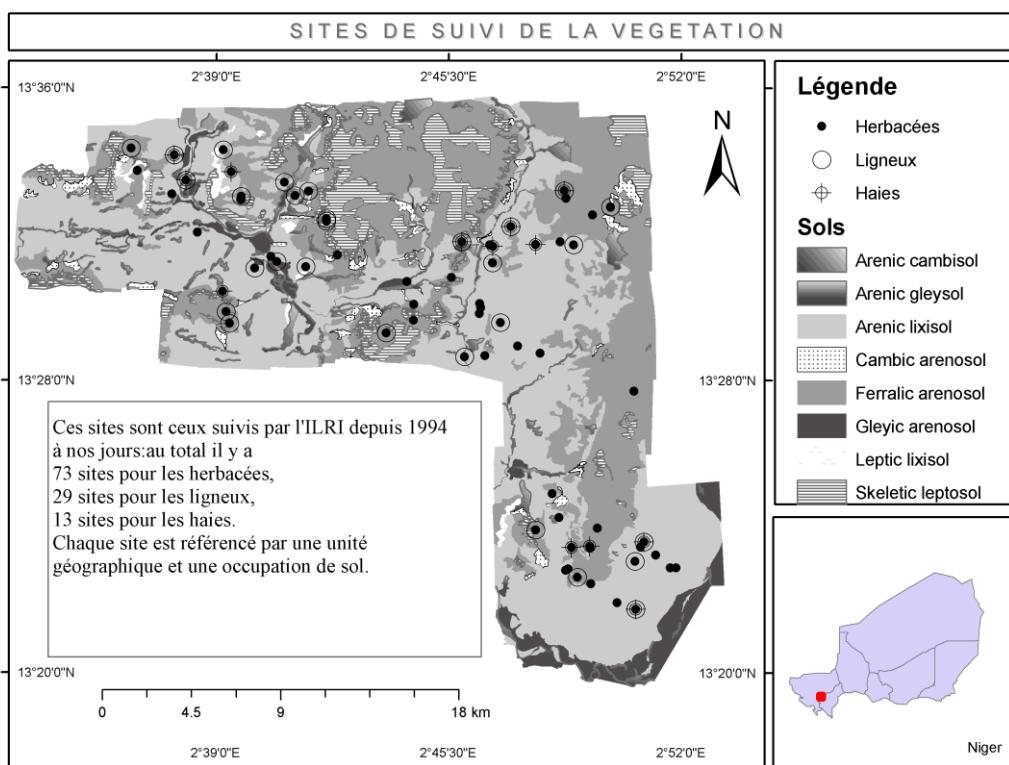


Figure 3-1 : Localisation des sites sur la carte de la zone d'étude avec les différents types de sols
(Adaptée de Hiernaux, Ayantunde *et al.*, 2009)

3.2.1.1 Les mesures des herbacées

L'évaluation de la biomasse herbacée et des cultures comporte trois étapes :

- l'échantillonnage des sites,
- l'estimation visuelle systématique des types d'occupation de sol ou des faciès dans les sites et les unités géographiques.
- le relevé des observations sur la végétation et le site (Figure 3-2),

L'ensemble des opérations a lieu en fin de saison de croissance. Après vérification de l'axe de relevé - 200 mètres dans les jachères et 100 mètres dans les cultures, une stratification est réalisée pour tenir compte de la forte micro-hétérogénéité à l'échelle de la placette de 1m² où s'effectuent les mesures. La stratification est effectuée sur base de la densité apparente du matériel végétal, estimée visuellement. A l'exception des plages dénudées, deux situations de densité sont identifiées de part et d'autre d'une densité 'médiane', l'une 'haute', lorsque la masse herbacée est manifestement plus élevée, l'autre 'basse' lorsqu'elle est manifestement plus faible. Finalement 4 strates sont reconnues : sol nu, bas, médian, haut, dont les limites sont relatives à l'état de la végétation du site et changent donc d'un site à l'autre et d'une date d'observation à l'autre. Sur l'ensemble des strates, huit à douze points sont choisis de manière aléatoire pour les mesures de couvert et de biomasse, à raison de deux à trois mesures pour les strates qualifiées de basse et haute, et quatre à six pour la strate médiane. Pour les variables observées par espèce végétale (composition floristique et couvert), toutes les espèces sont identifiées dans la placette de mesure. Les trois espèces dominantes sont relevées et classées selon l'importance de leur contribution au couvert. La superficie de chaque strate est estimée par comptage de leur fréquence de part et d'autre de l'axe de relevé, dans un rayon de 1 m. Ces superficies sont utilisées comme coefficient de pondération au taux moyen de recouvrement, et aux masses des strates. La contribution des espèces au couvert total est pondérée par les mêmes coefficients.

Pour l'obtention des masses, les prélèvements de végétaux sont effectués dans le carré de rendement à 1 cm au dessus du sol et ensachés. La litière est ramassée dans le même placeau et ensachée à part. Les échantillons d'herbe récoltés sont mis au séchage à l'étuve à 60°C pendant quarante-huit heures. Ils sont ensuite pesés pour mesurer la quantité de matière sèche

(MS). Le poids des échantillons prélevés est ensuite pondéré avec le taux moyen de recouvrement des strates pour estimer les biomasses restantes à l'hectare pour chaque faciès.



Figure 3-2 : Séance d'observation des strates lors de relevés dans une jachère de l'unité KB7 ;

3.2.1.2 Les mesures des résidus du mil et des mauvaises herbes

Les mesures de biomasse dans les champs portent sur les chaumes de mil et les adventices herbacées. Les relevés s'effectuent à l'approche des récoltes. L'axe de relevé mesure 100 mètres et un placeau de 1 mètre carré est placé tous les 10 mètres le long de l'axe. Les champs de mil dans le site sont stratifiés en champs fumés et non fumés. Les champs non fumés sont stratifiés en trois classes qualitatives de masse (bonne, moyenne et mauvaise).

L'évaluation des masses de résidus est faite sur la base de la densité de culture du mil (poquet à l'hectare) et d'un échantillonnage d'une dizaine de ces plants. La densité des cultures est estimée par la méthode du point- centré quadрат droit⁹ (Cottam et Curtis, 1956) ou méthode de croisillon (Figure 3-3). Cette méthode consiste à considérer tous les 10 mètres sur un transect de 100 mètres, une ligne perpendiculaire à l'axe du relevé au point de lecture. Quatre

⁹ Point-centered quarter method

quadrants sont ainsi délimités et les distances séparant le poquet le plus proche du point repère sur le quartier sont considérées. Ces distances notées Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 permettent de calculer une densité (D) des poquets à l'hectare par la formule suivante :

$$D = 10000 / Q^2 ; \text{ avec } Q^2 = [(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) / 4]^2 \text{ (Qi est en mètre) et D (Poquets par hectare).}$$

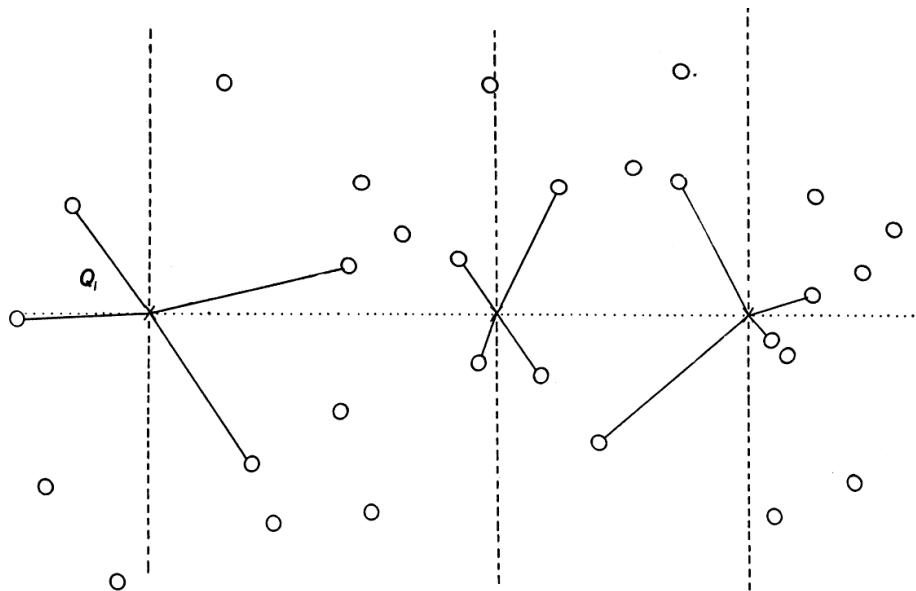


Figure 3-3: Illustration de la méthode de détermination de la distance Q_1 correspondant au plant le plus proche du centre du quadrant délimité par les pointillés. (Tiré de Cottam et Curtis (1956) – Page 453)

Sur les 10 plants collectés, les mesures effectuées sont le nombre et la hauteur des talles, le nombre de feuilles par talle, le nombre de talles fertiles, le nombre de talles stériles et l'état phénologique. La coupe des talles des 10 plants est réalisée au dessus du premier nœud foliaire. Le collet est récolté par ailleurs et intégré à la masse du pied de mil. Les talles sont réparties dans les mêmes trois classes que celles décomptées : talle végétatif inférieur à 1 m, talle végétatif supérieur à 1m ou avec une inflorescence avortée ou stérile entre 1m et 1,5m, talle avec inflorescence pleinement développée supérieure à 1,5m. Une fois classées, les talles de chaque poquet sont décomposées en tige, gaine et feuilles récoltées séparément. Les échantillons collectés sont séchés avec les mêmes procédures que celles décrites ci-dessus pour les autres herbacées. Les adventices herbacées sur pied et la litière (y compris les résidus des chaumes de mil des années précédentes) sont récoltées dans des quadrants de 1 m^2 déposés systématiquement tous les 10 m le long de l'axe du relevé. Leur recouvrement total et celui des trois espèces qui y contribuent le plus sont estimés, la liste des espèces présentes est dressée.

L'évaluation des masses appétibles comporte les étapes suivantes :

- Pour chaque espèce végétale, un coefficient saisonnier d'appétibilité est attribué.
- Ce coefficient saisonnier est multiplié par la contribution de l'espèce à la masse totale des herbacées pour chaque faciès.
- Ces valeurs sont ensuite pondérées par le poids de chaque faciès en termes de superficie tant pour les cultures que pour la végétation naturelle. Les superficies des faciès sont dérivées des photographies aériennes de la saison et peuvent contribuer à réajuster.

3.2.1.3 L'estimation visuelle

L'estimation visuelle a pour objectif de préparer l'extrapolation des données des sites de suivi à l'ensemble des unités géographiques. Elle est réalisée à deux niveaux : les sites de suivi pour la calibration des mesures et l'ensemble des faciès des terroirs pour la spatialisation. Elle consiste à estimer pour chaque faciès ou type de végétation, la proportion de végétation contenue (en déciles) dans des classes de masse prédéterminées. Ces classes de masse sont : 0 à 62.5, 62.5 à 125, 125 à 250, 250 à 500, 500 à 1000, 1000 à 2000, 2000 à 4000, 4000 à 8000 kg MS ha⁻¹. Dans les sols non cultivés, l'estimation est réalisée par faciès à l'intérieur de l'unité géographique. Dans les sols cultivés, l'estimation est faite de la part des quatre types de champs : fumé et non-fumé, et pour ces derniers les densités faibles, moyennes ou fortes. Au cours de l'estimation visuelle, la pression de pâture est estimée suivant quatre classes : absence de pâture, faible pression (disparition équivalente à 1/3 de la masse), pression modérée (disparition équivalente à 2/3 de la masse) et pression forte (disparition équivalente à la masse préexistante).

Les estimations visuelles des sites sont comparées aux mesures effectuées sur ces mêmes sites, à l'aide de régressions linéaires. Ces relations sont ensuite utilisées pour corriger les estimations visuelles de l'ensemble de la zone. La quantité de matière sèche d'une unité géographique est déterminée par pondération des proportions estimées avec les valeurs de masse retenues. Cette méthode est utilisée par l'équipe de ILRI de 1994 à nos jours (Hiernaux et Ayantunde, 2004; Turner, Hiernaux *et al.*, 2005; Hiernaux, Ayantunde *et al.*, 2009).

3.2.1.4 Les mesures des ligneux

L'évaluation quantitative de la végétation ligneuse à l'échelle du paysage est effectuée en associant des mesures sur les sites échantillon et des estimations visuelles par type d'occupation du sol pour chaque unité géographique. Les mesures sur les ligneux sont réalisées sur un sous-échantillon des sites de suivi de la végétation herbacée et des cultures. Les caractéristiques topographiques, l'occupation des sols et les espèces ligneuses dominantes sont les variables considérées pour le choix du sous-échantillon. Les mesures procèdent par inventaires exhaustifs des plants ligneux dans quatre aires circulaires disposées chaque 50m le long de l'axe de 200m qui définit le site. Dans chaque aire circulaire, les paramètres suivants sont relevés : le nom des espèces, la hauteur des plantes, la largeur et la hauteur du houppier, le nombre et la circonférence de chaque tronc à la base. L'état physiologique des plantes et les marques de coupe, taille ou broutage sont notés.

Les peuplements de ligneux et d'herbacées pérennes qui constituent les haies de bord de champ sont évalués séparément. En raison de leur dispersion linéaire, la méthode consiste en un échantillonnage de segments linéaires de 50 m en lieu et place des aires circulaires. Les haies ont été cartographiées (Hiernaux et Ayantude, 2004) par photo-interprétation visuelle. Des tentatives de cartographie par imagerie satellitaire dans un seul terroir, Tchigo Tegui, ont aussi donné de bon résultats (Tidjani, 2004).

L'estimation visuelle dans le cas des ligneux s'effectue sur les sites de mesure (Figure 3-4) et par occupation de sols dans les unités géographiques. Les estimations visuelles sur site sont ensuite mises en relation avec les mesures par régression linéaire pour corriger les estimations des occupations de sols. Pour le calcul de la biomasse foliaire et les quantités de bois, les étapes suivantes sont suivies pour les sites de mesures :

- Elaboration de statistiques sur la densité des populations, le couvert et la surface terrière à partir des données de chaque espèce d'arbre ou d'arbuste et pour toutes les plantes ligneuses de chaque site ;

- Estimation des masses foliaires des arbustes et des arbres pour chaque site à partir des régressions allométriques de Cissé (1980) sur la base des données de circonférence des troncs et de toutes les catégories de branches;

Pour l'ensemble de la zone d'étude :

- évaluation des masses foliaires et de bois pour les différents faciès à partir des régressions établies entre le couvert et les masses,
- évaluation dans chaque site de la contribution de l'espèce dominante à la densité, au couvert et aux masses,
- évaluation de la contribution des autres espèces dominantes (2^{ème} et 3^{ème}) à partir de celle du premier en utilisant les facteurs 65, 20, 10 et 5% pour les arbres et 75, 15, 5,5% pour les arbustes (Hiernaux et Ayantude, 2004) ; les résultats finaux des évaluations de masse sont exprimés par unité géographique avec les proportions des différentes catégories d'occupation de sol.



Figure 3-4: Station de mesure des ligneux dans la brousse tigrée de l'unité K21

3.2.2 Spatialisation des stocks organiques liés aux cultures et aux pâturages

Les résultats du suivi de la végétation par site, sur la base de l'évaluation visuelle sont estimés par unité géographique aussi bien pour les herbacées que pour les ligneux. Les variables d'intérêt pour la spatialisation sont les masses moyennes des résidus de récolte, des mauvaises herbes, et la végétation herbacée, l'objectif étant de produire un plan spatial des flux organiques et d'éléments minéraux issus des cultures et des pâturages. Ce plan spatial est utilisé par la suite dans l'établissement de bilans organiques et minéraux ainsi que les autres flux liés à l'élevage. L'occupation du sol dans l'unité géographique a été retenue comme la plus petite unité spatiale d'expression des résultats de bilans partiels. Pour ce faire, une procédure a été développée pour associer l'estimation des superficies des types d'occupation du sol à l'intérieur des unités géographiques et des observations systématiques faites sur les ressources chaque saison. Cette spatialisation des observations est suivie de calculs statistiques sur les données spatialisées à l'aide des fonctions du Système d'information géographique. La procédure a été développée sous ARCGIS 9.2 (ESRI, 2008) avec les données suivantes :

- les estimations des masses végétales par unité géographique,
- la carte des unités géographiques,
- les cartes d'occupation des sols des deux années couvertes par l'étude.

Pour estimer le bilan de la production et de la consommation fourragère sur un cycle annuel, deux années successives de mesures sont nécessaires car les masses végétales produites au cours de la saison des pluies de l'année n sont utilisées par le bétail jusqu'au démarrage de la saison de l'année n+1.

L'ensemble des cartes citées sont en format vectoriel. Cependant, pour les opérations spatiales qui nécessitent des opérations de type mathématique, le modèle de donnée de type maillé ou raster qui s'appuie sur une structure de grille pour stocker les informations géographiques a été utilisé. Ce format permet la mise en œuvre en analyse spatiale d'opérations spatiales simples ou complexes entre deux entités géographiques. Il est très utilisé dans les analyses d'occupation des sols. Afin de faire une attribution directe des valeurs de masse à l'hectare aux pixels, la résolution spatiale retenue est de 100 mètres sur les latitudes et les longitudes donnant ainsi une superficie de un hectare. L'unité résultante en termes de superficie de la maille est l'hectare. La méthode de calcul de la résolution dans les cartes numériques en format maillé, est fonction de l'étendue de l'entité géographique. La

formule de calcul de la résolution sur la latitude (Y) d'une image raster géo-référencée est la suivante : $r = \frac{\Delta X}{N}$ avec r la résolution, X la longitude et N le nombre de colonnes. Dans les cas où le pixel est un carré, la résolution est calculée uniquement sur la latitude ou sur la longitude. La valeur retenue pour la résolution des pixels est très proche des valeurs proposées par la méthode de Minami (2000). Cette valeur a permis d'obtenir des pixels de un hectare de superficie et de conduire l'ensemble des analyses statistiques sans faire appel à la technique de pondération par les superficies.

L'approche utilisée pour la spatialisation des données (Figure 3-5) comprend les étapes suivantes :

- la détermination des superficies réelles des occupations de sol dans les unités géographiques par intersection entre les cartes d'occupations des sols et les cartes des unités géographiques sauf dans les zones occupées par les habitations des villages,
- la détermination de la masse moyenne à l'hectare de chaque terroir par type d'occupation de sol. Pour les jachères par exemple, la masse totale par terroir (M_j) est la somme des masses totales des jachères de chaque unité (m_j). La masse totale d'une jachère donnée dans une unité géographique (m_j) est évaluée sur la base de la superficie de la jachère de l'unité géographique (s_j) et de la masse par hectare des herbacées des parcours (Jachères, sols incultes, friches) notée b_h et issue de l'évaluation finale des masses sur le terrain. La masse moyenne à l'hectare des jachères à l'échelle du terroir (R_j) s'obtient donc en divisant M_j par la superficie totale des jachères ;

$$m_j = b_h * s_j$$

$$Mj = \sum_i^n m_j$$

$$Rj = Mj / Sj$$

Dans le cas des jachères par exemple, les masses moyennes à l'hectare des herbacées sont estimées comme une moyenne de l'unité géographique. A la suite de l'intersection spatiale, cette masse moyenne à l'hectare représente donc une valeur pour les jachères, les sols incultes et les friches. R_j peut être déterminé soit par la méthode présentée ci-dessus ou par une modélisation de type statistique. Les deux solutions ont leurs avantages et inconvénients. La première est pratique et peut être mise en œuvre pour des

utilisations ultérieures de cette base de données des terroirs étudiés. La seconde reste plus complexe mais permet d'avoir les estimateurs des masses à l'hectare par unité d'occupation des sols.

- La détermination de quatre coefficients k_0 à k_3 (Annexe 3.1, 3.2) représentant le rapport des masses entre différentes types d'occupation des sols à l'échelle terroir.
- les masses végétales à l'hectare sont calculées par occupation de sol dans l'unité géographique. Elles sont ajustées pour les besoins de l'étude par les coefficients d'appétibilité et du devenir des masses de résidus de cultures pour l'obtention des disponibilités saisonnières de masses végétales destinées à l'alimentation animale

Légende de la figure 3.5

1. *Création d'une couche d'information spatiale par intersection de la couche des unités géographiques et celle de l'occupation des sols en année n et n+1 pour déterminer les superficies des types d'occupation de sol dans les unités géographiques ;*
2. *Utilisation des superficies issues de (1) pour le calcul de la masse totale des cultures et des pâturages par unité géographique ;*
3. *Agrégation des masses de cultures et de pâturages au niveau terroir pour le calcul des masses végétales totales par type d'occupation de sol. Détermination des rapports existant entre les masses des différents types d'occupation de sol à l'échelle terroir (calcul de k) ;*
4. *Attribution des coefficients d'appétibilité et du devenir des masses dans les nouvelles unités pour l'estimation des ressources fourragères appétibles ;*
5. *Estimation des masses végétales par occupation de sol à partir des coefficients k et les masses végétales des unités géographiques*

**DIAGRAMME POUR L'ÉVALUATION DES MASSES VÉGÉTALES
DES UNITÉS D'OCCUPATION DE SOLS
DANS LES UNITÉS GÉOGRAPHIQUES**

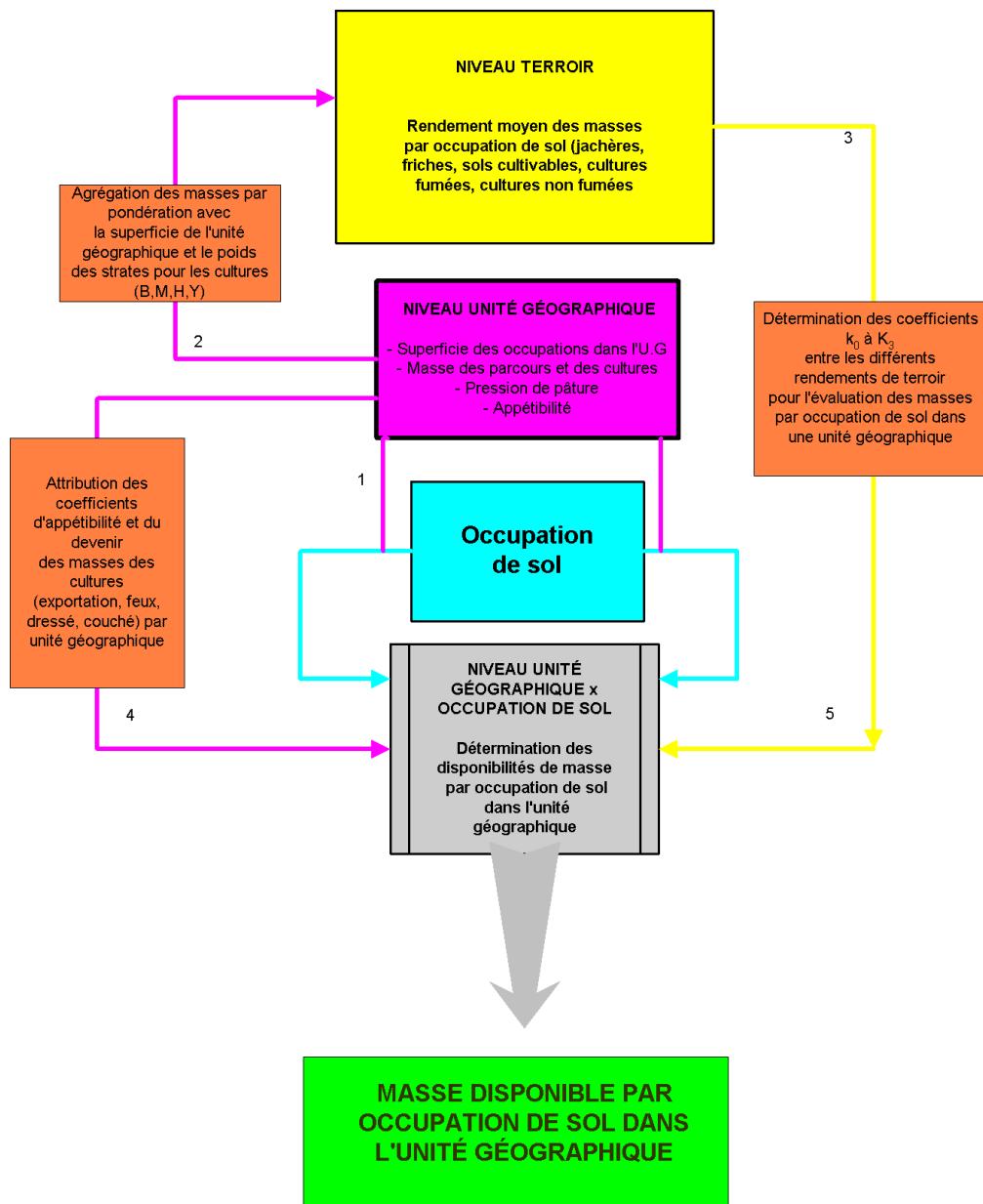


Figure 3-5 : Schéma de flux pour la spatialisation des masses végétales

3.2.3 Couplage de la cartographie de la biomasse avec d'autres éléments spatiaux

Plusieurs analyses faisant intervenir les sols ont été réalisées en vue de prendre en compte l'hétérogénéité des terroirs et leur impact possible sur l'évaluation des bilans minéraux des sols. Un des facteurs présents dans la carte des sols est la topographie. Le croisement de cette information avec les informations de masse végétale à l'échelle des unités d'occupation de sols dans l'unité géographique a été réalisé à une échelle pixellaire. Cette démarche permet de pallier les problèmes liés à la fragmentation des unités d'occupation de sols suite à l'intersection avec la carte des sols de format vectoriel. En effet, cette fragmentation à l'échelle des entités vectorielles peut être une source d'approximation. Les cartes des masses végétales et la carte des sols ont été converties individuellement du format vectoriel au format maillé. De même, une carte des terroirs a été mise au format maillé par agrégation des unités géographiques appartenant au même terroir. L'ensemble de ces entités géographiques a permis de constituer un jeu de données d'analyse (Figure 3-6).

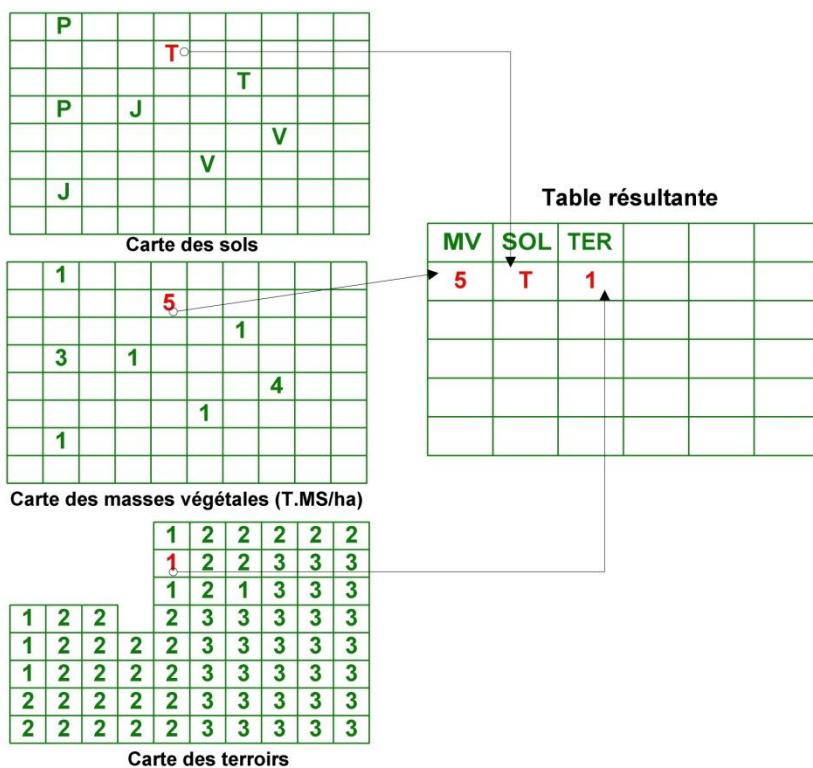


Figure 3-6: Schéma de création des tables d'analyse avec les variables sols

Pour chaque occupation dans l'unité géographique :

- un ou plusieurs faciès végétaux sont décrits
- une estimation est faite de la superficie relative occupée pour chaque faciès.

Cette approche a permis de prendre en compte l'ensemble des pixels et d'étudier la variabilité à travers leur attribut de biomasse. Elle a permis aussi de contourner l'approche vectorielle dans laquelle, une pondération des données est nécessaire pour l'inférence statistique.

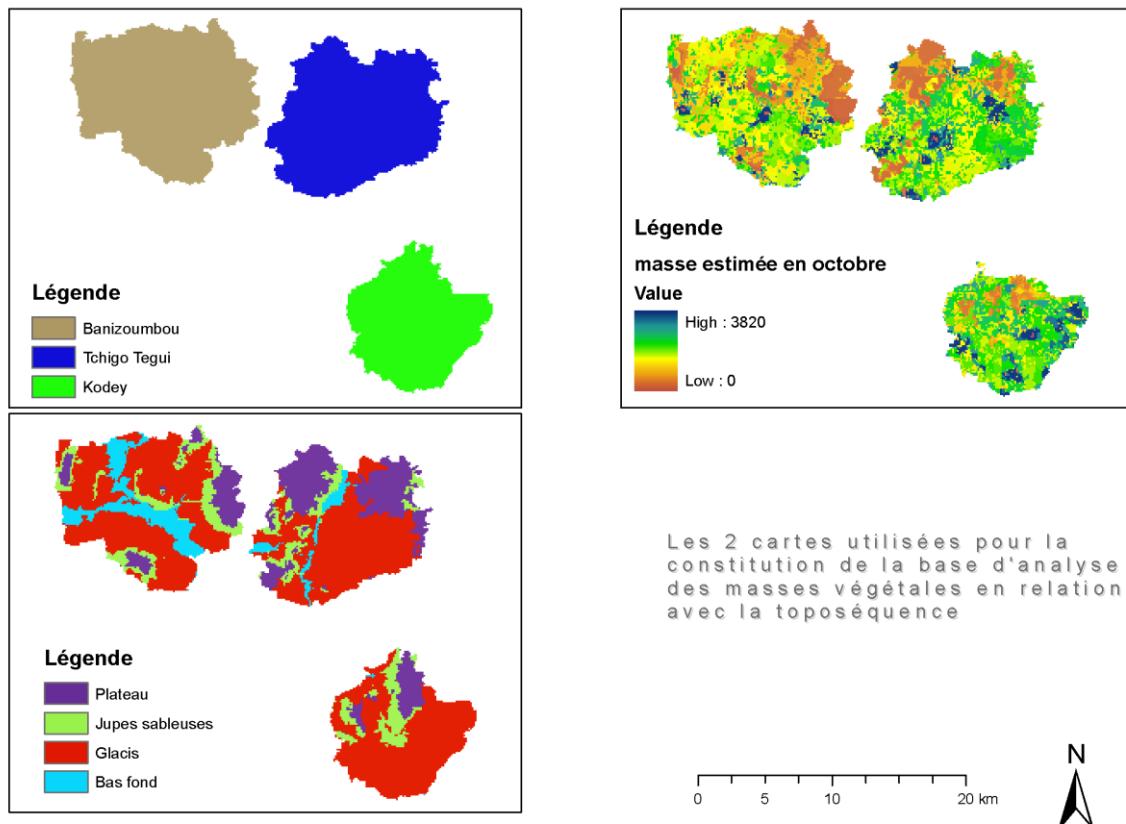


Figure 3-7 : Exemple d'entités géographiques utilisées dans la chaîne de traitement

Cette figure comprend la carte des terroirs issue du regroupement des unités géographiques, la carte des types de sols regroupés en 4 éléments de toposéquence et la carte de biomasse herbacée. Ces cartes ont été générées à l'aide de Spatial analyst de ARCGIS 9.2 (ESRI, 2008). La méthode d'extraction des valeurs utilise des entités spécifiques à chaque occupation de sol et la génération systématique d'entités ponctuelles sur cette base avec pour critère, la non localisation sur des espaces d'exclusion. L'extraction des entités utilise la méthode des statistiques zonales (ESRI, 2008). Les limites de chaque terroir dans les figures correspondent aux limites retenues pour le suivi des cultures et des troupeaux qui correspondent aux zones couvertes par les terres des villages enquêtés.

La construction de la table a été réalisée à l'aide des trois entités géographiques (Figure 3-7) par la méthode d'extraction des statistiques zonales. L'élément de référence zonal est l'ensemble des points générés à partir du centre des pixels de la couche des masses végétales. La valeur du pixel correspondant pour les trois entités géographiques a été attribuée à chaque point au cours de la constitution de la table. Les grilles sans données ont été omises dans l'ensemble des opérations.

Les données font l'objet d'une analyse par inférence statistique et spatiale. L'inférence statistique a été réalisée avec le logiciel SAS 9.1 (2004b). Les statistiques de masse herbacée, de chaumes, de feuilles des arbres ont été établies par terroir et par toposéquence. Les tests de comparaison multiple de moyennes ont été réalisés avec la procédure GLM (General Linear model) de SAS 9.1 (SAS, 2004b). Une variante de cette procédure qui intègre le test de Friedman¹⁰ (Ipe, 1987) pour les tests non paramétriques a été utilisée quand les conditions de normalité de la distribution et d'égalité des variances ne sont pas respectées. La spatialisation des masses végétales et des stocks de macro-éléments a été réalisée avec ARCGIS 9.2.

¹⁰ Le test de Friedman est identique à l'analyse de variance simple sur les rangs des données et est utilisé comme un test non paramétrique quand les conditions de normalité ne sont pas satisfaites (SAS 9.1, Page 1546)

3.3 Résultats

3.3.1 La production de biomasse herbacée en fin de saison de croissance

3.3.1.1 Tendances générales par terroir et par type d'occupation des sols

La biomasse herbacée moyenne par type d'occupation des sols (Figure 3-8, Table 3-1) à savoir, les cultures avec fumure, les cultures sans fumure, les jachères, les friches et les sols incultivables a été respectivement de 2147 ± 283 , 1607 ± 177 , 923 ± 79 , 829 ± 71 , et $390 \pm 33 \text{ kgMS ha}^{-1}$. Les cultures avec fumure ont des valeurs moyennes supérieures de 30% par rapport aux cultures sans fumure. Les mesures effectuées sur les trois périodes (octobre, février et juin) ont permis d'analyser la fluctuation saisonnière des masses végétales présentes dans les trois terroirs. Les masses des chaumes et résidus de culture décroissent fortement d'octobre à février, ce qui pourrait indiquer une très forte utilisation des fourrages. Dans la même période, la fraction de biomasse utilisée dans les jachères et les friches a été inférieure au quart de la production, ce qui pourrait indiquer une moindre pression sur ces unités au cours de cette période liée à la disponibilité des résidus de cultures. Dans les sols incultivables, la fraction utilisée au cours de cette période a été quasiment nulle. Entre octobre et juin, 75% des masses produites ont été utilisées sur l'ensemble des occupations de sols. La fraction restante en début de saison des pluies disparaît très rapidement à la suite de la dégradation organique favorisée par l'humidité atmosphérique et celle des sols.

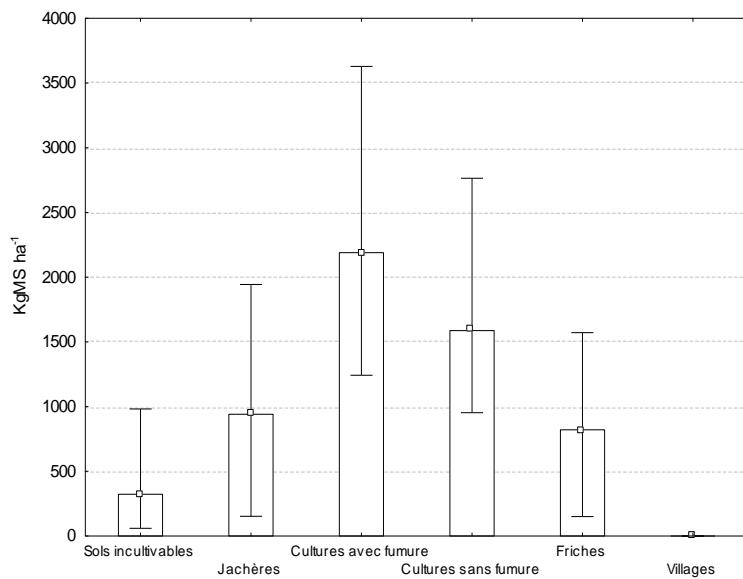


Figure 3-8: Biomasse herbacée moyenne, minima et maxima par occupation de sol en fin de saison de croissance

Table 3-1 : Estimation de la biomasse des herbacées et des résidus de récolte

Occupation de Sol	Cultures non fumées	Cultures fumées	Friches	Jachères	Sols incultivables
Période : Juin 1995					
Banizoumbou	548 (94)	609 (107)	530 (59)	532 (60)	217 (24)
Tchigo Tegui	556 (95)	624 (110)	519 (59)	611 (69)	216 (24)
Kodey	526 (91)	638 (113)	269 (31)	333 (39)	199 (23)
Terroirs FAKARA	543 (93)	624 (110)	439 (50)	492 (56)	210 (24)
Période : Octobre 1995					
Banizoumbou	1580 (170) b	2059 (258) b	838 (72) b	847 (73) c	332 (29) b
Tchigo Tegui	1668 (180) a	2190 (279) ab	879 (76) a	1024 (88) a	342 (29) b
Kodey	1573 (180) ab	2191 (312) a	769 (66) c	898 (77) b	495 (42) a
Terroirs FAKARA	1607 (177)	2147 (283)	829 (71)	923 (79)	390 (33)
Période : Février 1996					
Banizoumbou	661 (154)	888 (191)	644 (49)	678 (51)	308 (24)
Tchigo Tegui	737 (172)	950 (206)	604 (46)	731 (55)	293 (22)
Kodey	692 (166)	982 (212)	688 (52)	794 (60)	426 (32)
Terroirs FAKARA	696 (164)	940 (203)	645 (49)	734 (55)	342 (26)
Période : Juin 1996					
Banizoumbou	341 (125)	410 (178)	280 (25)	276 (25)	123 (11)
Tchigo Tegui	368 (138)	445 (198)	198 (18)	231 (21)	106 (10)
Kodey	372 (141)	463 (217)	167 (15)	209 (19)	131 (12)
Terroirs FAKARA	360 (135)	439 (198)	215 (19)	239 (22)	120 (11)
Variation entre Octobre et Février	57%	56%	22%	20%	12%
Variation entre Février et Juin	48%	53%	67%	68%	65%
Variation entre Octobre et Juin	78%	80%	74%	74%	69%

Unité pour les masses végétales : kgMS ha⁻¹. Pour le mois d'octobre, les lettres derrière les erreurs types indiquent que les moyennes de masses végétales des terroirs n'ayant pas la même lettre sont significativement différentes.

L'étendue statistique¹¹ de la biomasse moyenne varie entre 900 et 2500 kgMS ha⁻¹ en fonction du type d'occupation de sol (Table 3-1). Les coefficients de variation de ces moyennes sont supérieurs au seuil de 20% (niveau maximal admis comme limite des séries homogènes statistiquement) à l'exception des biomasses moyennes mesurées sur les cultures sans fumure. Cette hétérogénéité statistique de la biomasse est beaucoup plus accentuée dans les sols incultivables (CV=42%). Les comparaisons deux à deux des terroirs (Table 3-1) effectuées par le test t de Student pour les mêmes occupations de sols ont permis de relever les tendances suivantes :

- pour les cultures, des valeurs supérieures à Tchigo Tegui par rapport aux deux autres terroirs (Annexe 3.3)
- pour les cultures avec fumure, les sols incultivables et les jachères, des valeurs supérieures à Kodey par rapport aux deux autres terroirs,
- pour les friches, les biomasses décroissent de Tchigo Tegui à Banizoumbou et de nouveau à Kodey.

La spatialisation de la biomasse à l'échelle des occupations de sols dans l'unité géographique a permis d'attribuer des valeurs de biomasse aux 5874 unités vectorielles obtenues à la suite de l'intersection des cartes d'unité géographique et des cartes d'occupation des sols. La représentation spatiale des biomasses (Figure 3-9) qui en résulte met en évidence des productions de culture plus élevées autour des villages et campements (classe > 2000 kg.MS ha⁻¹) et des productions herbacées très faibles dans les zones de plateaux (Classe < 500 kgMS ha⁻¹). L'hétérogénéité de la distribution spatiale des biomasses herbacées des cultures fumées, jachères, et friches est aussi plus marquée à Tchigo Tegui et Kodey qu'à Banizoumbou. Les unités géographiques sur lesquelles l'évaluation de la végétation n'a pas été réalisée n'ont pas de données attributaires sur la carte de la figure 3.9.

¹¹ L'étendue statistique ou l'amplitude (range en anglais) est l'écart entre les valeurs extrêmes d'une série d'observations, classées par ordre croissant (Dagnelie, 2007b – Page 89)

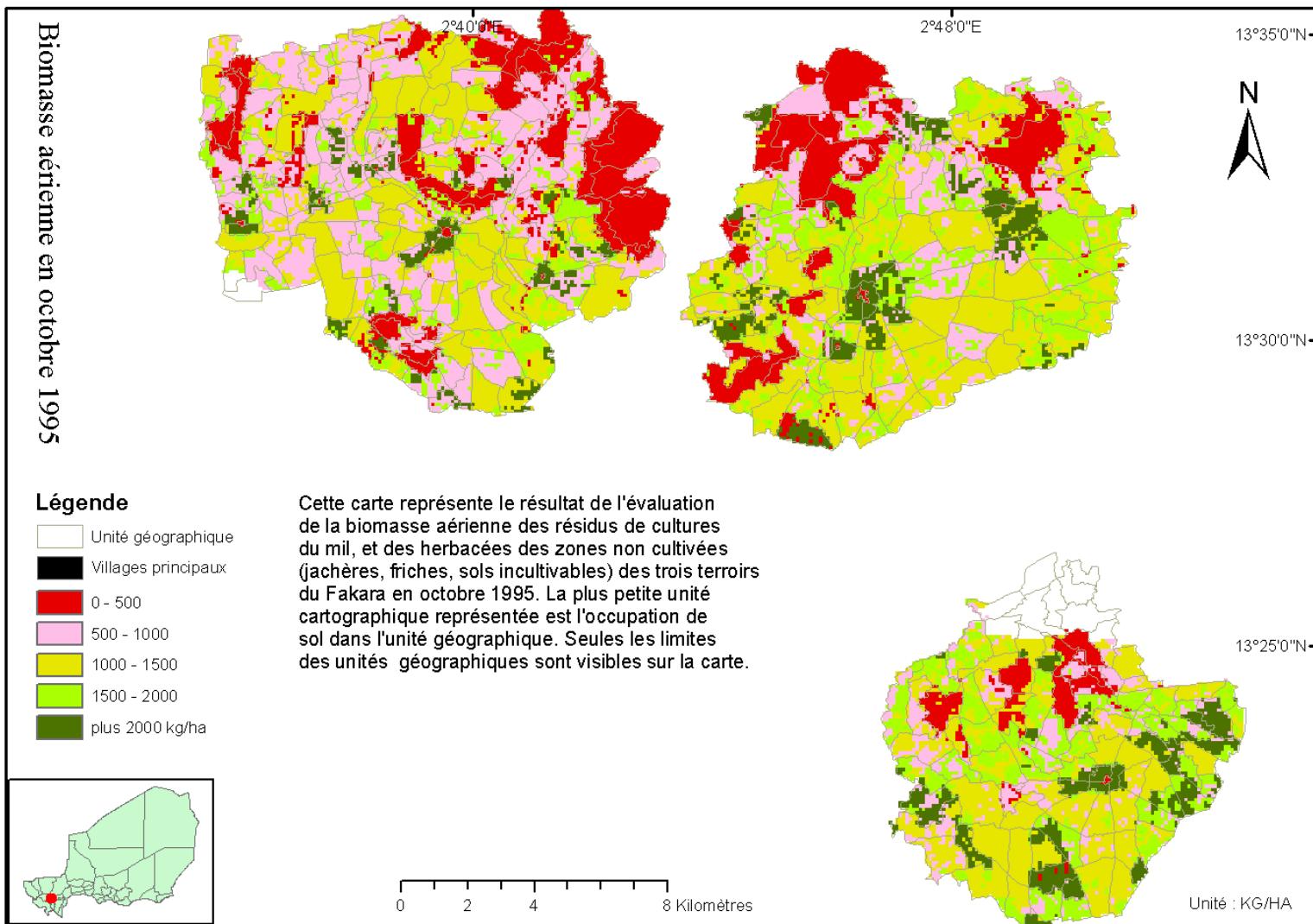


Figure 3-9 : Carte de la biomasse dans les trois terroirs du Fakara en Octobre 1995

3.3.1.2 Biomasse herbacée dans les unités topographiques

L'examen de la variabilité de la biomasse dans le même type d'occupation de sol a montré une très grande hétérogénéité dans les sols non cultivés par rapport aux sols cultivés. Le coefficient de variation est de l'ordre de 57% dans les sols incultivables des plateaux (Table 3-2). Les comparaisons multiples des biomasses d'une même occupation de sol en fonction des éléments de toposéquence ont mis en évidence des différences significatives. La toposéquence expliquerait 37% à 40% de la variabilité observée dans la biomasse d'un même type d'occupation des sols.

Table 3-2: Biomasse moyenne, Erreur type (ET), CV par toposéquence et par occupation de sol

unité : Kg MS Ha ⁻¹	Champs non fumés		Champs fumés		Friches		Jachères		Sols incultivables	
	Moyenne	±ET	Moyenne	±ET	Moyenne	±ET	Moyenne	±ET	Moyenne	±ET
Plateau	1609	± 287	2725	± 728	601	± 242	829	± 334	205	± 100
Talus	1613	± 223	2161	± 366	758	± 314	910	± 352	224	± 126
Glacis	1534	± 237	2405	± 556	920	± 247	999	± 247	346	± 183
Bas-fonds	1502	± 246	2398	± 612	939	± 210	961	± 266	393	± 145
CV (%)	16%		24%		33%		29%		57%	

CV= Coefficient de variation

3.3.1.3 Les stocks totaux de biomasse végétale herbacée en fin de saison de croissance

La biomasse herbacée totale en fin de saison de croissance, et dans les limites des trois terroirs a été de 34 585 tonnes de matière sèche (T.MS) dont plus du tiers provient des cultures. La biomasse herbacée dans l'ensemble des trois terroirs provient essentiellement des cultures sans fumure (39%) et des jachères (29%) (Annexe 3.4, Annexe 3.5). La contribution des jachères au stock total de masse à Kodey a été de 16% et celle des friches à 2 %. Ces niveaux sont inférieurs à ceux des deux autres terroirs. En revanche, la contribution des cultures avec fumure (56%) ou sans fumure (24%) a été plus élevée (Figure 3-10). Ces tendances sont surtout liées aux différences d'occupation des sols entre Kodey et les autres terroirs.

Les stocks de biomasse proviennent essentiellement des glacis qui ont fourni un peu plus de la moitié de la matière sèche herbacée à Banizoumbou et Tchigo Tegui et plus de 75% à Kodey (Annexe 3.6). Les stocks en provenance des plateaux de Tchigo Tegui et des bas-fonds de Banizoumbou ne sont pas négligeables.

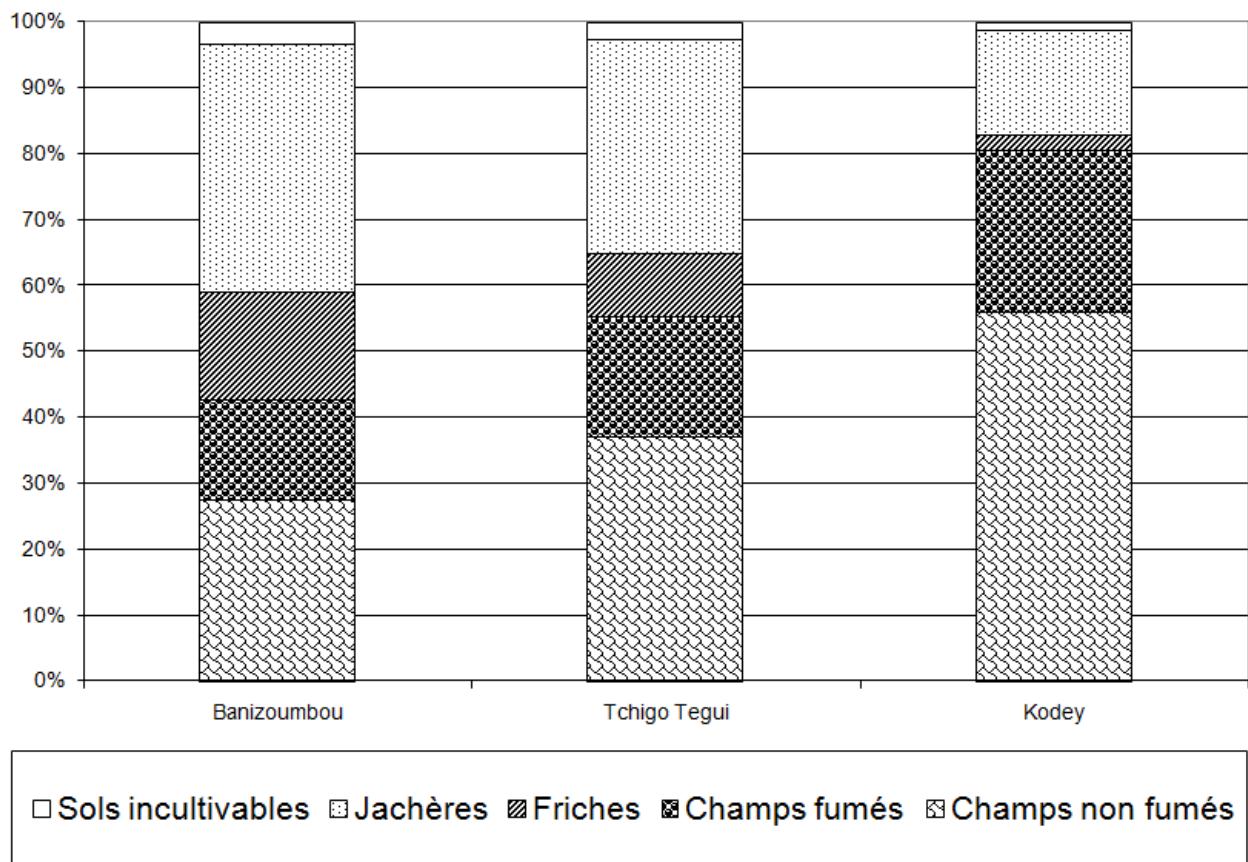


Figure 3-10 : Répartition des stocks de matière sèche herbacée par occupation de sol et par terroir

Pour les aspects relatifs à la consommation animale, les grilles d'appétibilité issues des estimations par type d'occupation des sols et par espèce dominante permettent de quantifier les masses fourragères disponibles pour l'alimentation des animaux. Les espèces végétales des parcours ont en moyenne un bon niveau d'appétibilité par rapport à celles des cultures. La médiane du coefficient d'appétibilité des herbacées est de 52% pour les résidus du mil, 70% pour les mauvaises herbes et 73% pour les pâturages. Le coefficient maximum des herbacées dans certaines unités a atteint 88%. La quantification des stocks fourragers dans les zones cultivées a été réalisée à partir du regroupement de différentes occupations de sol en zones de culture (fumées ou non) et de pâturage (autres occupations des sols). La biomasse moyenne des cultures par unité de surface (résidus et mauvaises herbes dans les champs de mil¹²) est de $1750 \pm 201 \text{ kgMS.ha}^{-1}$ et celle des pâturages de $795 \pm 68 \text{ kgMS.ha}^{-1}$ (Table 3-3). La contribution des cultures est de 59% et celle des pâturages de 41%. De fortes disparités dans cette répartition existent entre les terroirs. En effet, la contribution des pâturages est de 58% à Banizoumbou et 20% à Kodey. La répartition de la biomasse entre les

¹² Les champs de mil peuvent être en association avec d'autres cultures comme le niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walpers.), le voandzou (*Vigna subterranean* (L.) Verd.) et l'oseille (*Hibiscus sabdariffa*L.).

résidus de récolte et les masses végétales des pâturages n'est pas homogène d'un terroir à l'autre ($\chi^2 = 3189.10$, $ddl = 2$, $Pr < 10^{-4}$).

Table 3-3: Masses végétales moyennes par terroir sur les zones de cultures et de pâturages

Terroir	Cultures	Pâturages	Moyenne pondérée par terroir	Contribution par OS	
				Cultures	Pâturages
Banizoumbou	1 708 ± 194	735 ± 63	965 ± 94	42%	58%
Tchigo Tegui	1 796 ± 204	833 ± 72	1 189 ± 121	56%	44%
Kodey	1 703 ± 208	816 ± 70	1 400 ± 161	80%	20%
Moyennes pondérées	1 736 ± 202	795 ± 68	1 185 ± 125	59%	41%

Unité : kgMS ha⁻¹; OS = occupation des sols

La biomasse des cultures comprend les résidus du mil et les mauvaises herbes. Les mauvaises herbes représentent 10% de la biomasse des cultures avec une moyenne pour l'ensemble des sites de l'ordre de 169±15 kgMS.ha⁻¹. Les résidus moyens issus de la composition de la masse moyenne de la végétation dans un champ de mil par terroir (Annexe 3.7) sont composés de tiges (60%) et de feuilles (40%) dont 23% de limbe et 17% de gaines foliaires.

3.3.1.4 Composition floristique des herbacées

Les espèces dominantes des mauvaises herbes sont *Mitracarpus scaber*, *Eragrostis tremula* et *Cenchrus biflorus* pour l'ensemble des trois terroirs. La contribution des espèces dans le couvert total à Kodey est différente de celle des deux autres terroirs. L'espèce dominante à Kodey est *Eragrostis tremula*. Les espèces comme *Andropogon gayanus*, très appréciée des ruminants domestiques, font partie des espèces évaluées dans les champs mais leur contribution au couvert est très faible (Annexe 3.8). Dans les parcours, *Eragrostis tremula*, *Ctenium elegans* et *Zornia glochidiata* sont les espèces dominantes avec des différences bien marquées dans les trois terroirs (Annexe 3.9). La composition des parcours à Kodey est similaire à celle observée dans les mauvaises herbes des champs. *Andropogon gayanus* recensé dans les parcours est plus important à Tchigo Tegui que dans les deux autres terroirs. Au niveau des groupes fonctionnels, les pâturages sont dominés par des graminées annuelles à long cycle de type C4, espèces dont la photosynthèse est optimale au-dessus de 30°C avec une consommation d'eau relativement faible (Table 3-4). Ces proportions sont inférieures dans les cultures (Table 3-5). La proportion de plantes sciaphyles est de 2% et celle des xérophyles de 18%. Dans les cultures et les pâturages, les zoochores représentent 19% dans les parcours et 6% dans les cultures. La répartition des taxons des groupes fonctionnels diffère entre les trois terroirs.

Table 3-4: Contribution relative des taxons dans les pâturages en % pour la saison 1995-1996

Groupes taxonomiques	Contribution relative des taxons dans les pâturages en % de biomasse							
	Banizoumbou		Kodey		Tchigo Tegui		Fakara	
	Moyenne	E.T	Moyenne	E.T	Moyenne	E.T	Moyenne	E.T
Graminées annuelles	0.39	0.14	0.18	0.14	0.31	0.14	0.32	0.16
Pérennes	0.07	0.07	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06
Légumineuses	0.08	0.11	0.02	0.04	0.05	0.10	0.06	0.10
Cycle long	0.22	0.16	0.05	0.07	0.17	0.10	0.17	0.15
Cycle court	0.00	0.02	0.01	0.04	0.01	0.05	0.01	0.03
Appétibles	0.41	0.16	0.17	0.15	0.34	0.14	0.34	0.18
Sciaphyles	0.02	0.04	0.01	0.02	0.03	0.06	0.02	0.05
Xérophytes	0.16	0.13	0.11	0.08	0.13	0.10	0.14	0.12
Zoochores	0.26	0.11	0.10	0.08	0.16	0.10	0.19	0.12
C4	0.40	0.13	0.18	0.14	0.32	0.13	0.33	0.15
Aquatiques	0.02	0.05	0.02	0.06	0.02	0.06	0.02	0.05

E.T=erreur type

Table 3-5: Contribution relative des taxons dans les cultures en % pour la saison 1995-1996

Groupes taxonomiques	Contribution relative des taxons dans les cultures (adventices) en %							
	Banizoumbou		Kodey		Tchigo Tegui		Fakara	
	Moyenne		Moyenne	E.T	Moyenne	E.T	Moyenne	E.T
Graminées annuelles	0.10	0.08	0.42	0.19	0.13	0.06	0.19	0.18
Cycle long	0.02	0.04	0.01	0.04	0.03	0.05	0.02	0.04
Palatable	0.10	0.07	0.43	0.20	0.16	0.08	0.20	0.18
C4	0.10	0.08	0.42	0.19	0.13	0.06	0.19	0.18
Pérennes	0.01	0.04	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.03
Sciaphyles	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Xérophytes	0.09	0.08	0.42	0.19	0.13	0.06	0.18	0.18
Zoochores	0.04	0.06	0.09	0.04	0.06	0.04	0.06	0.06

E.T=erreur type

3.3.2 La production de masse foliaire, masse de bois des plantes ligneuses

3.3.2.1 Densité et couvert des ligneux

La densité des arbres et arbustes dans le Fakara est respectivement de 3.8 ± 0.2 et 260 ± 10 individus à l'hectare. Le couvert arboré et arbustif est respectivement de 1.2% et 16% (Table 3-6). Les densités de ligneux dans les pâturages sont deux fois plus élevées que celles obtenues dans les jachères et les cultures.

Table 3-6: Densité et couvert moyen des arbres et des arbustes par occupation de sol

Occupation des sols	Densité arbres		Densité arbustes		Densité ligneux		Couvert arboré		Couvert arbustes		Couvert total	
	m	e.t	m	e.t	m	e.t	m	e.t	m	e.t	m	e.t
Cultures	3.1	0.2	114.5	4.0	117.6	4.0	0.5	0.1	1.1	0.1	1.6	0.1
Jachères	2.7	0.1	241.8	10.3	244.4	10.3	0.3	0.1	24.4	0.6	24.7	0.6
Pâturages	7.6	0.8	616.6	38.7	624.1	39.1	4.4	0.5	33.6	2.2	38.0	2.4
Fakara	3.8	0.2	259.7	10.4	263.5	10.5	1.2	0.1	15.9	0.6	17.2	0.7

Unité de densité : individus /ha unité de couvert : %, e. t = erreur type

3.3.2.2 Production de feuilles et de bois des ligneux

Pour évaluer le disponible fourrager des plantes ligneuses, les types d'occupation de sol cartographiés ont été regroupés en cultures, jachères et pâturages. Les pâturages regroupent ici les sols incultivables et les friches. La masse foliaire moyenne des ligneux est variable selon les occupations de sol. A l'exception des zones cultivées où la moitié de la production ligneuse est fournie par les arbustes et l'autre moitié par les arbres, la contribution des arbustes est toujours plus importante dans les jachères et les pâturages (Table 3-7). En considérant chaque type de ligneux à part, l'occupation des sols ressort comme le critère de différenciation le plus déterminant. En effet, la comparaison des masses foliaires arborées des occupations de sol pour les trois terroirs indique une différence non significative entre terroirs ($F=0.01$, $P=0.9$, $d.d.l=2$) et une différence significative entre les occupations de sol ($F=52.4$, $P<10^{-4}$, $ddl=2$). Les résultats de comparaison des masses foliaires des arbustes montrent une différence non significative entre les terroirs ($\chi^2=5.1$, $d.d.l=2$, $P=7 \cdot 10^{-2}$) et une différence significative entre les occupations de sols ($\chi^2=580.5$, $ddl=2$; $P<10^{-4}$).

La production moyenne de feuilles sur les sols incultivables est supérieure à celle des jachères et des sols cultivés. Le rapport moyen entre ces deux occupations est de 10 (Table 3-8). La production foliaire des pâturages de Kodey est inférieure à celle des deux autres terroirs. A l'inverse, sa production foliaire dans les cultures est supérieure à celle des deux autres terroirs. La masse foliaire moyenne dans les terroirs est respectivement de 49 ± 5 kgMS ha^{-1} pour les cultures, 655 ± 14 kgMS ha^{-1} sur les jachères et 974 ± 43 kgMS ha^{-1} sur les sols incultivables (Figure 3-11). A l'exception de Banizoumbou, la masse foliaire moyenne des jachères et des sols incultivables est identique dans les autres terroirs. L'appétibilité moyenne des fourrages ligneux est de 30% dans le Fakara, avec une moyenne variant de 34% dans les zones cultivées à 25% dans les zones non cultivées. Pour la production totale, les arbustes ont contribué pour 77% de la masse foliaire totale des ligneux. La contribution des arbres a varié de 16% à 33% avec des masses foliaires maxima ne dépassant guère 750 kg.MS ha^{-1} .

La masse sur pied de bois est de 14 tMS ha^{-1} pour les pâturages et de 9 tMS ha^{-1} pour les jachères. Dans les cultures, les masses moyennes les plus élevées, de l'ordre $1,2 \pm 0,2$ tMS ha^{-1} , ont été relevées à Kodey (Annexe 3.10). En revanche, la masse sur pied dans les parcours à Kodey est inférieure à celle des deux autres terroirs dont les productions sont comprises entre 10 et 15 tMS/ha.

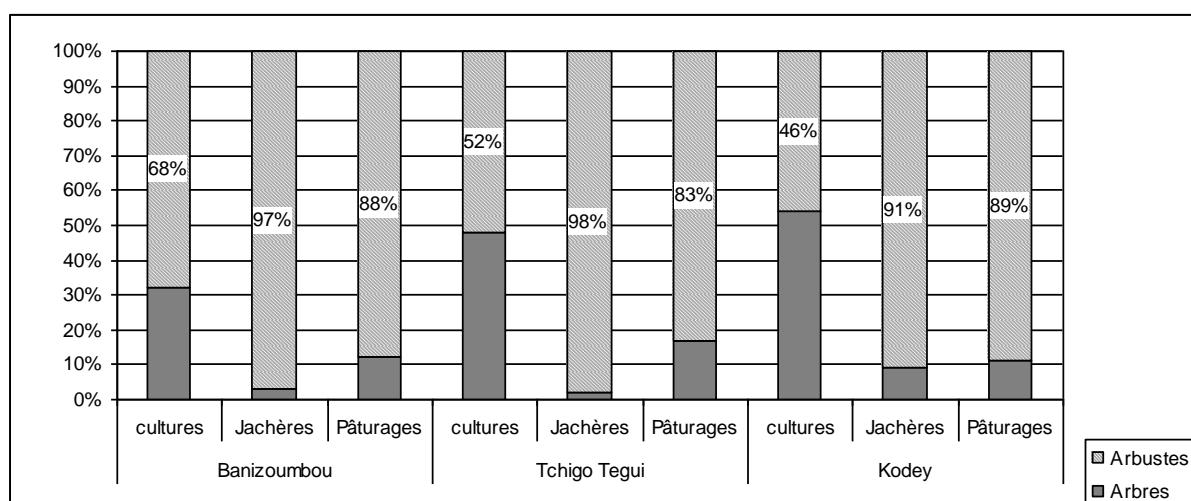


Figure 3-11 : Contribution en % des arbres et des arbustes dans les masses foliaires ligneuses

Table 3-7: Contribution des espèces d'arbres et d'arbustes à la masse foliaire par occupation du sol dans le Fakara

Cultures				Jachères						Sols incultivables					
Nom des espèces dominantes	Masse feuilles			Nom des espèces dominantes	Masse feuilles			Nom des espèces dominantes	Masse feuilles			Nom des espèces dominantes	Masse feuilles		
	Moyenne	\pm e.t	%		moyenne	\pm e.t	%		moyenne	\pm e.t	%		moyenne	\pm e.t	%
<i>Guiera senegalensis</i>	20.4	\pm 2.2	41.6	<i>Guiera senegalensis</i>	471.2	\pm 11.4	71.4	<i>Combretum micranthum</i>	536.1	\pm 44.6	50.8				
<i>Combretum glutinosum</i>	7.6	\pm 0.7	15.5	<i>Combretum glutinosum</i>	63.5	\pm 3.1	9.6	<i>Guiera senegalensis</i>	266.6	\pm 22.4	25.2				
<i>Acacia albida</i>	5.2	\pm 0.7	10.7	<i>Combretum micranthum</i>	50.2	\pm 5.9	7.6	<i>Combretum nigricans</i>	75.4	\pm 9.8	7.1				
<i>Combretum micranthum</i>	3.1	\pm 1.2	6.2	<i>Piliostigma reticulatum</i>	27.6	\pm 1.1	4.2	<i>Piliostigma reticulatum</i>	32.8	\pm 3.2	3.1				
<i>Prosopis africana</i>	1.9	\pm 0.2	3.8	<i>Anona senegalensis</i>	5.4	\pm 1.1	0.8	<i>Combretum glutinosum</i>	22.7	\pm 4.0	2.2				
<i>Piliostigma reticulatum</i>	1.6	\pm 0.2	3.3	<i>Acacia albida</i>	2.3	\pm 2.0	0.3	<i>Azadiracta indica</i>	18.8	\pm 6.1	1.8				
<i>Detarium micranthum</i>	1.5	\pm 0.3	3.1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	2.2	\pm 0.5	0.3	<i>Acacia ataxacantha</i>	15	\pm 2.4	1.4				
<i>Azadiracta indica</i>	1.3	\pm 1.1	2.7	<i>Prosopis africana</i>	0.9	\pm 0.1	0.1	<i>Acacia macrostachia</i>	13.7	\pm 2.8	1.3				
<i>Anona senegalensis</i>	1	\pm 0.2	2.1	<i>Boscia senegalensis</i>	0.7	\pm 0.3	0.1	<i>Acacia albida</i>	4.9	\pm 2.2	0.5				
<i>Balanites aegyptiaca</i>	0.9	\pm 0.2	1.9	<i>Combretum nigricans</i>	0.6	\pm 0.2	0.1	<i>Prosopis juliflora</i>	1.7	\pm 1.1	0.2				
<i>Parinari macrophylla</i>	0.2	\pm 0.1	0.5	<i>Acacia ataxacantha</i>	0.5	\pm 0.5	0.1	<i>Lanea acida</i>	1.7	\pm 0.8	0.2				
<i>Sclerocarya birrea</i>	0.2	\pm 0.0	0.5	<i>Terminalia avicennioides</i>	0.3	\pm 0.3	0.0	<i>Boscia angustifolia</i>	1.6	\pm 0.5	0.1				
<i>Combretum nigricans</i>	0.2	\pm 0.0	0.4	<i>Acacia macrostachia</i>	0.2	\pm 0.1	0.0	<i>Boscia senegalensis</i>	1.4	\pm 0.6	0.1				
<i>Terminalia avicennioides</i>	0.1	\pm 0.0	0.2	<i>Acacia nilotica</i>	0.2	\pm 0.2	0.0	<i>Sclerocarya birrea</i>	0.8	\pm 0.3	0.1				
<i>Butyrespermum parkii</i>	0.1	\pm 0.1	0.1	<i>Detarium microcarpum</i>	0.1	\pm 0.1	0.0	<i>Cassia siberiana</i>	0.8	\pm 0.3	0.1				
				<i>Sclerocarya birrea</i>	0.1	\pm 0.0	0.0	<i>Acacia nilotica</i>	0.6	\pm 0.3	0.1				
				<i>Cassia siberiana</i>	0.1	\pm 0.1	0.0	<i>Pterocarpus erinaceus</i>	0.2	\pm 0.2	0				
				<i>Combretum aculeatum</i>	0.1	\pm 0.1	0.0	<i>Dalbergia sissoo</i>	0.2	\pm 0.2	0				
								<i>Balanites aegyptiaca</i>	0.2	\pm 0.1	0				
								<i>Terminalia avicennioides</i>	0.1	\pm 0.1	0				

e.s = erreur standard

Table 3-8: Masse foliaire moyenne appétible par terroir et par occupation de sols

Production de feuilles (Kg/ha)		Arbres	Arbustes	Ligneux	Feuilles palatables
Banizoumbou	Cultures	16,2 ± 05,0	26,9 ± 05,8	43,1 ± 07,4	14,2 ± 02,3
	Jachères	8,2 ± 03,6	741,3 ± 17,9	749,5 ± 17,7	210,2 ± 05,2
	Pâturages sur S.I	134,7 ± 22,7	867,7 ± 57,0	1002,4 ± 56,9	249,6 ± 13,4
Tchigo Tegui	Cultures	14,4 ± 01,5	16,6 ± 01,7	31,0 ± 02,1	10,1 ± 00,9
	Jachères	8,5 ± 00,7	710,1 ± 20,3	718,6 ± 20,3	195,4 ± 05,5
	Pâturages sur S.I	171,1 ± 43,0	848,3 ± 85,4	1019,3 ± 89,0	215,0 ± 18,2
Kodey	Cultures	23,3 ± 03,2	56,5 ± 11,1	79,7 ± 11,1	26,3 ± 03,0
	Pâturages	15,3 ± 01,5	386,2 ± 20,9	401,5 ± 20,9	110,7 ± 05,7
	Pâturages sur S.I	119,4 ± 24,4	689,3 ± 84,5	808,7 ± 90,2	170,8 ± 17,5
FAKARA	Cultures	17,6 ± 02,5	31,8 ± 04,1	49,4 ± 04,6	16,2 ± 01,4
	Jachères	10,0 ± 01,8	645,3 ± 14,0	655,4 ± 13,8	181,6 ± 03,9
	Pâturages sur S.I	141,8 ± 17,6	831,9 ± 42,0	973,7 ± 43,0	226,9 ± 09,8

*S.I = sols incultivables, ± erreur type

3.3.2.3 Composition floristique des ligneux

L'espèce ligneuse dominante est *Guiera senegalensis*. Elle représente plus de 66% des masses foliaires des jachères, 25% dans les pâturages et un peu moins de 50% dans les cultures. Les combrétacées sont aussi importantes dans les trois zones d'occupation. Les espèces comme *Acacia albida* sont surtout présentes dans les cultures et représentent environ 10% des masses foliaires. En revanche, elles sont presque inexistantes dans les jachères et les pâturages et leur poids ne dépasse guère 0,5%. Dans la répartition des arbres et arbustes par occupation de sol, les espèces les plus importantes dans les parcs agraires sont *Combretum glutinosum*, *Acacia albida*, *Prosopis africana*, *Detarium microcarpum*, et *Sclerocarya birrea*. Dans la brousse tigrée des plateaux, les espèces dominantes sont *Combretum nigricans*, *Piliostigma reticulata* et *Acacia ataxacantha*. La représentation spatiale des premières espèces dominantes permet de mettre en évidence la prédominance de *Combretum glutinosum*, *Acacia albida*, *Combretum nigricans* dans la catégorie des arbres (Figure 3-12). Ces trois espèces sont respectivement localisées dans les zones de cultures, les zones de vallées et les plateaux. Dans la catégorie des arbustes, l'espèce dominante est *Guiera senegalensis* sur l'ensemble des terroirs avec quelques îlots de *Combretum micranthum* dans les plateaux et *Annona senegalensis* dans les vallées aux abords du Dallol (Figure 3-13).

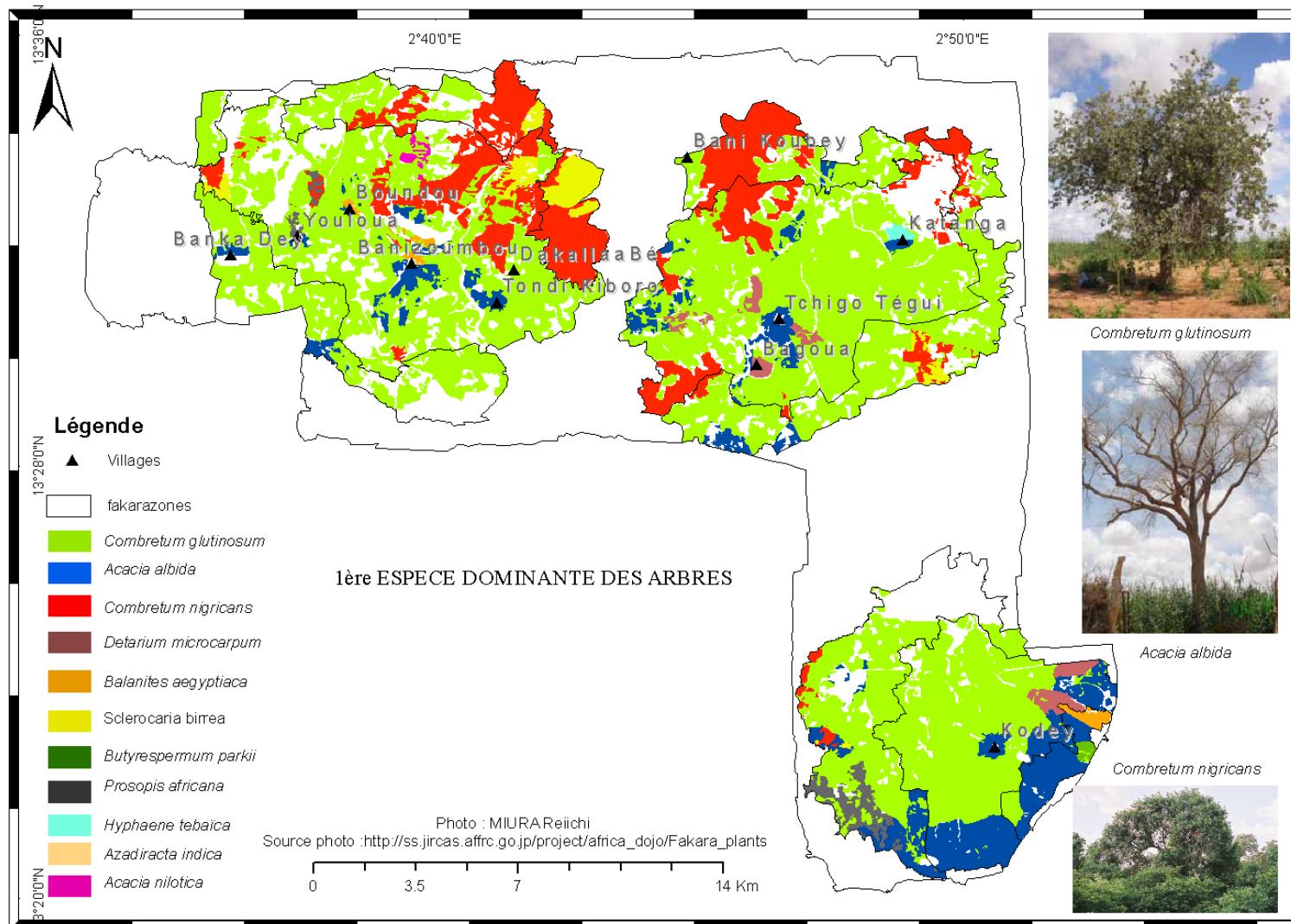


Figure 3-12 : Représentation des espèces dominantes des arbres dans le Fakara

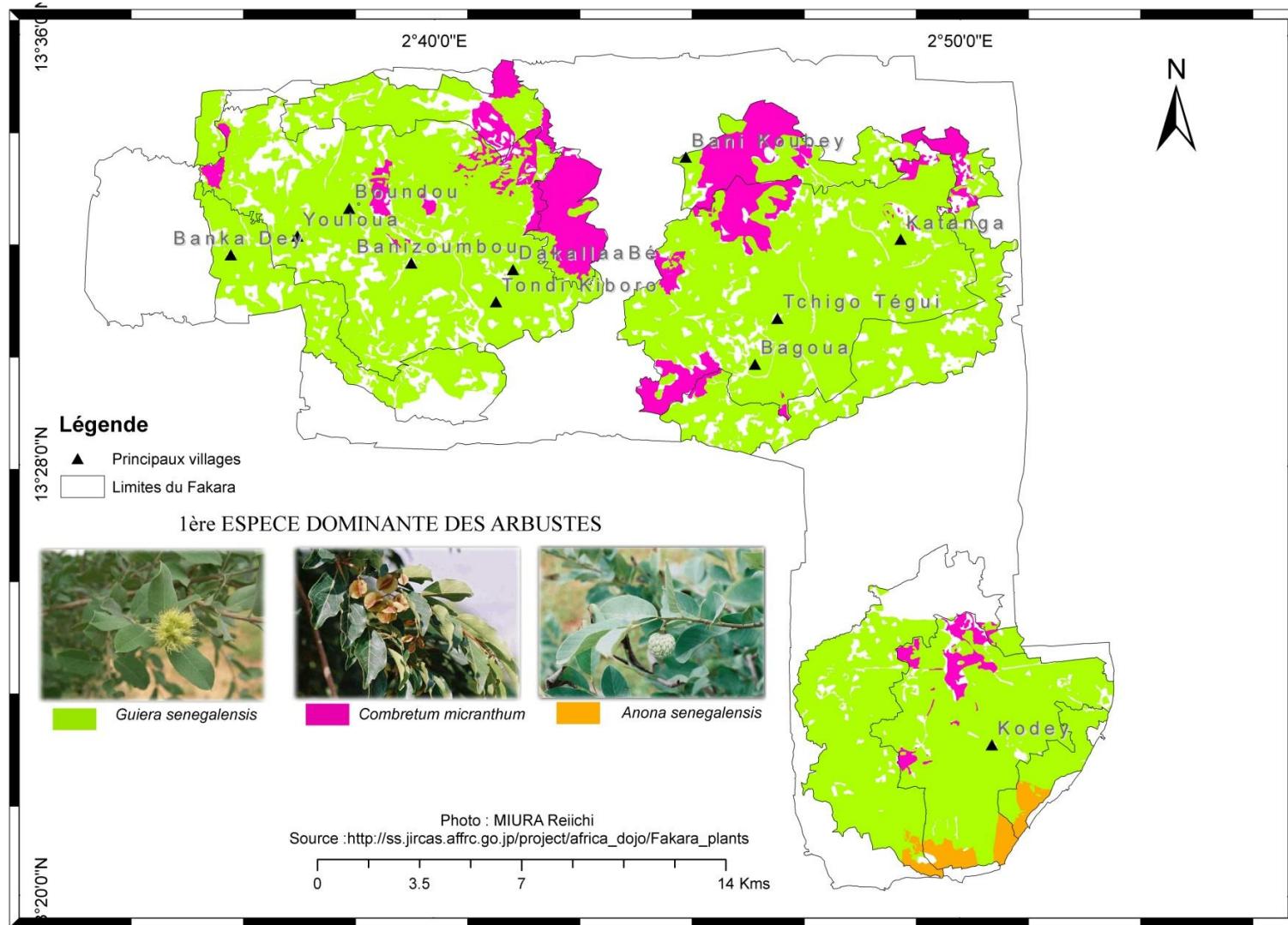


Figure 3-13 : Représentation des espèces dominantes des arbustes dans le Fakara

3.3.2.4 Evaluation de la biomasse herbacée et ligneuse en février et juin

L'évaluation des masses végétales des herbacées a aussi été réalisée en février et en juin. Pour les ligneux, aucune évaluation intermédiaire n'a été faite. Les variations saisonnières prises en compte pour les masses foliaires ligneuses proviennent de la littérature.

3.3.2.4.1 Evaluation des masses herbacées en février

Les évaluations des masses herbacées du mois de février portent sur les masses sur pied ou dressées, la litière et les masses exportées manuellement ou par charrette par les exploitations familiales. La litière représente 50% des masses disponibles et environ 20% sont exportées dans les concessions soit comme combustible, matériau de construction, ou destinées à l'alimentation du bétail. La fraction dressée représente 20% des masses totales au cours de cette période. Aucune perte par les feux n'existe dans cette région à l'exception de quelques îlots très localisés à Tchigo Tegui et Banizoumbou. La répartition des masses entre la fraction dressée et la litière est différente entre les terroirs ($\chi^2 = 43.8, ddl = 2, P < 0.0001$). L'exportation de chaumes dans les concessions varie de 10 à 19% (Table 3-9).

Table 3-9: Devenir des masses végétales dans les terroirs en pourcent (%) de la masse totale

Terroir	Masse dressée	Masse couchée	Masse exportée	Masse brûlée
Banizoumbou	14.5± 0.9	65.2±1.2	18.8±1.5	0.6±0.3
Tchigo Tegui	9.9±0.9	75.4±1.4	11.5±1.4	3.1±0.6
Kodey	17.7±1.8	65.9±1.6	15.3±1.7	0.3±0.2

Les quantités exportées et brûlées l'ont été entre le mois d'octobre et de février. Les masses disponibles (dressées et couchées) par terroir dans les zones de pâturages et de cultures sont comprises entre 622 et 742 kgMS ha⁻¹. La moyenne globale des trois terroirs est de l'ordre de 678 ± 99 kgMS ha⁻¹ (Table 3-10). On note une forte diminution du stock des résidus de cultures entre octobre et février. La contribution des cultures au disponible total, de l'ordre de 59% en octobre, est réduite de 13% en février.

Les variations de stock sont plus importantes au niveau des zones cultivées que sur les pâturages (Annexe 3-11). Les masses présentes sur les zones cultivées en février représentent 44% de la masse produite en octobre sur ces zones. En revanche, dans les jachères, les friches

et les zones incultivables, les masses disponibles varient entre 78% et 88% du total de la production mesurée en octobre.

Table 3-10: Biomasse par terroir sur les zones de cultures et de pâturages en février 1996

Terroir	Cultures	Pâturages	Moyenne terroir	Contribution par OS	
				Cultures	Pâturages
Banizoumbou	721 ± 164	591 ± 45	622 ± 73	27%	73%
Tchigo Tegui	789 ± 181	602 ± 45	671 ± 95	43%	57%
Kodey	753 ± 176	722 ± 55	742 ± 131	67%	33%
Total Fakara	755 ± 173	638 ± 48	678 ± 99	46%	54%

Unité : kgMS ha⁻¹

3.3.2.4.2 Évaluation de la biomasse herbacée en juin

En juin, la moyenne des masses disponibles sur les zones cultivées est de 380 ± 150 kgMS ha⁻¹ et sur les zones de pâturage de 210 ± 19 kgMS ha⁻¹ (Table 3-11). La contribution relative des pâturages et des cultures est identique à celle du mois d'octobre. Les variations de stock indiquent une disponibilité équivalente à 20% des masses produites au niveau des cultures et de l'ordre de 26% à 31 % pour les jachères, friches et sols incultivables. En début de saison des pluies, au mois de juin, la fraction dressée ne représente plus que 10%. En revanche, la litière représente 80%. Les variations de masse sur l'ensemble de la période (Annexe 3.12) montrent d'une part une similarité entre les cultures non fumées et fumées et d'autre part entre les friches, les jachères et les sols incultivables.

Table 3-11: Biomasse moyenne par terroir sur les zones de cultures et de pâturages en juin 1996

Terroir	Cultures	Pâturages	Moyenne terroir	Contribution par OS	
				Cultures	Pâturages
Banizoumbou	359 ± 140	243 ± 22	271 ± 50	32%	68%
Tchigo Tegui	388 ± 153	196 ± 18	267 ± 68	54%	46%
Kodey	392 ± 157	191 ± 17	326 ± 111	81%	19%
Total Fakara	380 ± 150	210 ± 19	288 ± 76	55%	45%

Unité : kgMS ha⁻¹

3.3.3 Contenu de la masse végétale en macroéléments N, P, K

Les analyses bromatologiques ont été réalisées par le laboratoire de l'ILRI sur les résidus de récolte et les herbacées des échantillons. Les résultats des échantillons d'octobre 1995, de février 1996 et de Juin 1996 ont été utilisés dans la présente étude. Les résultats des analyses portent sur 445 échantillons répartis sur les trois terroirs (Figure 3-14). Les facteurs pris en compte dans les relevés sont le terroir, l'unité géographique, la saison, l'organe végétal (tiges, gaines, feuilles), l'état végétatif, dressé ou litière, et la strate. Les teneurs pondérées par les masses végétales correspondantes sont agrégées par terroir et par période.

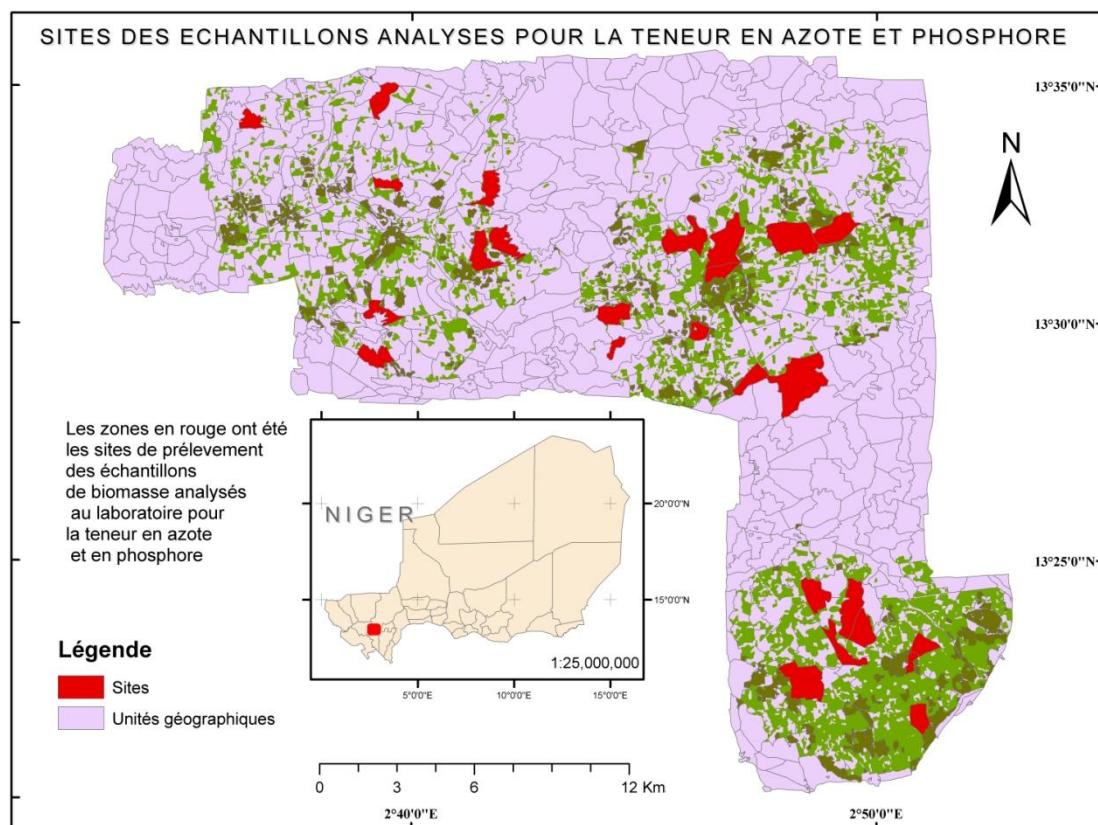


Figure 3-14 : Sites des échantillons de biomasse pour les analyses bromatologiques

3.3.3.1 Les résidus de récolte du mil

Les valeurs moyennes des chaumes de mil en azote sont de 7.5 ± 0.2 g/kgMS et de 0.47 ± 0.02 g/kg MS pour le phosphore (Table 3-12). Des différences significatives existent entre les terroirs en octobre et en juin (Table 3-13 & Annexe 3.13 – 3.14). Les ajustements testés pour la détermination du taux de phosphore à partir du taux d'azote sur l'ensemble de l'échantillon donnent des régressions significatives pour les strates denses ($p < 0.001$) et seulement en

février pour les strates éparses (Annexe 3.15). Les coefficients de détermination des périodes de février et de juin sont plus élevés que ceux de janvier dans la strate dense.

Table 3-12: Quantité moyenne d'azote et de phosphore contenu dans les résidus de mil

Paramètres	Nombre observations	Azote		Phosphore	
		moyenne	erreur type	moyenne	erreur type
Terroir					
Banizoumbou	155	8.3	± 0.3	0.650	± 0.05
Kodey	143	7.5	± 0.3	0.300	± 0.01
Tchigo Tegui	147	6.7	± 0.3	0.450	± 0.03
Fakara	445	7.5	± 0.2	0.470	± 0.02

Unité : Azote et Phosphore g/kg.MS

Table 3-13: Taux d'azote et de phosphore dans les résidus de récolte par période et par terroir

AZOTE						
	octobre		février		juin	
Banizoumbou	12.05	±5.03	7.74	±2.60	5.09	±1.91
Kodey	9.39	±3.25	8.03	±2.44	5.00	±1.30
Tchigo Tegui	8.50	±3.98	7.03	±2.38	4.12	±2.01
Fakara	10.04	±4.40	7.57	±2.49	4.75	±1.78
Test de Van der Waerden	$P=5.10^{-4}***$		$P=2.10^{-2} \text{ (NS)}$		$P=6.10^{-2}****$	
PHOSPHORE						
	Octobre		février		juin	
Banizoumbou	1.32	±0.70	0.41	±0.25	0.32	±0.09
Kodey	0.27	±0.18	0.37	±0.16	0.25	±0.09
Tchigo Tegui	0.76	±0.45	0.38	±0.18	0.24	±0.11
Fakara	0.78	±0.65	0.38	±0.20	0.27	±0.10
Test de Van der Waerden	$P=1.10^{-4}***$		$P=8.10^{-1} \text{ (NS)}$		$P=3.10^{-4}****$	

Unité : g.kg⁻¹ MS *** différence très significative entre terroirs, NS non significatif

3.3.3.2 Herbacées des pâtures

Au niveau des pâtures (jachères, sols incultivables, friches), l'analyse de 103 échantillons sur différentes périodes donnent des valeurs de l'ordre de 10.1 ± 0.6 g/kg d'azote et 0.76 ± 0.06 g/kg de phosphore (Table 3-14). Les valeurs d'azote et de phosphore sont significativement

différentes au cours des saisons ($\chi^2 = 46,9$ et $P < 10^{-4}$ et $ddl=3$). Dans les herbacées des pâturages, les régressions obtenues en février et en juin sont très significatives ($p < 0.001$) (Annexe 3.16). Le modèle ajusté en février est identique à celui observé dans la strate dense à la même période (Figure 3-15).

Table 3-14: Valeur moyenne d'azote et de phosphore contenus dans les herbacées

période	N	Azote		Phosphore	
		m	e.t	m	e.t
oct-95	18	16.07	± 1.2	1	± 0.1
févr-96	21	13.03	± 1.9	0.79	± 0.2
juin-96	19	7.47	± 0.5	0.68	± 0.1
Moyenne 3 dates	58	10.11	± 0.7	0.76	± 0.1

Unité : g.kg⁻¹MS, m= moyenne e.t = erreur type, N= taille échantillon

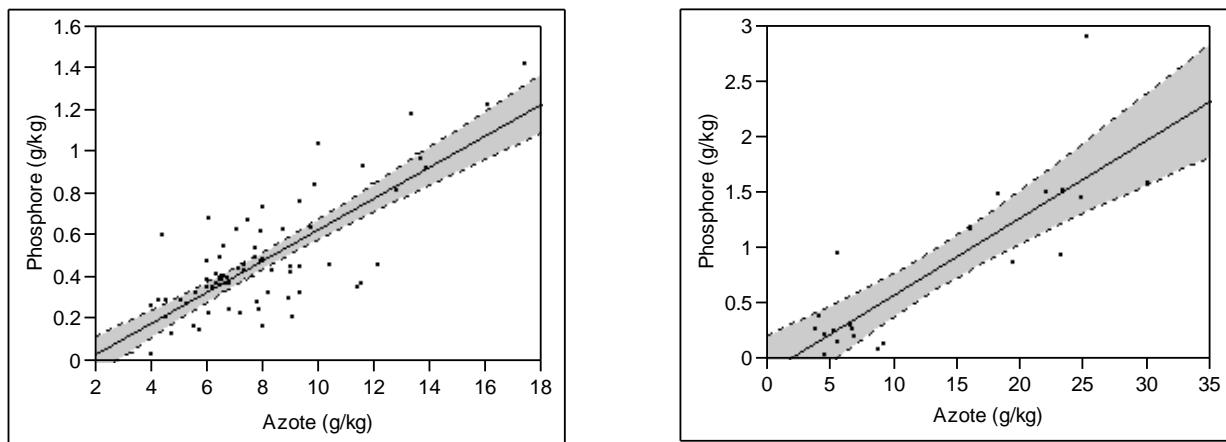


Figure 3-15 : Ajustement linéaire de la relation entre l'azote et le phosphore dans les résidus de culture (figure de gauche) et dans les herbacées (figure de droite) au mois de Février

3.3.3.3 Les ligneux

Le contenu en macro-éléments des ligneux provient en partie des travaux menés en zone sahélienne par Le Houerou (1980) et Breman, Kessler *et al.* (1991a). Les variations intra-saisonnieres sont moins importantes que celles des herbacées et certains ligneux auraient des concentrations très élevées en azote (Leng, 1997; Baidu-Forson, 1999) au cours de la saison sèche (Breman, Kessler *et al.*, 1991a). A partir des publications suivantes (Stoorvogel et Smaling, 1990b; Breman, Kessler *et al.*, 1991a; Buerkert et Hiernaux, 1998) et de celles citées précédemment, les valeurs moyennes retenues pour les ligneux sont de 33.9 et 2.85 g/kgMS respectivement pour l'azote et le phosphore.

3.3.3.4 Le potassium dans les résidus de mil, les herbacées des parcours et les ligneux

Les valeurs utilisées pour le contenu en potassium proviennent de la littérature (Stoorvogel, Smaling *et al.*, 1993b, Van Duivenbooden, 1996). Dans les études conduites au Fakara, le potassium n'a pas été mesuré car il est considéré comme non limitant dans la production végétale de ces régions (Penning de Vries et Djitéye, 1991). Les valeurs moyennes retenues pour le potassium sont de 19.5, 16.5 et 1.8 g/kgMS respectivement pour les résidus de mil, les herbacées et les ligneux.

3.3.4 Intégration des stocks herbacés et ligneux.

3.3.4.1 Les stocks de masse végétale

La quantification des ressources alimentaires disponibles pour l'alimentation du bétail est réalisée à partir de l'intégration des stocks d'herbacées et de ligneux et l'application des coefficients d'appétibilité. Les stocks totaux de macroéléments contenus dans la biomasse sont évalués à partir des éléments suivants :

- les masses végétales herbacées et ligneuses mesurées,
- les quantités de macroéléments mesurées dans les résidus de culture et les herbacées des parcours pour l'azote et le phosphore,
- les valeurs de potassium provenant de la littérature pour les résidus de culture, les herbacées des parcours et les ligneux,
- les valeurs d'azote et de phosphore pour les ligneux, issues de la littérature.

Les quantités de fourrage disponibles pour l'alimentation animale dans les 3 terroirs sont de 24 755 tMS (Table 3-15) soit 72% de la biomasse aérienne végétale évaluée en octobre, avec

une contribution respective des herbacées et des ligneux de 86% et 14%. Cette répartition est hétérogène entre les terroirs avec une démarcation plus nette de Kodey par rapport aux deux autres terroirs (Figure 3-16). La contribution des ligneux à Kodey est de 6%, donc très inférieure à la contribution des ligneux de Banizoumbou (19%) et de Tchigo Tegui (12%).

Table 3-15: Masse totale par terroir et par type de végétation

Terroir	Banizoumbou	Tchigo Tegui	Kodey	Total
Herbacées	7 583	8 213	5 598	21 394
Ligneux	1 820	1 158	382	3 360
Total	9 404	9 371	5 980	24 755

Unité : Tonne de matière sèche.

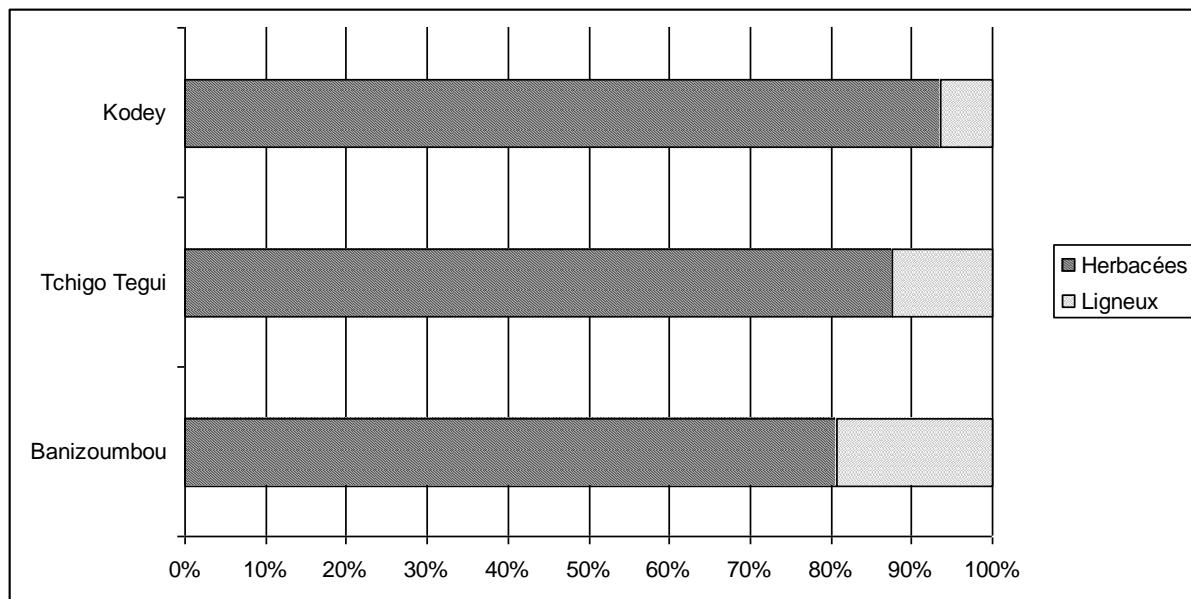


Figure 3-16 : Répartition des stocks de biomasse entre ligneux et herbacées dans les terroirs

Les corrélations établies entre les masses herbacées appétibles ou de résidus des cultures et les masses foliaires des ligneux sont significatives avec des tendances généralement négatives et des relations plus fortes dans les cultures que dans les pâturages. A l'échelle du terroir, les relations à Kodey sont beaucoup plus fortes (coefficient de Pearson $r=-0.30$). A l'échelle des occupations de sol, le coefficient de Pearson atteint -0.50 dans les cultures. Une combinaison du terroir et de l'occupation des sols donne des relations beaucoup plus fortes dans les cultures avec fumure ($r=-0.57$) et dans le terroir de Banizoumbou et Tchigo Tegui plus qu'à Kodey (Table 3-16).

Table 3-16: Coefficient de Pearson entre les masses herbacées et ligneuses ($P = 0.05$)

Terroir	Banizoumbou	Tchigo Tegui	Kodey
Friches	0.00 (NS)	-0.27 ****	-0.23 (NS)
Sols incultivables	0.26 (NS)	0.07 (NS)	0.07 (NS)
Jachères	-0.28 ****	-0.10 (NS)	-0.20 (NS)
Cultures fumées	-0.57 ****	-0.49 ****	-0.33 ****
Cultures sans fumure	-0.44****	-0.24 ****	-0.30 ****

La biomasse totale disponible à l'unité de surface dans le Fakara a été très variable avec un minimum de 0 et un maximum de $1972 \text{ kgMS.ha}^{-1}$ et les deux quartiles ont atteint respectivement 705 et $961 \text{ kg.MS ha}^{-1}$ (Figure 3-17, Figure 3-17).

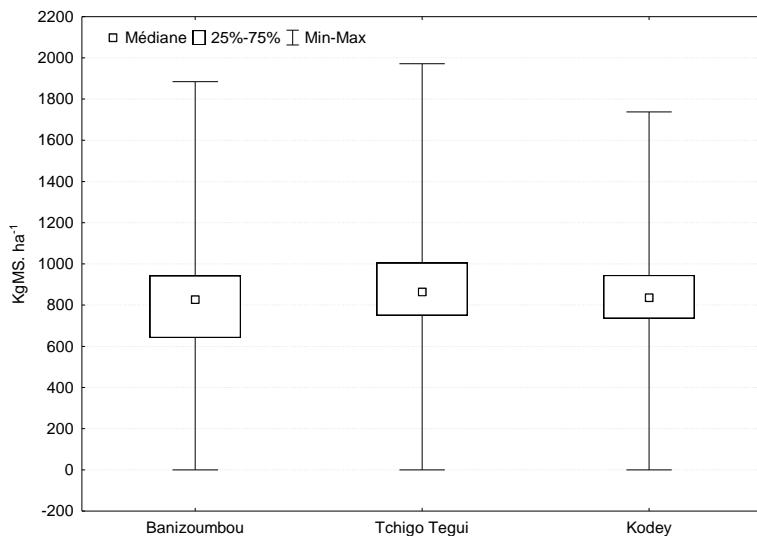


Figure 3-17: Biomasse végétale aérienne appétible par unité de surface par terroir

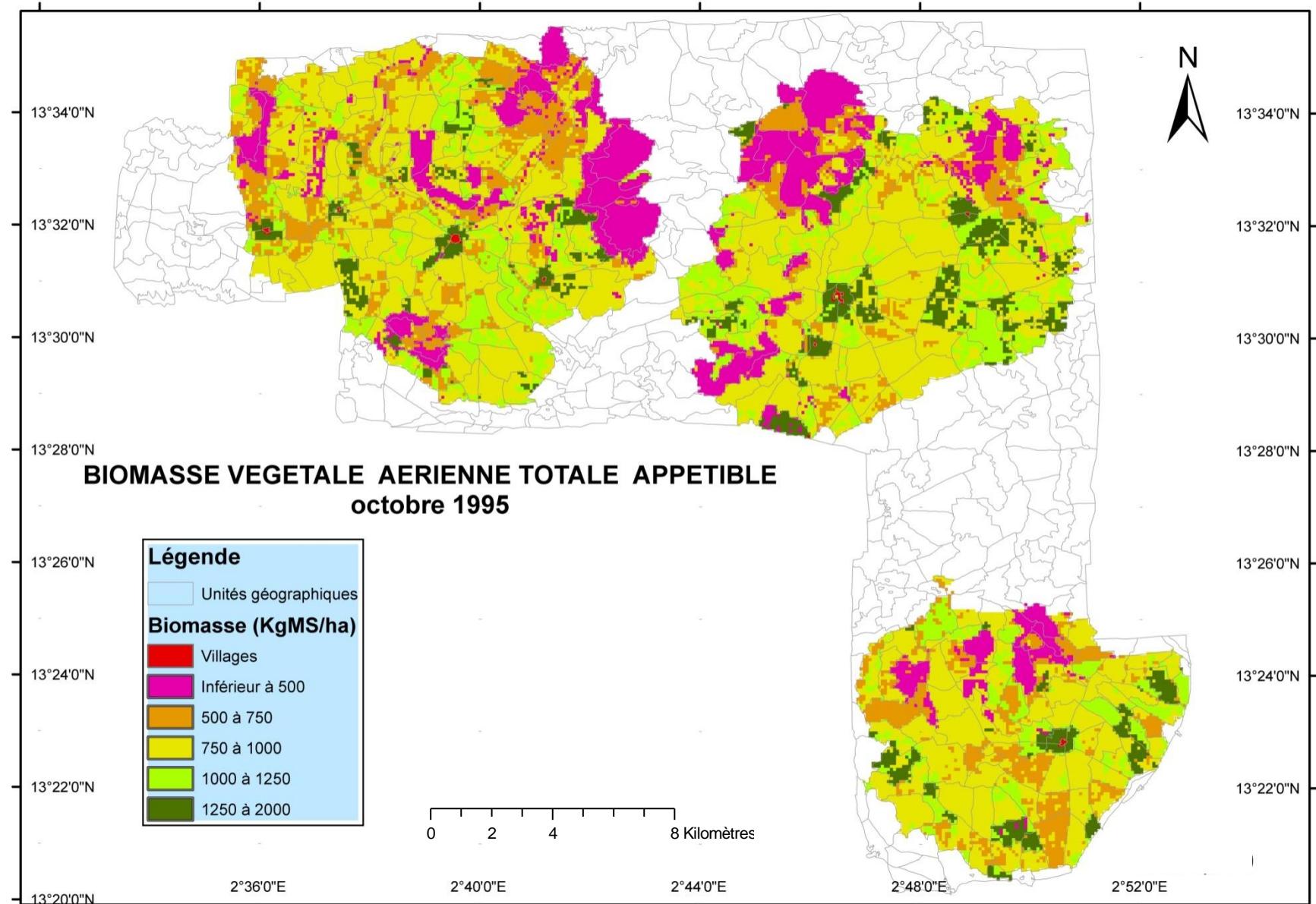


Figure 3-18 Biomasse végétale aérienne des herbacées et des ligneux à la fin de la saison de croissance - Octobre 1995

Les stocks de fourrage proviennent essentiellement des jachères et des champs non fumés, avec respectivement 36% et 35%, ensuite des friches et des champs fumés (11% et 12%). Les sols incultivables contribuent pour environ 5%. L'origine des stocks est essentiellement la jachère à Banizoumbou et Tchigo Tegui et les champs non fumés à Kodey (Figure 3-19).

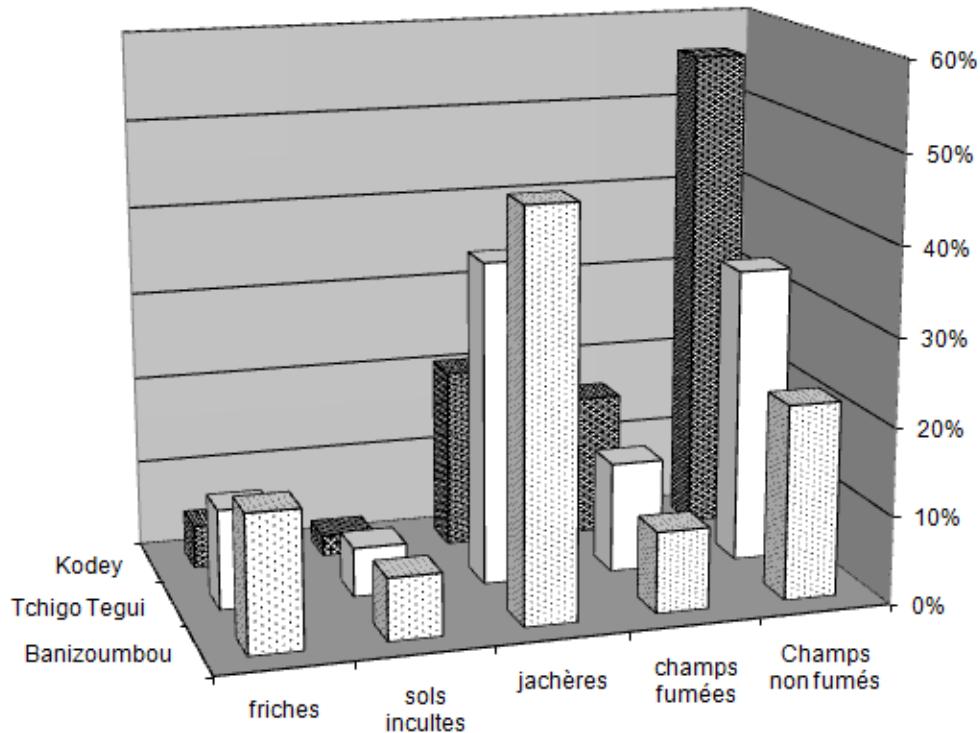


Figure 3-19 : Origine des stocks de biomasse par terroir

La contribution des différentes catégories de toposéquence au stock total est dominée par celle des glacis (68%), et le reste provient pour 12%, 11% et 9% respectivement des plateaux, des talus et des bas-fonds. Les mêmes tendances constatées au niveau des herbacées sont observées pour les terroirs avec des différences significatives entre eux. Dans les occupations de sol, le total de la biomasse a la même tendance que la biomasse herbacée avec des valeurs médianes de l'ordre de 1200 kg/ha pour les champs fumées, de l'ordre de 800 à 875 kg/ha pour les friches et jachères et de 262 kg/ha pour les sols incultes. La biomasse totale disponible est variable suivant la toposéquence avec une distinction nette entre les plateaux et les autres (Table 3-17). La comparaison deux à deux donne des différences très significatives sauf dans le couple glacis- bas-fonds ($p=0.06$).

Table 3-17: Stocks médian de biomasse végétale appétible par toposéquence

	Plateau	Talus	Glacis	Bas-fonds	ensemble
Banizoumbou	249	698	859	856	827
Tchigo Tegui	548	896	916	906	865
Kodey	423	882	845	716	836
ensemble	431	832	876	859	842

Unité = kgMS/ha

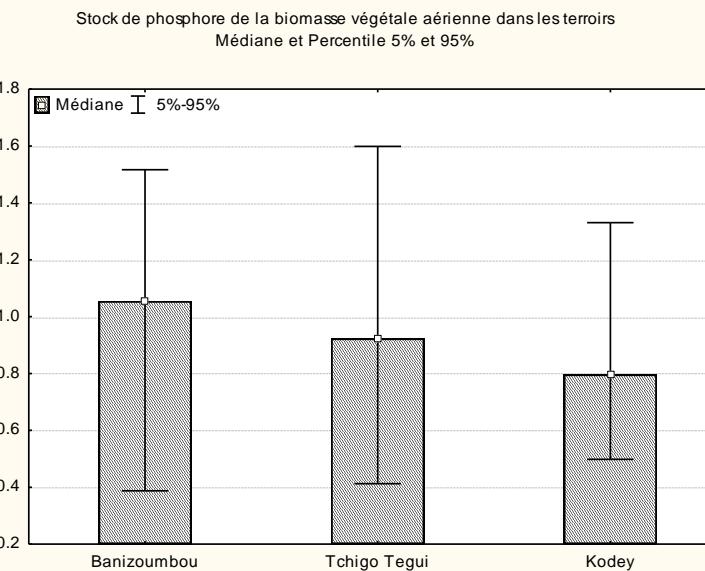
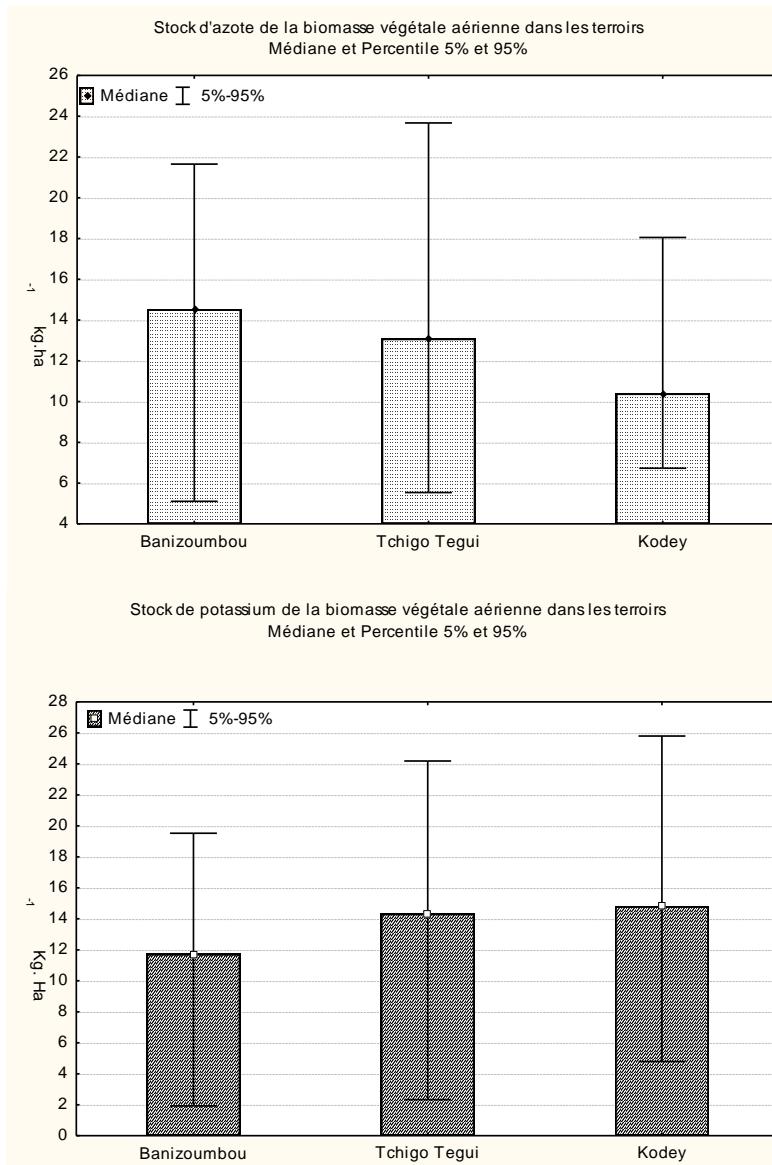
3.3.4.2 Les stocks de macroéléments azote, phosphore et potassium

Les stocks totaux des trois macroéléments sont respectivement pour l'azote, le phosphore et le potassium de 399, 28 et 391 tonnes avec des stocks moyens de 13.3 ± 5.2 , 0.9 ± 0.3 et 13.0 ± 6.1 kg/ha. (Table 3-18). Des différences significatives existent entre les trois terroirs pour les trois macro-éléments (test de Van der Waerden, $p < 10^{-4}$). L'azote et le phosphore sont plus élevés en moyenne à Banizoumbou et Tchigo Tegui qu'à Kodey. En revanche, le stock moyen de potassium de Kodey est supérieur à celui des deux autres terroirs. Les mêmes tendances sont perceptibles dans l'analyse des valeurs médianes (Figure 3-20).

Les régressions établies entre les stocks moyens des trois macroéléments sont très significatives ($P < 10^{-4}$). Le coefficient de corrélation entre N et P est de 0.98 et est supérieur à celui calculé entre N et K et entre P et K (Annexe 3.17). Ces corrélations montrent une plus forte liaison entre l'azote et le phosphore, et l'existence d'autres facteurs qui entraînent une plus grande variabilité dans les valeurs élevées des variables explicatives. Le facteur le plus en cause est l'occupation du sol.

Table 3-18 : Stocks moyens d'azote et erreur type d'azote, de phosphore, de potassium par occupation de sol et par terroir

Terroir/occupation de sol	Banizoumbou	Tchigo Tegui	Kodey	Ensemble
Azote (kg.ha^{-1})				
Friches	17.0 ± 4.6	15.4 ± 4.6	13.3 ± 4.1	15.9 ± 4.7
Sols incultes	7.7 ± 4.0	7.3 ± 3.3	8.4 ± 3.8	7.6 ± 3.7
Jachères	17.4 ± 3.9	18.2 ± 4.5	14.5 ± 4.1	17.2 ± 4.3
Cultures fumées	12.7 ± 3.3	13.3 ± 3.2	14.2 ± 3.0	13.4 ± 3.2
Cultures non fumées	11.2 ± 3.4	11.0 ± 3.1	9.8 ± 2.0	10.6 ± 2.9
Villages	3.0 ± 8.5	1.7 ± 5.8	- ± 0.0	2.1 ± 6.9
Ensemble	14.1 ± 5.5	13.5 ± 5.5	11.5 ± 3.7	13.3 ± 5.2
Phosphore (kg.ha^{-1})				
Friches	1.2 ± 0.3	1.0 ± 0.3	0.9 ± 0.3	1.1 ± 0.3
Sols incultes	0.6 ± 0.3	0.5 ± 0.2	0.6 ± 0.3	0.6 ± 0.3
Jachères	1.2 ± 0.3	1.2 ± 0.3	0.9 ± 0.3	1.2 ± 0.3
Cultures fumées	1.0 ± 0.3	1.0 ± 0.3	1.1 ± 0.2	1.0 ± 0.3
Cultures non fumées	0.9 ± 0.3	0.9 ± 0.3	0.8 ± 0.2	0.8 ± 0.2
Villages	0.2 ± 0.5	0.1 ± 0.3	- ± 0.0	0.1 ± 0.4
Ensemble	1.0 ± 0.4	1.0 ± 0.4	0.8 ± 0.2	1.0 ± 0.3
Potassium (kg.ha^{-1})				
Friches	10.8 ± 3.1	11.4 ± 4.5	10.5 ± 4.1	11.0 ± 3.8
Sols incultes	3.5 ± 2.7	3.7 ± 2.9	5.5 ± 3.3	3.7 ± 2.9
Jachères	11.4 ± 3.1	13.7 ± 3.6	12.0 ± 3.9	12.3 ± 3.6
Cultures fumées	20.4 ± 7.2	22.8 ± 7.0	25.0 ± 6.2	22.7 ± 7.1
Cultures non fumées	15.0 ± 3.2	16.3 ± 3.3	16.1 ± 3.4	15.9 ± 3.4
Villages	2.8 ± 8.1	1.7 ± 5.6	- ± 0.0	2.0 ± 6.6
Ensemble	11.3 ± 5.6	13.6 ± 6.4	15.3 ± 5.9	13.0 ± 6.1

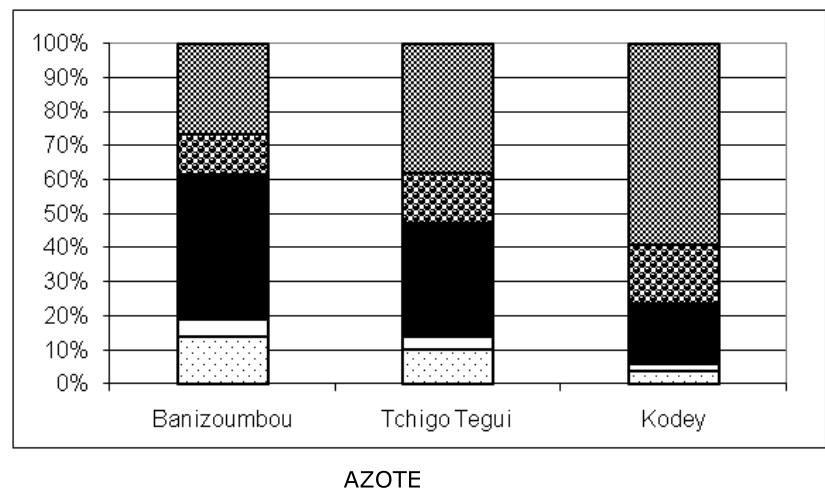


Les trois graphiques représentent la représentation médiane des stocks moyens par unité de surface des macro-éléments contenus dans la biomasse aérienne (herbacée et ligneuse) disponible pour l'alimentation animale à la fin de la saison de croissance des végétaux, en octobre pendant l'année 1995 dans les trois terroirs du Fakara. Le résultat du test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été très significatif pour les trois macro-éléments dans la comparaison d'ensemble des trois terroirs.

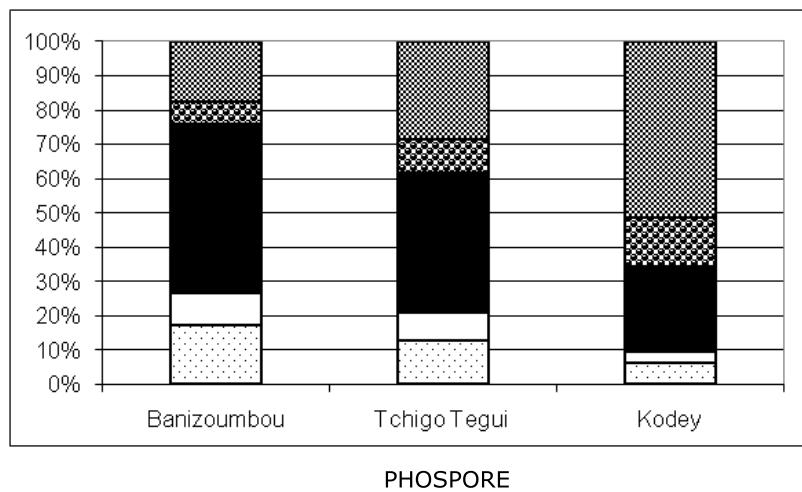
Figure 3-20 : Stock moyens de macroéléments de la biomasse aérienne herbacée et ligneuse par unité de surface

Soixante six pour cent (66%) des stocks totaux (Annexe 3.18) d'azote et de phosphore de la biomasse aérienne végétale sont situés dans les zones non mises en cultures et un peu plus du tiers dans les zones cultivées. Cette répartition entre cultures et pâturages n'est pas homogène entre terroir (LogLike R² du test d'homogénéité = 0.0715). Dans le terroir de Kodey, les stocks d'azote proviennent surtout des cultures (61.1%) avec un schéma de distribution des stocks opposé aux deux autres terroirs. L'azote et le phosphore présentent des schémas identiques. Les stocks de potassium ont également le même schéma de distribution avec des proportions plus élevées dans les cultures que celles observées dans l'azote et le phosphore et une distribution moins inégale des stocks entre les cultures (54%) et les pâturages (46%). Ces différences dans la répartition sont liées essentiellement aux différences d'occupation des sols dans les trois terroirs.

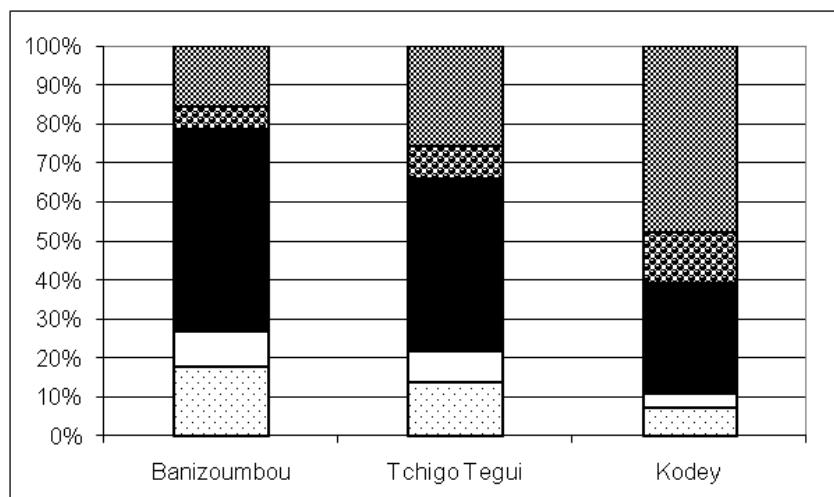
Les deux grands bassins d'azote sont les jachères (44%) et les cultures non fumées (26%). Le stock d'azote dans les friches, les cultures non fumées et les sols incultes ne représente respectivement que 14%, 8% et 8%. Cette répartition n'est pas homogène au niveau des trois terroirs. Les cultures à Kodey constituent la plus grande source de macro-éléments contrairement aux deux autres terroirs où les jachères sont prédominantes. Les stocks de phosphore proviennent essentiellement des jachères (41%) et des champs non fumés (29%). Les friches, les champs fumés et les sols incultivables apportent respectivement 13%, 9% et 8%. La distribution des stocks de potassium est différente de celle de l'azote et du phosphore avec 40% dans les cultures non fumées, 32% dans les jachères, 14% dans les cultures fumées.



AZOTE



PHOSPORE



PHOSPHORE

- Cultures non fumées
- Cultures fumées
- Jachères
- Sols incultes
- Friches

Figure 3-21: Importance des stocks totaux de N, P, K contenus dans les masses fourragères appétibles selon le type d'occupation de sol

Les stocks de macroéléments proviennent essentiellement des herbacées avec des proportions équivalentes pour l'azote et le phosphore (72% et 68%) et 97% du potassium (Annexe 3.19). Cette répartition n'est pas homogène selon le type d'occupation. Dans les zones de pâturage, les deux tiers (65% de l'azote et 58% du phosphore) proviennent des herbacées et dans les zones de cultures, cette proportion atteint 82% pour l'azote et 81% pour le phosphore.

Soixante-six pour cent des stocks d'azote sont situés dans les glacis, les stocks restants étant situés dans les plateaux (13%), dans les talus (12%) et dans les bas-fonds (9%). A l'échelle du terroir, et en fonction de la toposéquence, les stocks présents dans les plateaux et les bas-fonds, à Tchigo Tegui et à Banizoumbou sont de 26% et de 16%. La distribution des stocks de phosphore est similaire à celle de l'azote. Les stocks de potassium sont répartis entre les cultures et les pâturages avec des proportions respectives de 54% et de 46% (Annexe 3.20 à 22). Les stocks spatialisés à l'échelle des unités d'occupation dans l'unité géographique indiquent cette tendance de concentration dans les glacis par rapport aux autres unités topo géomorphologiques. (Figure 3-22, Figure 3-23, Figure 3-24).

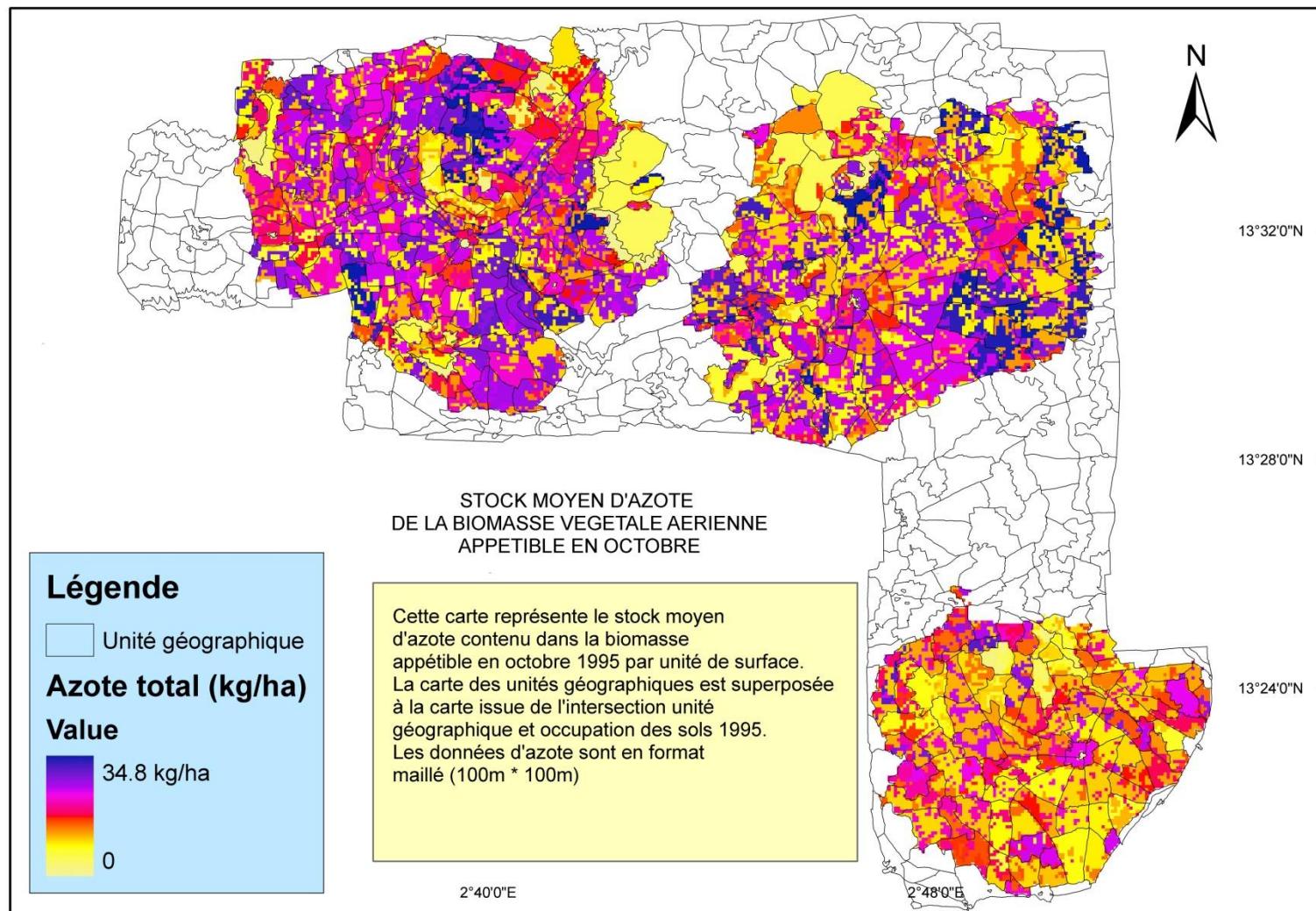


Figure 3-22 : Quantité d'azote contenue dans la biomasse végétale aérienne appétible par unité de surface

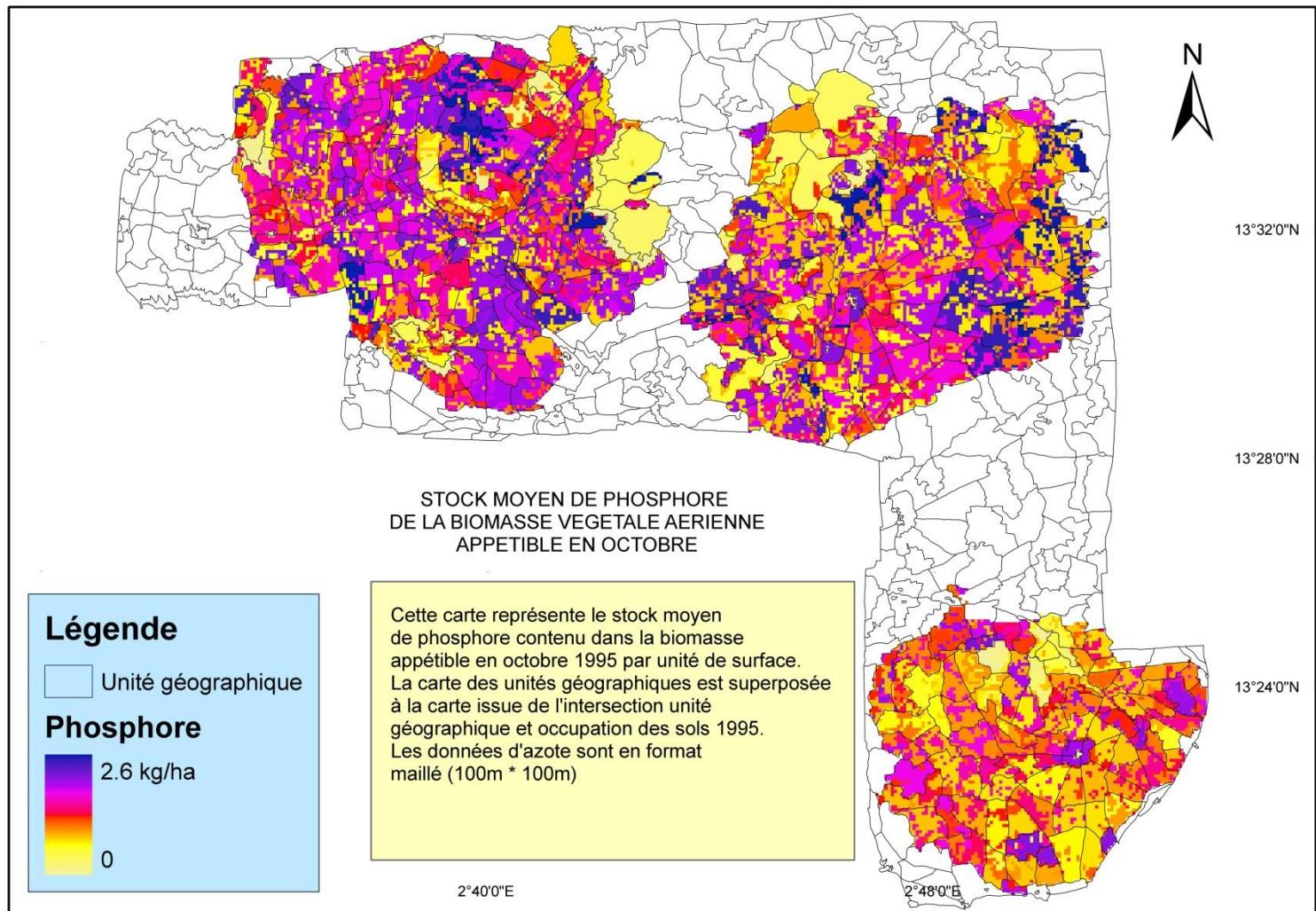


Figure 3-23 : Quantité de phosphore contenue dans la biomasse végétale aérienne appétible par unité de surface

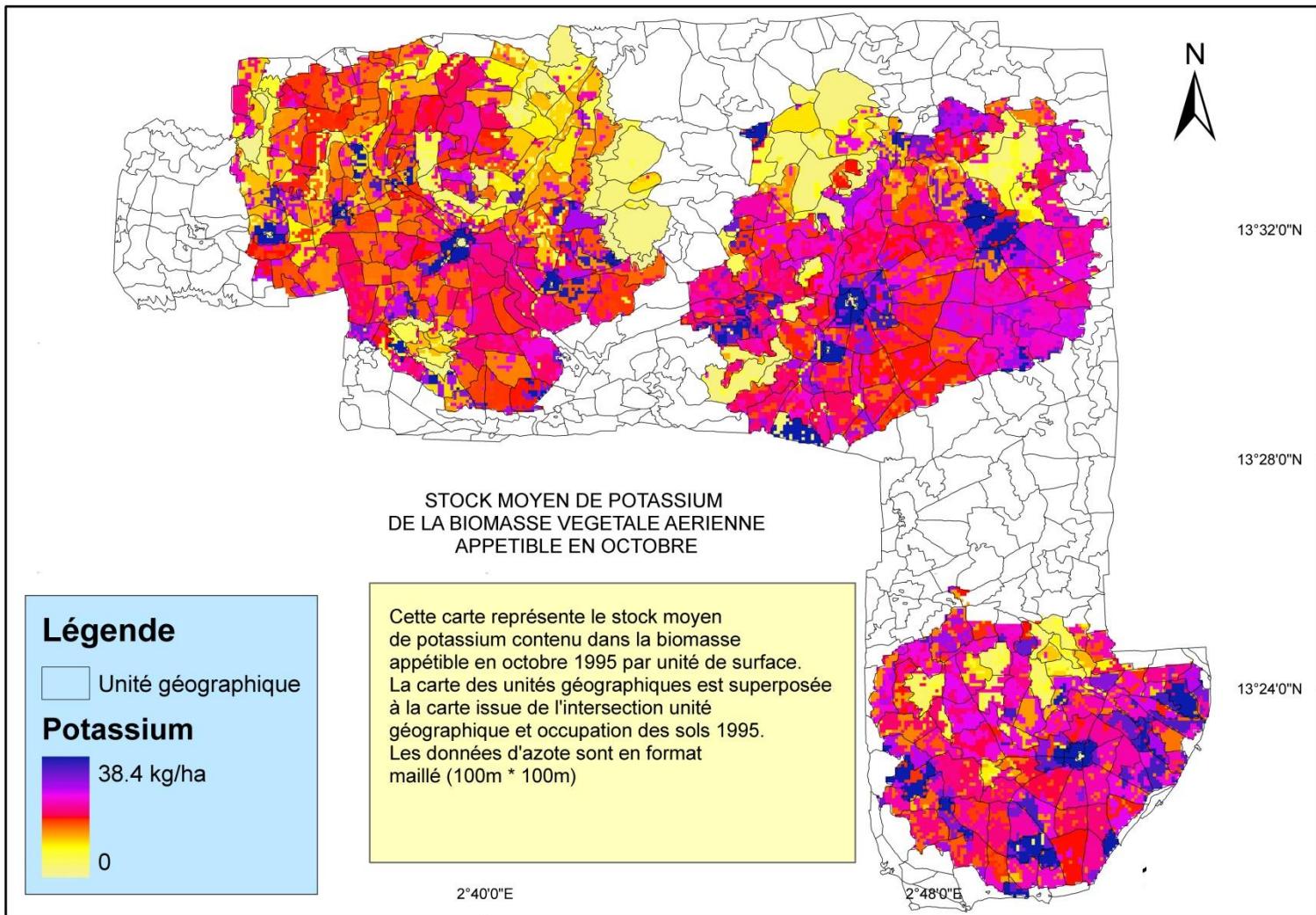


Figure 3-24 : Quantité de potassium contenue dans la biomasse végétale aérienne appétible par unité de surface

3.4 Discussion

Un des facteurs essentiels qui régit le cycle de la végétation sahélienne est le climat et plus particulièrement, la pluviosité et ses variations interannuelles (Penning de Vries et Djitèye, 1991; Le Houérou, 2009). La pluviosité annuelle relevée au cours des deux saisons de pluies des années 1994 et 1995 sur la station de Niamey est respectivement de 651.7 et 504.2 mm (AP3A, 2002). La normale climatologique 1971-2000 des précipitations annuelles a été de 505.9 ± 28.2 mm avec 95% des années ayant leur pluviosité comprise entre 448.2 et 563.7 mm. L'année 1994 peut être considérée comme une année particulière nettement pluvieuse ($t=-5.07$, $ddl=2$, $P = 10^{-6}$) et 1995 une année moyenne ($t=0.06$ et $P=0.95$, $ddl = 29$). Tout en étant conscient des limites des séries courtes et de l'importance révélatrice des années sèches, la période retenue pour cette étude peut être considérée comme représentative en termes de pluviosité. De ce point de vue, les résultats peuvent s'interpréter comme des situations moyennes relatives à la climatologie 1971-2000, dernière série considérée par l'Organisation Mondiale de la Météorologie comme série de référence pour les comparaisons.

3.4.1 Baisse de la productivité des pâturages et importance des résidus de cultures

La biogéographie du Fakara permet de le classer dans les régions du sahel-sud. Dans ces zones, la végétation est dominée par une strate herbacée, composée essentiellement des plantes annuelles, et une strate ligneuse peu dense. La production végétale est tributaire du régime des pluies et sa distribution, de la redistribution des eaux de pluie en surface et dans les sols, et du régime hydrique des sols (Hiernaux, 1984; Hiernaux et Le Houerou, 2006; Le Houérou, 2009). Les productivités moyennes des herbacées dans les jachères et parcours, relevées en octobre 1995, ne dépassent guère 1000 kg MS/ha. Les valeurs relevées dans la zone d'étude sont inférieures aux valeurs des études visant à caractériser la productivité des régions sahéliennes sur la base de situations climatologiques dites normales qui sont comprises entre 2000 kg/ha et 5000 kg/ha (Breman et de Wit, 1983 – Page 1342). Dans la synthèse des études cartographiques des parcours sur certains pays de l'Afrique subsaharienne (Niger, Tchad, Burkina Faso) publiés par l'EMVT (CTA et CIRAD-EMVT, 1991), les productions moyennes de masse végétale de 2500 kg/ha à 3000 kg/ha ont été relevées par des mesures directes. Des études plus récentes menées au Niger dans la région de Ticko ($13^{\circ}14'N$ – $1^{\circ}50'E$) (Achard et Banoin, 2003a) estiment les masses des jachères à 1903 kg.MS/ha. Dans

une région située plus au Nord ($14^{\circ}25'N$, $3^{\circ}26'E$), Schlecht, Hiernaux *et al.*(2006) trouvent des valeurs de masse de l'ordre de 578 kg.MS en 1997 et 1268 kg.MS/ha en 1998 pour les jachères. Cette zone présente une pluviosité moyenne annuelle inférieure à la région du Fakara, de l'ordre de 361 ± 110 mm.

Dans le Sahel, les débats sur la tendance actuelle de la végétation sont toujours en cours (Lars Hein, 2006). Les études récentes sur l'évolution de la végétation à l'aide des relations entre le coefficient d'efficacité pluvial global (CEP) ou rain use efficiency (RUE) et l'indice normalisé de végétation (INV) ou NDVI (Normal difference of Vegetation Index) tendent à montrer une reprise de la végétation au Sahel suite aux sécheresses de 1984 qui reste néanmoins discutée et remise en cause (Prince, Brown *et al.*, 1998; Olsson, Eklundh *et al.*, 2005; Lars Hein, 2006; Prince, Wessels *et al.*, 2007 ; Hountondji, 2008). Ces études questionnent une dégradation de la productivité dans certaines régions de l'ouest du Niger, l'est du Mali, le nord du Burkina Faso, l'est du Sénégal et le sud de la Mauritanie (Prince, Brown *et al.*, 1998). Par ailleurs, Ozer, Bodart *et al.* (2005), à partir des données climatiques relevées sur la période 1988 à 2003, ont montré qu'en dépit des augmentations notables des pluies, la végétation sahélienne n'a pas repris. La pression anthropique, c'est-à-dire l'importance de la gestion de l'écosystème par l'homme a même repris. Ces débats contradictoires qui ont commencé après les premières sécheresses des années 1973, reflètent-ils bien la dynamique de la végétation sahélienne ? Selon Le Houerou (1977) « *The answer to this question is not a simple one, for in some cases the process can be halted and the trend reversed. In other cases there is evidence that recovery is no longer possible, at least during a time span that is accessible to our observations* ». Par ailleurs, l'évolution de la végétation n'est pas toujours progressive et peut se faire par sauts (mortalités massives, cohortes de régénération (Hiernaux et Le Houerou, 2006).

Ces tendances concernent aussi les cultures du mil (Pieri, 1989) dont la productivité dépend de la pluviosité et sa variation interannuelle, de la redistribution de l'eau, et ce en fonction de la situation topographique (Geiger et Manu, 1993), des apports organiques ou minéraux (Voortman, Brouwer *et al.*, 2004). Les résultats des évaluations de masse des chaumes de mil sont marqués par des variations importantes entre les trois zones. Cette hétérogénéité est liée en partie aux pratiques agricoles. Des valeurs similaires à celles de cette étude sur les résidus

ont été obtenues par Baidu-Forson (1995) entre 1989 et 1991 dans trois districts, Hamdallaye, Dantiandou et Kirtachi, Loireau (1998) à travers l'analyse de données d'une série collectée entre 1992 et 1998 et par Schlecht (2006) à Chikal ($14^{\circ}25'N$, $3^{\circ}26'E$). Cependant, les différences signalées par cette dernière sont plus liées à la densité des poquets et non à l'apport de fumure. Ces deux facteurs restent cependant liés car la densité des poquets est une adaptation par le cultivateur à la fertilité attendue. Cette distinction en fonction de l'apport de fumure est faite par Achard et al (2003a) qui obtiennent des valeurs de l'ordre de 3 tonnes à l'hectare pour les champs fumés et 1402 kg.MS/ha pour les cultures non fumées dans le terroir de Ticko ($13^{\circ}14' N$, $1^{\circ}50'E$). Ces valeurs obtenues pour la fumure sont supérieures aux moyennes du Fakara. En revanche, celles obtenues dans les zones non cultivées sont du même ordre. Dans la station de Sadoré à Niamey ($13^{\circ}15'N$, $2^{\circ}18'E$), Yamoah (2002) obtient des valeurs moyennes similaires à cette étude, de 1180 kg.MS pour les tiges sur une série de 9 ans de 1984 à 1996 (les années 1987 à 1990 sont omises dans l'étude citée). Feil, Lamers *et al.*(1995) rapportent que les valeurs moyennes de masses de résidus au Niger, sans utilisation d'engrais chimiques, ne dépassent guère 1500 kg/ha dans les zones peu arrosées et 3000 kg/ha dans les zones très arrosées. Les variations constatées ne sont pas seulement liées aux pratiques agricoles de fumure mais aussi aux différences de pente entre champs (Rockstrom, Barron *et al.*, 1999). Elles fluctuent également selon la distance qui sépare les champs des zones d'habitation (campements ou villages) en lien en partie avec l'apport de déjections animales en grande quantité (Florax, Voortman *et al.*, 2002) et d'ordures ménagères (Buerkert, Mahler *et al.*, 1996) dans les parcelles proches des concessions. Dans ces parcelles appelées 'koaratché' dans l'ouest du Niger, certaines variétés à cycle court comme le mil hâtif sont cultivées en association avec des légumineuses qui favorisent un apport d'azote à la plante dans le cadre d'une stratégie de minimisation des risques (Bodé, 2004). Cette forme d'organisation et son impact sur les stocks de macro-éléments ont été étudiés par Manlay (2000). Dans cette région du Niger, cette organisation centrée autour du village commence à disparaître face à l'accroissement naturel de la population et des besoins en espaces cultureaux.

La minimisation des risques climatiques sur l'agriculture amène les agriculteurs à implanter des champs sur toutes les positions topographiques (Loireau, 1998). Dans les situations d'année extrêmement pluvieuse, les risques de perte de production sont élevés dans les

champs des vallées. Dans les années de sécheresse, ces risques sont plus élevés dans les champs situés en position topographique plus élevée (Geiger et Manu, 1993). Les variations observées par type géomorphologique sont moins prononcées dans les valeurs de résidus de cultures des champs non fumés. En dépit des différences statistiques observées, le niveau inférieur des résidus de récolte dans les champs de bas-fonds pourrait s'expliquer par la faible capacité des sols à limiter les ruissellements, donc sujets à une érosion hydrique plus forte malgré leur richesse en limon et en argile par rapport aux autres unités géomorphologiques (d'Herbes et Valentin, 1997). De même, le mil craint l'hydromorphie, mais aussi pousse très mal sur les sols lessivés, très acides et carencés en microéléments (Voortman, Brouwer *et al.*, 2004). En effet, de nombreux sols des vallées sont très sableux et sont lessivés (sable blanc) et donc très pauvres chimiquement.

Malgré l'importance des chaumes de mil consécutive à l'accroissement des superficies mises en cultures, l'impact de l'évolution fourragère sur l'élevage serait les longs déplacements du bétail pour la recherche des fourrages après épuisement des stocks de résidus (Fernández-Rivera, Hiernaux *et al.*, 2005). En effet, les résidus de cultures disparaissent rapidement en raison du calendrier d'utilisation de ces masses végétales établi par les populations elles-mêmes. Plusieurs exploitations ramassent les résidus de récolte. Les quantités demeurent cependant faibles et ne dépassent guère 15% des stocks totaux produits en chaumes avec des besoins des exploitations évalués à 33 kgMS/ha (Baidu-Forson, 1995) . Les utilisations de ces chaumes dans les exploitations agricoles vont du fourrage destiné aux animaux, à la construction, et aux ventes sur les marchés voisins (Baidu-Forson, 1994). La présence des adventices dans les cultures est du même ordre dans les trois terroirs. Ils représentent environ 10% de la masse des résidus de récolte. Les évaluations faites dans le Fakara sont un peu inférieures à celles mesurées par Schlecht (2006) qui sont de l'ordre de 299 kg/ha soit 13% des résidus de récolte en année moyenne. Les mauvaises herbes contribuent à l'alimentation des animaux et leur coefficient d'appétibilité est supérieur en moyenne à celui des chaumes (Lamers et Emhardt, 1995). Cette faible appétibilité des chaumes est surtout liée à la portion des tiges très peu appétée et non aux feuilles de mil. Cette observation sur la faible appétibilité des chaumes est contraire aux valeurs moyennes d'appétibilité donnée par Schlecht (2006) qui est de 50%. Parmi les espèces qui prolifèrent dans les champs, Lamers et al (1995) rapportent que la préférence des animaux est par ordre d'importance, *Eragrostis tremula* ('Kullun' en

Djerma) et *Cenchrus biflorus* ('Dani' en Djerma). Ces espèces constituent 70% des mauvaises herbes à Kodey et le 1/3 dans les deux autres terroirs.

3.4.2 Les jachères, source première des disponibilités alimentaires du bétail

La jachère est une technique agricole qui a toujours été mise en œuvre au Sahel pour la restauration de la fertilité des terres (Pieri, 1989; Floret et Pontanier, 1997). La nécessité de satisfaire les besoins alimentaires fondamentaux des populations a amené les agriculteurs à étendre les mises en culture sur de nouvelles terres, à réduire le cycle de repos des terres et à adopter d'autres techniques d'amélioration de la fertilité des sols par le recyclage du fumier des animaux. L'importance des jachères dans les terroirs dépend de la densité de la population et du degré d'utilisation des terres. La réduction de la durée et de la superficie des jachères a été longtemps considérée comme un indice d'appauvrissement des sols et de fragmentation des parcours (Achard, Konieczka *et al.*, 1996).

Les estimations de masse des herbacées et des résidus de récolte effectuées dans le Fakara donnent des valeurs moyennes de biomasse des résidus de récoltes supérieures à la biomasse des jachères avec une variabilité très prononcée selon la toposéquence. De même, les masses foliaires des arbres dans les jachères sont inférieures à celles de toutes les autres formes d'occupation de sol alors que les masses foliaires des arbustes sont supérieures à celles des cultures. Elles se caractérisent par des stocks moyens de macro-éléments azote et phosphore, plus élevés que pour d'autres occupations de sol. Par le biais du développement des plantes ligneuses, la jachère peut ainsi jouer un rôle important dans la reconstitution des réserves en matière organique, N et P des sols. Toutefois, la dynamique des jachères dépend de plusieurs facteurs dont la durée (Loireau, 1998; Akpo, Masse *et al.*, 2002), les paramètres du sol comme la texture et la matière organique contenue dans la couche superficielle entre 0-10 cm (Wezel et Haigis, 2002), l'impact de la pâture (Hiernaux et Fernandez-Rivera, 1995; Wezel et Schmelzer, 2002; Wezel et Schlecht, 2004) et des états de surface (Mahamane, Aboubacar Ichou *et al.*, 2007). Leur productivité peut aussi être liée à l'histoire de la parcelle en termes d'amendement (Gerard, Hiernaux *et al.*, 2001). Les biomasses obtenues dans cette étude sont conformes aux différentes études conduites dans les jachères (Pieri, 1989; Achard, Konieczka *et al.*, 1996; Achard et Banoin, 2003b) et une baisse de productivité serait liée à leur état

dégradé (lié essentiellement à la pression anthropique) mais aussi à leur faible degré de reconstitution de la fertilité quand les durées sont courtes.

L'importance des densités de population dans la région et leur impact sur les jachères confirme les observations faites par Manlay (2000) sur les faibles repousses de la végétation dans les jachères suite à une réduction du temps de jachère. Il faut nuancer les craintes de l'impact de la diminution des jachères sur le développement de ces régions. Dans certaines zones de la sous-région ouest africaine, en effet, la durée des jachères n'est plus considérée comme un critère important (Guigou, Giraudy *et al.*, 2005) car la culture permanente a été une source d'intensification des cultures, et a permis d'améliorer la sécurité alimentaire des populations.

3.4.3 L'origine des ressources alimentaires du bétail et la gestion des terres

L'augmentation des superficies mises en cultures et l'évolution de la gestion des cultures modifient les sources fourragères herbacées et ligneuses. Par contre, l'extension des superficies cultivées n'influence guère les disponibilités moyennes des herbacées des pâturages et des jachères. Ce phénomène est évoqué par Mortimore *et al.*(1999) à propos de la production de biomasse végétale dans les zones cultivées et dans les zones non cultivées de la région sahéro- soudanienne du Nigeria. En revanche, les stocks de biomasse végétale de la région de Kodey, avec un taux d'utilisation des terres plus élevé, seraient moins riches en azote et en phosphore. Cela pourrait être en partie liée à la faible contribution des ligneux dans ce terroir dont la masse appétible est de 308 kg/ha inférieure à la moyenne des trois terroirs qui est de 425 kg.

3.4.4 Les ligneux comme complément alimentaire des fourrages herbacés

La répartition des effectifs de ligneux et leur production foliaire est influencée par l'occupation des sols, la texture et le contenu en eau des sols (Hiernaux, 1980; Breman et de Ridder, 1993; Seghieri et Simier, 2002; Hiernaux et Le Houerou, 2006). Les couverts végétaux évalués dans le Fakara sont inférieurs aux prévisions de calculs du modèle de Breman *et al.*(1993). Les différences observées dans le couvert des arbres et des arbustes des trois terroirs seraient en partie liées à l'accroissement des défrichement agricoles, des besoins en bois de chauffe et surtout aux modes de gestion des systèmes cultures-jachères (Achard,

Konieczka *et al.*, 1996). Les besoins en bois devraient s'amplifier, dans cette région de part la sédentarisation des populations et une tendance à la nucléarisation des familles selon Ozer (2004), et surtout avec la proximité du marché urbain. Cette situation génère des consommations moyennes de bois estimées à 0.5 kilogramme de bois par personne et par jour pour des familles de 20 personnes et de 2 kilogrammes par jour pour des familles de moins de 5 personnes.

La production foliaire moyenne exprimée en matière sèche est du même ordre que celle des herbacées dans les pâturages mais inférieure dans les cultures et les jachères où la densité de la population ligneuse est plus élevée. Les ligneux du Fakara, comme dans la plupart des zones sahéliennes, sont composés essentiellement d'arbustes. Le couvert des arbustes, plus important que celui des arbres, caractérise bien les régions du sud du sahel dont la végétation arborée a été décimée par les sécheresses. Les arbres ont une densité de moins de 5 individus par hectare et le recouvrement des houppiers ne dépasse guère 5%. Hiernaux *et al.*(2006) caractérisent ce type de végétation de formation ouverte. Dans les pâturages et sur les plateaux à cuirasse du continental terminal, les couverts importants sont liés à la présence de brousse tigrée. En dépit de la faible profondeur des sols sur lesquels se trouvent la brousse tigrée, la richesse en azote de la végétation n'est pas négligeable, autant dans les zones dénudées que dans les zones végétalisées (Guillaume, Abbadie *et al.*, 1999). Le fonctionnement de ce type de végétation est lié à la redistribution de l'eau. Cette végétation se développe sur des pentes inférieures à 0.5% avec des bandes végétalisées comprises entre 50 et 70 mètres en moyenne (Hiernaux et Gerard, 1999). En dépit du rôle important de la brousse tigrée dans la fourniture des ressources fourragères, les risques liés à cette végétation existent et sont dus aux défrichements forestiers et agricoles.

Les cultures sont dominées par deux faciès de végétation ligneuse : les haies et les arbres des parcs agraires qui résultent de la préservation de certaines essences dans les champs. Ces arbres jouent un rôle dans la fertilité des sols. D'autres utilisations sont la pharmacopée et l'alimentation humaine par la cueillette de fruits. Leur utilité dans les champs pour la fertilité des sols est sujet à débat dans les zones sahéliennes (Akpo, Grouzis *et al.*, 1995). La production foliaire de ces espèces représente plus de la moitié des masses foliaires ligneuses des champs. Elle fait aussi l'objet d'attention particulière de la part des agriculteurs.

Cependant, dans ces régions, les mesures visant à une gestion de ces parcs arborés sont rares (Mahamane, 1997). La production présente un risque car les recherches sur ces espèces restent insuffisantes et leur sort est laissé aux mains des agriculteurs qui effectuent des prélèvements à leur guise. Par ailleurs, l'absence de plantation suite aux prélèvements par les populations, la régénération problématique dans les champs cultivés de façon permanente et le raccourcissement des jachères sont préjudiciables à toute action de révégétalisation ligneuse du Sahel. Parmi les ligneux, la contribution des haies utilisées pour les délimitations foncières n'est pas négligeable. Amina (2004) par télédétection observe une augmentation du nombre de haies et de leur longueur moyenne à Tchigo Tegui. Celle-ci serait due à l'augmentation des défrichements dans les terres cultivées. Face à ces risques de réduction de la densité et des masses des ligneux, certaines espèces comme *Guiera senegalensis* se maintiennent dans les jachères et les autres occupations de sols, et continuent à coloniser les espaces. Cette présence forte de *Guiera senegalensis* dans les jachères et dans toutes les occupations de sol est liée, d'une part, à sa localisation topographique qui détermine le bilan d'eau par les infiltrations (Hiernaux, Cisse *et al.*, 1994), aux caractéristiques physiologiques de la plante et, d'autre part, à son comportement anisohydrique qui lui permet de poursuivre une activité photosynthétique même en saison sèche (Seghieri et Simier, 2002; Seghieri, Simier *et al.*, 2005).

Les relations significatives trouvées dans certaines zones entre les masses foliaires ligneuses et les masses herbacées indiquent une tendance à la raréfaction des ligneux dans les zones de cultures et une exacerbation dans les zones de culture avec fumure. Cette tendance est liée d'une part à une compétition pour l'utilisation de l'eau qui se traduit aussi par une variation inverse des recouvrements (Daget et Djellouli, 2002) et surtout aux coupes et rabattages annuels ou deux fois par an des buissons pour réduire leur compétition vis-à-vis des cultures. De telles tendances sont en contradiction avec les politiques tendant à encourager les agriculteurs à laisser plus d'arbres dans les champs lors des défrichements. Il n'existe pas ici de relation de cause à effet sur une possible interaction entre arbre et cultures car ce type de relation, même s'il existe, notamment par la compétition pour l'eau, la lumière (Wezel, Rajot *et al.*, 2000), dépend de l'échelle d'analyse, du système d'exploitation et reste complexe (Akpo, Grouzis *et al.*, 1995). En termes qualitatifs, le rôle des ligneux dans la contribution aux stocks d'azote et de phosphore reste très important car ils représentent 28% du stock d'azote de l'ensemble des sites. Cette très grande richesse des ligneux en azote et phosphore les prédispose à être un aliment de complément essentiel pour les ruminants car leur

concentration varie moins au cours de la saison que celle des herbacées. Toutefois, les tanins et les facteurs environnementaux influencent aussi cette disponibilité.

3.4.5 Le contenu en azote, phosphore et potassium des masses végétales

Les quantités de macro-éléments contenus dans la végétation herbacée et ligneuse déterminent en partie leur qualité et leur utilisation par le bétail comme fourrage (Penning de Vries et Djitèye, 1991). Les taux d'azote contenus dans les herbacées sont similaires à ceux donnés par Breman et al (1993) pour une année normale dans les régions du Sahel méridional. Les mesures effectuées dans le Fakara montrent que les teneurs en azote et phosphore sont à leur maximum lorsque la biomasse est maximale. Toutefois ces valeurs chutent très rapidement pour se stabiliser pendant la saison sèche. Cette tendance est aussi confirmée par les travaux de Ayantunde (1999) dans la région de Toukounous ($14^{\circ}30'N$, $3^{\circ}17'E$). Les variations observées entre les herbacées et le mil indiquent une meilleure qualité nutritive des herbacées naturelles que celle des résidus du mil, seulement accessibles après les récoltes.

3.4.6 L'apport des systèmes d'information géographique dans l'évaluation des ressources fourragères

L'évaluation de la productivité des pâturages d'herbacées et ligneux et l'appréciation de leur valeur dans les régions sahéliennes a toujours été au centre des préoccupations des pastoralistes, écologistes et nutritionnistes du bétail (Breman et Cissé, 1977; Hiernaux, 1980; Penning de Vries, 1983; Cisse, 1986; Boudet, Carriere *et al.*, 1987). Dans les régions sahéliennes, les pâturages naturels sont la principale source d'alimentation des herbivores domestiques. Plusieurs méthodes d'évaluation ont été développées à l'échelle locale et régionale pour évaluer la biomasse herbacée et ligneuse (Poissonet, Toure *et al.*, 1986; Breman, Kessler *et al.*, 1991b; Breman et de Ridder, 1993; Daget, 1996). Elles ont permis d'aller vers une plus grande précision des estimations. Elles ont également permis d'évaluer la variabilité interannuelle de la productivité des pâturages sahéliens et d'en déterminer les principaux facteurs que sont la pluviosité et les sols (Hiernaux, 1984; Hiernaux, Diarra *et al.*, 1988; Le Houerou, 1992; Hiernaux, 1995). Les méthodes de cartographie des pâturages (Boudet et Baeyens, 1963; Boudet, 1975a) ont aussi évolué avec les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection (Hiernaux et Gerard, 1999) tant pour la stratification du milieu que pour la cartographie. L'utilisation du SIG permet de coupler les résultats des

mesures de végétation aux informations géolocalisées afin d'améliorer les connaissances sur la dynamique des stocks et de prendre en compte les aspects liés à leur gestion par les exploitations agricoles (Turner, Hiernaux *et al.*, 2005). L'utilisation des SIG dans la présente étude tant dans la stratification que de la restitution des résultats a permis d'approfondir la connaissance des parcours en relation avec le milieu, l'organisation du territoire et l'occupation des sols. La cartographie des données de végétation, réalisée par occupation de sol, couplée à des unités de compte basées sur la géomorphologie et des repères visibles sur le terrain (unité géographique) ont permis de représenter spatialement les valeurs obtenues des masses des cultures sans fumure et avec fumure, des jachères, des pâturages. Cette différentiation des modalités d'occupation de sol, rendue possible grâce à la cartographie de cette occupation des sols, améliore la précision spatiale des données utilisées dans le calcul des flux et bilans par intersection et superposition des couches spatiales. Si l'on considère la variabilité spatiale de la production végétale à petite échelle (Florax, Voortman *et al.*, 2002; Voortman, Brouwer *et al.*, 2002), une des limites de la désagrégation des valeurs de masses par unité réside dans l'uniformité d'attribution par type d'occupation des sols à l'intérieur d'une unité géographique. Cependant, les valeurs distinctes et confirmées par plusieurs études au Sahel, entre d'une part les masses des cultures avec fumure et sans fumure, et d'autre part entre les masses des jachères (Floret, 1997) et des friches, justifient une telle approche différenciée en lieu et place de moyennes de valeurs agrégées pour les zones cultivées ou non dans l'unité géographique comme nous le verrons dans l'approche NUTMON dans les chapitres qui suivent. Le choix du passage de la représentation vectorielle des données à la représentation maillée ou pixellaire dans les études environnementales ou écologiques fait l'objet de débats. Au-delà des différences liées à la modélisation des données elles-mêmes, le mode raster permet une conversion de différentes entités dans la même résolution et facilite ainsi des opérations mathématiques (Longley, Goodchild *et al.*, 2005). Cependant, les erreurs de positionnement peuvent être plus élevées dans le mode raster que dans le mode vecteur. Une des limites à une telle solution reste le choix de la résolution qui peut ne pas être approprié (Regnault, McMaster *et al.*, 2007). Dans notre cas, la prise en compte de la résolution minimale d'une des données existantes qui est celle issue du croisement des cartes d'occupation des sols et des unités géographiques est une des solutions retenues et utilisées dans Wade *et al.* (1998). Une telle approche ne biaise pas les résultats car le nombre de pixels se substitue (à la résolution près) à la superficie des polygones.

3.5 Conclusion partielle

A l'aide du système d'information géographique, les données de l'étude de la production des pâturages et de la végétation des cultures ont été spatialisées par occupation des sols dans l'unité géographique tout au long d'un cycle annuel. L'étude conduite sur trois terroirs qui se différencient par le degré d'occupation des sols a montré que les valeurs de masse fourragère varient de 390 kgMS.ha^{-1} dans les sols incultivables à $2147 \text{ kgMS.ha}^{-1}$ dans les champs fumés. Dans ces zones, la densité du couvert ligneux est en moyenne de 4 individus à l'hectare pour les arbres et de 260 individus à l'hectare pour les arbustes. Le couvert arboré et arbustif sont respectivement de 16% et 17%. La masse foliaire ligneuse est en moyenne de 49 kgMS.ha^{-1} dans les zones cultivées, 655 kgMS.ha^{-1} sur les jachères et 974 kgMS.ha^{-1} sur les sols incultivables.

La répartition des masses végétales entre les cultures et les pâturages diffèrent d'un terroir à l'autre. Elle est en moyenne de 59% pour les cultures et de 41% pour les pâturages dans l'ensemble du Fakara. La dynamique temporelle au cours du cycle annuel montre que les variations de stock sont plus importantes dans les zones cultivées que sur les pâturages entre octobre et février. Ces variations sont liées à l'ouverture des champs. En début de saison du cycle annuel suivant, les variations de stock indiquent une disponibilité équivalente à 20% des masses produites dans les champs et de l'ordre de 26% à 31 % dans les jachères, friches et sols incultivables.

Les analyses bromatologiques ont permis de relever que les valeurs de résidus de mil étaient de 7.5 g.kgMS^{-1} pour N, et 0.47 g.kgMS^{-1} pour P. Ces valeurs sont inférieures à celles mesurées dans les herbacées qui sont de 10 g.kgMS^{-1} pour N et de 0.8 g.kgMS^{-1} pour P. Les valeurs rapportées de la littérature pour les ligneux sont les plus élevées et sont de l'ordre de 24 g.kgMS^{-1} pour N et de 1.8 g.kgMS^{-1} pour P. Les valeurs moyennes retenues pour le potassium sont de 19.5, 16.5 et 1.8 g/kgMS pour les résidus de mil, les herbacées et les ligneux respectivement.

Les stocks totaux disponibles pour l'alimentation animale proviennent des herbacées à 86% et des ligneux pour 14% avec des différences entre terroir liées aux écarts d'occupation des sols.

Dans l'ensemble du Fakara, Les stocks de fourrage proviennent essentiellement des jachères et des champs non fumés, avec respectivement 36% et 35%, ensuite des friches et des champs fumés (11% et 12%). Les stocks de macro-éléments sont de l'ordre de 13, 0.9 et 13 kg/ha pour N, P, K. La répartition des stocks de matières organiques et d'éléments minéraux dans la végétation est essentiellement liée à l'occupation des sols et sa distribution le long des toposéquences.

4 Caractéristiques et dynamique temporelle des élevages bovins, ovins et caprins.

4.1 Introduction

Les effectifs de bétail sont utilisés pour quantifier les flux générés par l'ingestion des fourrages sur des parcours et les champs d'une part, et les déjections animales d'autre part. Dans les bilans minéraux établis par Stoorvogel (1990a), le bétail a été pris en compte de manière indirecte à travers l'utilisation de fumier d'origine animale dans les champs¹³. La prise en compte du cheptel dans les calculs de bilans minéraux s'est faite progressivement avec une catégorisation des espèces animales présentes dans l'exploitation (William, Powell *et al.*, 1993a; De Leeuw, Reynolds *et al.*, 1995). Dans l'étude du transfert de fertilité dans les agroécosystèmes, l'équipe de l'ILRI a mené un suivi du cheptel dans la région du Fakara (Turner, 1995b). Cette étude a permis d'intégrer plusieurs paramètres des troupeaux dans les évaluations de bilan de matière organique, d'azote et phosphore au niveau du terroir (Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.*, 1997, Busqué, 2002, La Rovere, 2001; Achard et Banoin, 2003b; Schlecht, Hiernaux *et al.*, 2004).

Dans son exercice des bilans réalisé sur 3 pays africains , Ghana, Kenya et Mali, Roy, Misra et al (2003), utilisent des cartes de densité du bétail provenant de leurs travaux sur la distribution spatiale du cheptel (FAO, 2000b) pour évaluer les déjections animales des animaux domestiques. Dans les bilans calculés à l'échelle de l'exploitation agricole avec la méthode NUTMON (De Jager, Kariuku *et al.*, 1998), une place importante est accordée à l'élevage. Il est considéré comme une entité fonctionnelle du cycle des éléments nutritifs au même titre que les cultures, par les prélèvements fourragers comme par le recyclage sous forme d'éléments fertilisants au reste du système. Dans le modèle NUTMON, la variabilité spatiotemporelle du cheptel au sein de l'exploitation est prise en compte (Vlaming, Van den Bosch *et al.*, 2001). Les effectifs du cheptel sont considérés par espèce, par catégorie d'âge, par spécialisation en termes de production (lait, viande, traction). Dans les régions du Niger, les travaux conduits par Schlecht, Hiernaux *et al.* (2004) ont mis en évidence l'importance d'une meilleure connaissance du cheptel, ses activités notamment celles relatives à l'ingestion

¹³ Page 19: *Even though livestock is an essential element of African farming, extensive grazing is not considering in the present study. Only arable land is taken into account.*

et à l'excrétion, pour une évaluation précise des flux liés à l'élevage à l'échelle du terroir et des occupations des sols.

Les données sur le cheptel dans les pays sahéliens à l'échelle nationale sont très souvent jugées non fiables (Wint et Bourn, 1994). Dans cette région, plusieurs méthodes de dénombrement du cheptel à l'échelle nationale, sub-nationale ou locale ont été développées (Lesnoff, 1999; Michel, 2000; Lesnoff, 2008). Les techniques d'enquête utilisées sont le sondage aléatoire, l'enquête aérienne, le comptage direct (Bahili et Djaby, 1993) ou indirect (Wade, Schultz *et al.*, 1998). Ces techniques ont permis d'améliorer les données statistiques des pays publiées par des organismes comme la FAO dans les statistiques mondiales de l'Agriculture (FAO, 2007; FAO, 2008). L'utilisation de ces données dans les modèles de bilans, eu égard à l'échelle utilisée ne tient pas suffisamment compte de la variabilité spatio-temporelle des effectifs du cheptel, et du type de propriété. Un chiffre annuel par espèce et par pays ou par région est utilisé pour les analyses macro-économiques. Les récentes spatialisations des densités du cheptel à l'échelle mondiale et à des résolutions de trois minutes d'arc¹⁴ soit approximativement de 5 km (FAO, 2007) offrent de nouvelles perspectives dans l'utilisation des données du cheptel dans les modélisations environnementales (Thornton, van de Steeg *et al.*, 2009).

L'enquête sur le cheptel conduit dans les terroirs du Fakara par l'équipe de l'ILRI de 1992 à 1996 a permis de développer la base de l'utilisation détaillée des données sur le cheptel et sur les activités d'élevage (Turner, 1995b, Turner et Hiernaux, 2002; Turner, Hiernaux *et al.*, 2005). Cette enquête a eu essentiellement pour objectif de quantifier les effectifs du cheptel par espèce, classe d'âge, type de propriété au cours des différentes saisons pour *établir la base des calculs d'ingestion et d'excrétion dans les trois terroirs au niveau de chaque exploitation et par saison*. Cette évaluation des effectifs du cheptel introduit des critères essentiels de différentiation des exploitations, basés sur l'importance du cheptel mais aussi de la conduite (circuits quotidiens).

Dans le cadre des développements méthodologiques entrepris dans cette étude, ces données sont utilisées, et ce sur la base d'un premier travail effectué pour l'étude des paramètres

¹⁴ Une résolution d'une minute d'arc fait approximativement 1.86 km.

zootechniques des troupeaux bovins, ovins et caprins (Hiernaux, Turner *et al.*, 2004). Sur l'ensemble des données du suivi et pour les besoins de l'étude, une année complète de données a été extraite et utilisée afin d'étudier l'évolution saisonnière des troupeaux dans les exploitations et d'en déterminer les tendances. Celles-ci peuvent influencer les flux liés à l'élevage dans l'exploitation agricole et ce, aux différentes échelles de gestion des ressources naturelles. La limitation volontaire à une année donnée permet une juxtaposition des informations avec celles des stocks organiques et minéraux issus des cultures et des parcours. Après une description succincte de la méthodologie utilisée par l'équipe de l'ILRI, sont présentés les résultats d'analyse des données sur 12 mois : les effectifs moyens, la composition des troupeaux, la répartition par type de propriété du bétail, les durées de transhumance, les charges saisonnières et les pratiques de conduite au pâturage. L'ensemble de ces critères de différentiation des troupeaux et des terroirs est analysé et discuté pour quantifier la variabilité temporelle des effectifs animaux au cours de la période considérée et les différences existantes entre les exploitations agricoles des trois zones de l'étude qui peuvent avoir un impact sur le bilan des éléments minéraux.

4.2 Méthodologie

4.2.1 L'enquête de terrain

Plusieurs informations concourent à l'estimation de la distribution spatio-temporelle des ingestions et excréptions du bétail, une des plus déterminantes étant le nombre ou effectif du bétail (Turner et Hiernaux, 2002; Hiernaux et Ayantude, 2004 ; Fernández-Rivera, Hiernaux *et al.*, 2005). Le dénombrement des animaux a été mené de façon exhaustive sur les trois zones d'étude, Banizoumbou (B), Tchigo Tegui (T) et Kodey (K) couvrant 17 villages et campements pastoraux associés (Turner, 1995b; Turner et Hiernaux, 2002; Hiernaux, Turner *et al.*, 2004). Ce dénombrement a commencé en avril 1995 et a duré 20 mois. La figure 4.1 présente les localités d'attache des éleveurs enquêtés. Dans les différentes localités, les gestionnaires d'animaux habitant les villages ou les campements situés autour des villages font partie du champ de l'enquête (Hiernaux et Turner, 2002). Les Djerma résident habituellement dans les villages et les peuls résident dans des campements, à la périphérie des villages, à proximité des champs qui leur ont été octroyés.

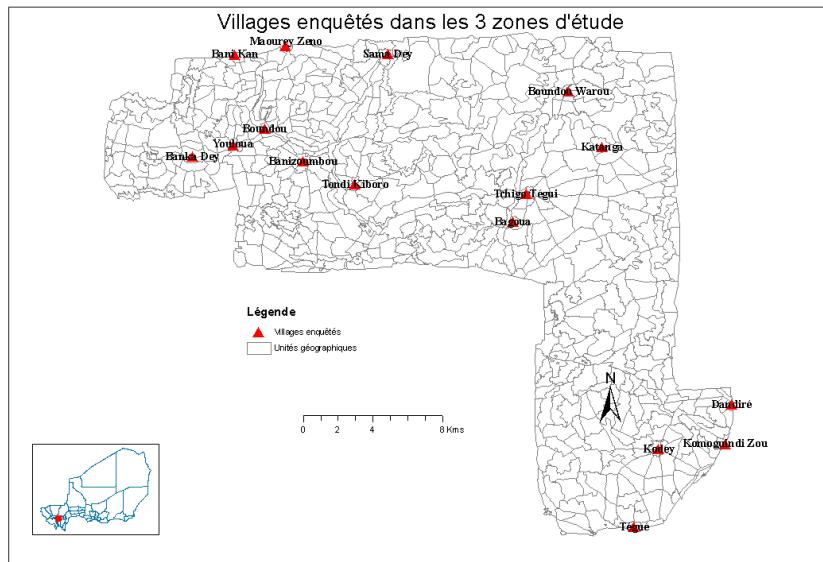


Figure 4-1 : Carte des villages enquêtés dans les trois terroirs

Le dénombrement du cheptel a été effectué par énumération précise et par différence d'état entre deux visites (Turner et Hiernaux, 2002; Turner, Hiernaux *et al.*, 2005). Le dénombrement précis ne peut se faire qu'en présence de l'ensemble des animaux. Le dénombrement par différence n'enregistre que les mouvements d'entrée et de sortie des animaux du troupeau depuis les dernières visites en se basant sur les dires du berger. Les entrées et les sorties ont pour cause possible le confiage, les naissances, les mortalités, les achats, les ventes ainsi que les départs et retours de transhumance. Chaque troupeau a été visité à intervalles réguliers de 3 semaines. Les espèces concernées sont les bovins, ovins et caprins.

La détermination de l'âge des animaux est un exercice qui comporte beaucoup d'incertitude quand le cheptel n'est pas suivi de manière individuelle et systématique depuis les mises bas. Les catégories d'animaux définies dans cette enquête (Turner, 1995b) prennent en compte un âge approximatif et l'état physiologique. Pour les trois espèces étudiées, le premier élément de différentiation des catégories est le sexe. Le second élément est l'âge des animaux. L'état physiologique intervient en troisième position notamment dans la distinction des femelles lactantes ou non. Les jeunes sont subdivisés en groupe de jeunes sevrés ou non et les adultes femelles sont subdivisés en lactantes ou non.

Table 4-1 : Catégories d'animaux retenus dans le suivi des troupeaux

Espèce	Sexe	Non sevrés	jeunes	Adultes	lactantes
Bovins	mâles	non sevrés	sevrés < 3 ans	> 3 ans	-
	femelles	non sevrés	sevrés sans petit	au moins 1 veau	lactantes
Ovins		non sevrés	sevrés < 1 an	> 1 an	lactantes
Caprins		non sevrés	sevrés < 1 an	> 1 an	lactantes

Les propriétaires d'animaux ont été subdivisés en deux groupes dénommés "gestionnaires" et "non gestionnaires" (Turner, 1995b). Les gestionnaires se définissent surtout par une gestion du troupeau avec conduite au parcours au moins partielle, alors que les non gestionnaires, sont soit des propriétaires qui confient la gestion de leurs animaux à des bergers hors de la famille, soit des propriétaires qui n'ont pas suffisamment de bétail pour que la gestion inclue une conduite au parcours (quelques têtes élevées dans la concession au piquet). Le gardiennage des troupeaux est pratiqué au cours de l'hivernage principalement. Le confiage peut prendre plusieurs formes selon la nature de la rémunération du gardien et la durée du confiage. La rémunération peut être en nature (céréales ou autres aliments destinés à l'alimentation humaine) ou en argent. On distingue le confiage des femelles, indéterminé dans le temps et basé sur une rémunération en fumier ou en lait, appelé le *taalfi*, et le confiage associé à une forme d'aide qui est matérialisée par le don d'un ou de deux produits issus des femelles confiées. Ce confiage est appelé *Habanai*¹⁵ (Colin De verdière, 1995, page 13; Ayantunde, Williams *et al.*, 2000; Turner, Hiernaux *et al.*, 2005). L'importance de ces pratiques est analysée dans cette étude.

L'échantillon sur lequel cette étude a été conduite comptabilise dans les trois zones 158 gestionnaires et 299 non gestionnaires, toutes exploitations comprises. L'intervalle moyen entre deux visites consécutives, calculé à partir des fichiers d'enquête, est un peu supérieur aux trois semaines retenues a priori. Il est de 30 jours en moyenne pour les gestionnaires et de 25 jours pour les non gestionnaires. Cette différence est due à la pratique des transhumances par les gestionnaires qui cause l'absence saisonnière pour plusieurs semaines. La durée du suivi correspond au nombre de jours entre la première visite et la dernière visite. Elle est de 310 jours pour les gestionnaires et de 203 jours pour les non gestionnaires. Les tableaux ci-dessous (Table 4-2, Table 4-3) donnent le nombre d'exploitations suivies, le nombre total de

¹⁵ Habanaï ou habannay selon Colin de Verdière (1995) : *Le "habannay" est la pratique Peul de confier une femelle à un éleveur, qui va l'élever et gardera son premier produit femelle pour lui.*

jours de suivi et les intervalles moyens entre deux visites par terroir et par espèce animale. Pour les besoins de synthèse, les normes suivantes sont utilisées pour convertir le bétail en unité bétail tropical (UBT)¹⁶ (Boudet, 1975b) en se basant sur les poids vifs moyens des animaux (Powell, Fernandez-Rivera *et al.*, 1994; Fernandez-Rivera, Williams *et al.*, 1995b ;Hiernaux, Ayantude *et al.*, 1999) : 1 bovin adulte = 0.7 UBT, 1 caprin adulte = 0.08 UBT, 1 ovin adulte = 0.1 UBT. Les jeunes et les animaux non sevrés sont comptabilisés respectivement à 50 % et 25% de la valeur de l'adulte. Au cours de l'enquête, les dates exactes sont mentionnées lors des visites, cependant une partie des traitements statistiques est réalisée suivant le découpage de l'année en 5 périodes retenues pour distinguer les saisons dans cette étude et permettre ainsi la liaison avec les stocks fourragers (cf. Chapitre 2).

Table 4-2 : Indicateurs du suivi des troupeaux gestionnaires

Suivi gestionnaire		Bovins		Caprins		Ovins	
		N	Jours suivis	N	Jours suivis	N	Jours suivis
Terroir	Banizoumbou	40	330	36	329	32	296
	Kodey	55	317	44	301	29	290
	Tchigo Tegui	56	316	41	301	44	287
Paramètre synthèse	Nbre de Troupeaux (N)	151		121		105	
	Jours moyens de suivi	320		310		291	
Intervalle moyen entre visites		25		28		29	

Table 4-3 : Indicateurs du suivi du bétail des non gestionnaires

Suivi non gestionnaire		Bovins		Caprins		Ovins	
		N	Jours suivis	N	Jours suivis	N	Jours suivis
Terroir	Banizoumbou	63	193	113	329	118	296
	Kodey	24	230	40	301	40	290
	Tchigo Tegui	70	171	89	301	86	287
Paramètre synthèse	Nbre de Troupeaux (N)	157 (142 sans bovins)		242 (57 sans caprins)		244 (55 sans ovins)	
	Jours moyens de suivi	185		202		217	
Intervalle moyen entre visites		32		25		27	

N= nombre de troupeaux

¹⁶ Selon Boudet (1975b) – Page 266: “L'expression de la charge en kg de poids vif est simple, mais peut paraître curieuse -pour des utilisateurs non avertis. Les bovins tropicaux adultes étant des animaux dont le poids moyen varie de 200 à 400 kg, une unité bovin tropical peut être définie comme un bovin de 250 kg à l'entretien. C'est l'U.B.T. équivalent au L.S.U. des pays de langue anglaise (L.S.U. = livestock standard unit).”

4.2.2 Le traitement statistique des données

L'analyse effectuée a pour but d'étudier la dynamique temporelle des élevages bovins, ovins, caprins dans les exploitations familiales, d'en dégager des paramètres simples sur les troupeaux qui peuvent avoir un impact sur les flux et bilans de matières organiques et d'éléments minéraux. Toutes les données relatives à cette partie ont été traitées par le logiciel SAS®, version 9.1.3. Les comparaisons multiples de moyennes ont été réalisées par la procédure GLM et le test d'ajustement de Tukey¹⁷ (SAS, 2004b). Les tests d'homogénéité ont été réalisés par la procédure FREQ afin d'estimer la valeur du χ^2 . Les moyennes et les erreurs standards ont été calculées par la procédure MEANS ou UNIVARIATE. Les tableaux ont été réalisés par la procédure TABULATE.

Les moyennes sont présentées dans le texte avec leur erreur standard ou erreur type pour exprimer l'écart type de la distribution d'échantillonnage des différents paramètres étudiés (Dagnelie, 2007b). L'erreur standard exprime la précision de la mesure faite sur l'échantillon (Altman et Bland, 2005). L'utilisation de l'écart type exprimant la variabilité de la population de laquelle est issue l'échantillon sera mentionnée de manière explicite. La limite supérieure retenue pour la probabilité liée au risque de première espèce α est de 5%. Les valeurs de probabilité (p) calculées pour des tests d'inférence statistique seront dites significatives, hautement significatives ou très hautement significatives aux valeurs de probabilité p comprises entre 5% et 1%, 1% et 1‰ et inférieures à 1‰, respectivement. Les statistiques présentées portent sur la période du 16 Juin 1995 au 15/06/1996.

¹⁷ See SAS/STAT 9.1 User's Guide (page 1816) for MCP comparisons: *If you are interested in all pairwise comparisons or all comparisons with a control, you should use Tukey's or Dunnett's test, respectively, in order to make the strongest possible inferences.*

4.3 Résultats

4.3.1 Taille des troupeaux

4.3.1.1 Taille des troupeaux des gestionnaires

La taille moyenne des troupeaux a été évaluée à partir des effectifs des troupeaux de chaque exploitation pondérée par le nombre de jours entre deux visites. Cette approche suppose que les troupeaux entre deux visites, et pendant les transhumances, gardent la même taille. Les gestionnaires des trois zones d'étude ont en moyenne 20.8 ± 0.4 bovins, 30.6 ± 1.0 caprins et 17.9 ± 0.7 ovins (Table 4-4). Le nombre moyen de têtes par espèce et par gestionnaire n'est pas significativement différent au seuil de probabilité de 5% entre les trois zones d'étude. La variabilité est beaucoup plus élevée dans les effectifs caprins entre terroirs que dans les effectifs bovins et ovins. L'écart moyen entre les troupeaux caprins de Tchigo Tegui et des deux autres zones atteint 5 têtes.

Table 4-4 : Taille moyenne des troupeaux des gestionnaires

Espèce	Bovins		Caprins		Ovins	
	Nbre de troupeaux (N)	Taille moyenne (m)	N	m	N	m
Banizoumbou	40	22.1 ± 0.8	36	28.6 ± 1.3	32	18.1 ± 1.2
Kodey	55	19.4 ± 0.6	44	29.1 ± 1.6	29	17.1 ± 1.1
Tchigo Tegui	56	21.1 ± 0.8	41	34.4 ± 2.1	44	18.3 ± 1.2
Ensemble	151	20.8 ± 0.4	121	30.6 ± 1.0	105	17.9 ± 0.7

Dans les trois zones, les troupeaux de grande taille cohabitent avec les petits troupeaux. Les grands troupeaux présents dans cette zone ne dépassent guère 70 têtes par espèce. Le décile 90% des bovins, caprins et ovins se situe respectivement à 43, 69 et 42 têtes. Les troupeaux de petite taille se situent au premier quartile à 9, 9 et 3 têtes respectivement pour les bovins, ovins et caprins (Figure 4-2). La variation relative de la taille des troupeaux entre le début et la fin d'année (Annexe 4.1) est respectivement de 20%, 39% et 17% pour les bovins, caprins et ovins. Le taux de croît brut¹⁸ des troupeaux bovins sur l'ensemble de la zone est de 7.8%. Ce taux varie d'un terroir à l'autre. Il est respectivement de 11.0%, 13.6%, 0.4% pour Banizoumbou, Kodey et Tchigo Tegui.

¹⁸ Le taux de croît est un terme admis en démographie animale (Lesnoff, Lancelot *et al.*, 2007)

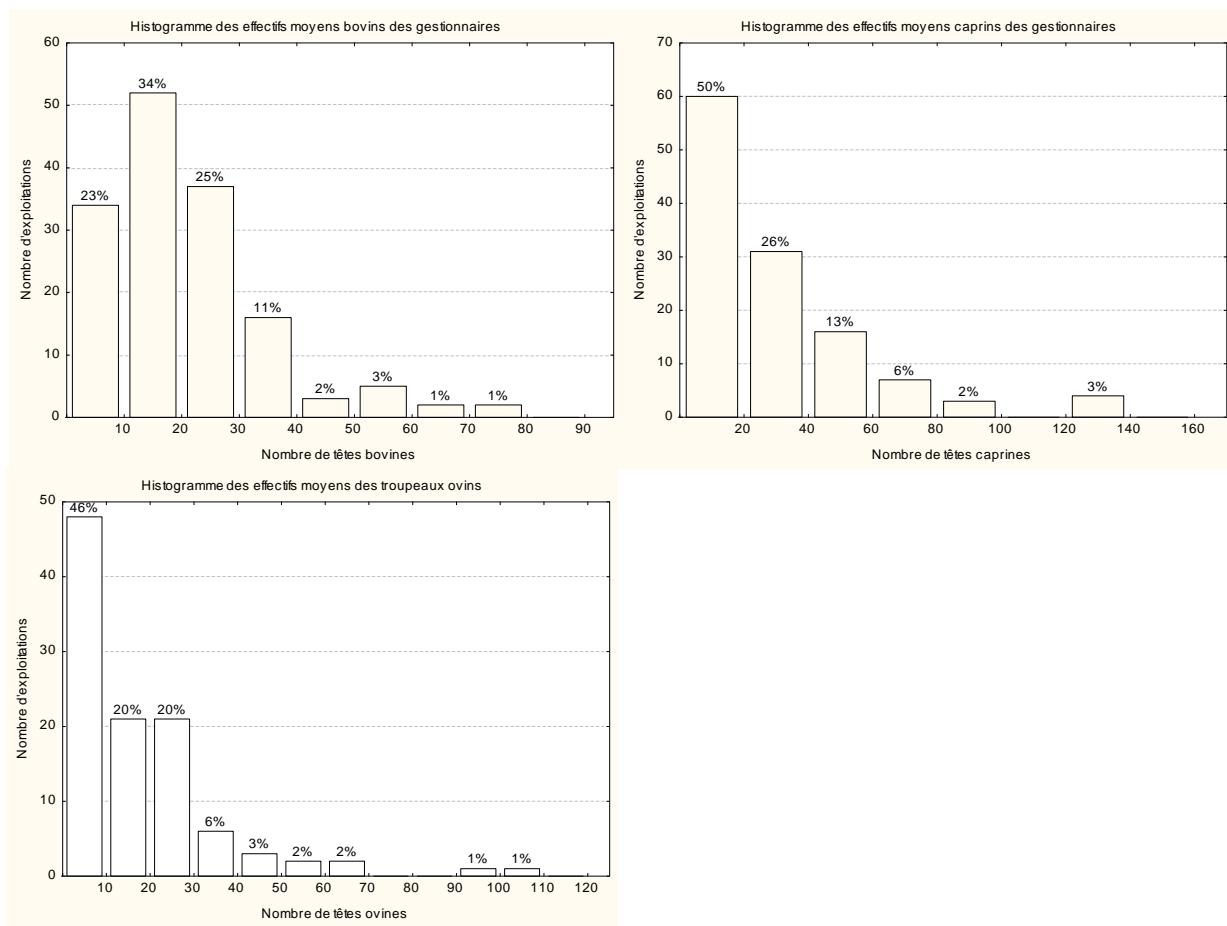


Figure 4-2 : Distribution des troupeaux bovins, caprins et ovins selon le nombre de têtes

4.3.1.2 Taille des troupeaux des non gestionnaires

La taille moyenne des troupeaux des non gestionnaires est beaucoup plus faible que celle des gestionnaires. Elle est évaluée sur la base des exploitations visitées au cours de la période d'étude retenue. Les exploitations ne comportant pas d'animaux au cours des visites ont été exclues du calcul des moyennes. La taille moyenne des troupeaux des non gestionnaires est respectivement de 3.3 ± 0.1 têtes pour les bovins, de 4.0 ± 0.1 têtes de caprins et de 2.8 ± 0.1 têtes d'ovins (Table 4-5). La variabilité entre la taille moyenne des troupeaux des trois terroirs est significative au seuil de 5% ($p_{bovin} = 0.017$, $p_{caprin} = 0.0001$, $p_{ovin} = 0.0001$). Ces différences sont liées surtout à la présence de troupeaux bovins de grande taille à Tchigo Tegui et aux petites tailles des troupeaux de petits ruminants de Banizoumbou. A Tchigo Tegui, 23% des exploitations ont plus de 5 têtes de bovins. Cette proportion ne dépasse guère 6% et 9% à Banizoumbou et Kodey.

Table 4-5 : Taille moyenne des troupeaux villageois

TERROIR	Bovins		Caprins		Ovins	
	N	Moyenne	N	Moyenne	N	Moyenne
Banizoumbou	62	3.0 ± 0.1	109	3.5 ± 0.1	115	2.2 ± 0.1
Kodey	22	3.1 ± 0.1	40	4.3 ± 0.1	40	3.4 ± 0.1
Tchigo Tegui	69	3.6 ± 0.2	85	4.2 ± 0.2	83	3.2 ± 0.1
Ensemble	153	3.3 ± 0.1	234	4.0 ± 0.1	238	2.8 ± 0.1

Dans le cas des petits ruminants, les exploitations ayant plus de 5 têtes à Banizoumbou représentent respectivement pour les ovins et caprins, 6% et 16% des exploitations. Dans les autres terroirs, cette proportion est respectivement supérieure à 14% et 28% pour les ovins et les caprins (Annexe 4.2). La base de calcul des effectifs moyens en début et fin de période considérée dans cette étude, pour chaque espèce est constituée des exploitations ayant au moins une tête de l'espèce considérée. Les variations d'effectifs sont plus importantes dans l'espèce bovine et ovine. Les différences de moyennes sont plus significatives dans ces deux espèces (probabilité (p) bovin= 0.001, p ovin =0.03 et p caprin = 0.95). Ces différences sont plus importantes à Tchigo Tegui que dans les deux autres terroirs.

4.3.2 Composition spécifique des troupeaux.

Les éleveurs gestionnaires possèdent généralement les trois espèces dans leur exploitation. Les troupeaux mixtes comportant les trois espèces représentent 54% des exploitations. A Banizoumbou, Kodey et Tchigo Tegui, ils représentent respectivement 63%, 46% et 54% de l'ensemble des troupeaux. Les troupeaux mixtes composés de bovins et de caprins, ou composés de bovins et d'ovins, ou uniquement de bovins représentent environ dans chaque cas cité 15% sauf à Tchigo Tegui. Les troupeaux monospécifiques composés uniquement d'ovins n'existent pas dans les exploitations étudiées (Figure 4-3).

Les non gestionnaires possèdent en majorité les 3 espèces (37%) ou les deux espèces de petits ruminants ensemble (27%). La faiblesse de la taille des exploitations dans certaines catégories ne permet pas une comparaison adéquate des terroirs. L'absence de troupeaux monospécifiques bovins à Banizoumbou et Kodey ressort comme une des différences les plus marquées. (Figure 4-4).

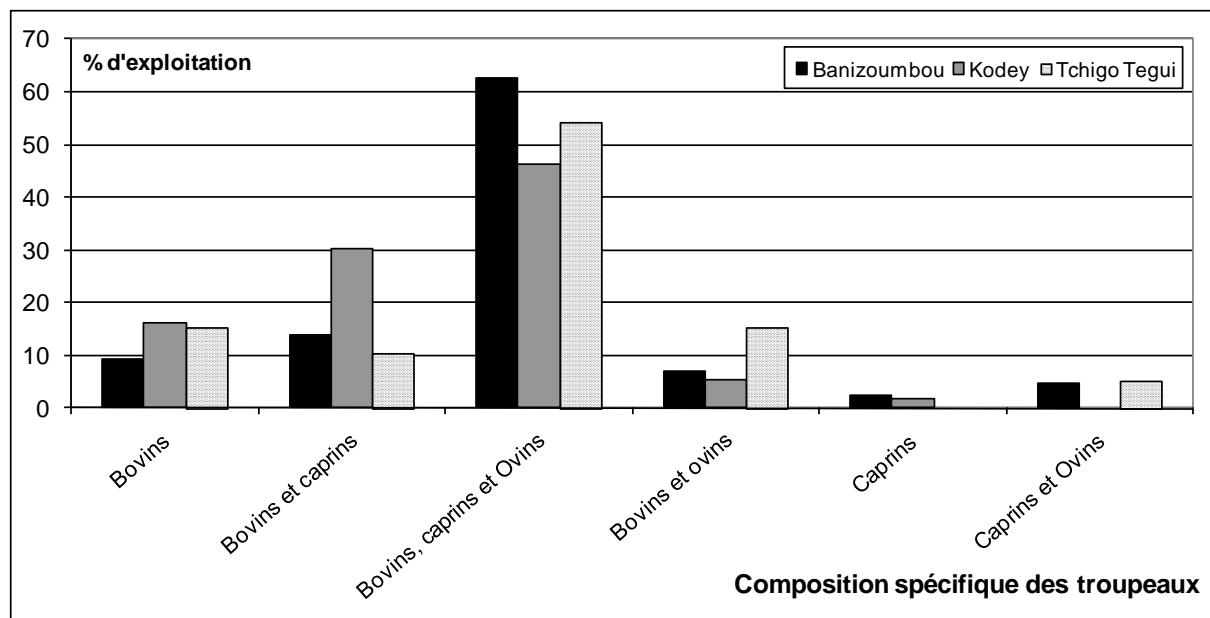


Figure 4-3 : Composition spécifique¹⁹ des troupeaux des exploitations gestionnaires

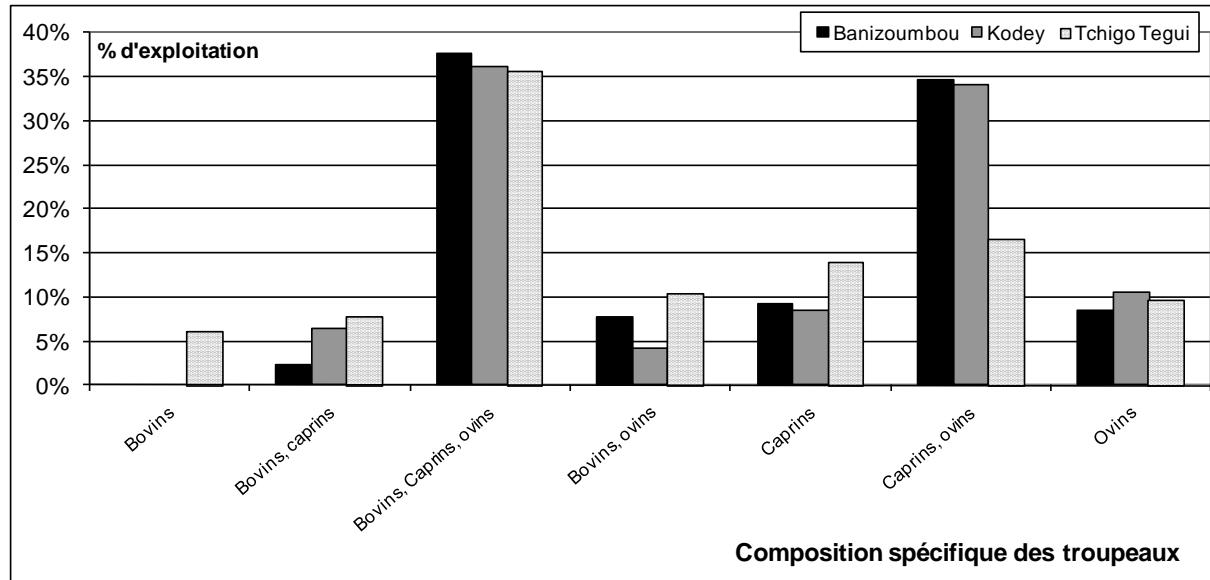


Figure 4-4 : Composition spécifique des troupeaux des exploitations non gestionnaires

4.3.3 Structure des troupeaux

4.3.3.1 La structure des troupeaux des gestionnaires

Les troupeaux bovins, caprins et ovins appartiennent à 151, 121, 105 exploitations en moyenne. Pour les compositions par classe d'âge, le nombre moyen de têtes a été recalculé par classe d'âge. Les troupeaux bovins comptent 26% de mâles et 74% de femelles. Les

¹⁹ La composition spécifique en zootechnie se réfère à une association d'espèces dans un même troupeau

troupeaux ovins et caprins comptent 21% de mâles et 79% de femelles soit 1 mâle pour 3 femelles (Annexe 4.3). Cette répartition par sexe diffère selon les terroirs pour chaque espèce. La proportion de mâles bovins à Banizoumbou, en moyenne de 29%, est supérieure à celle de Kodey et de Tchigo Tegui où les mâles représentent en moyenne 25% ($\chi^2 = 89.8$ et $p < 10^{-4}$ pour $ddl=2$). Le sexe ratio des troupeaux caprins est aussi différent selon les terroirs avec un pourcentage de femelles faible à Banizoumbou ($\chi^2=21.0$ et $p < 10^{-4}$). Le sexe ratio des ovins présente une différence plus nette entre Banizoumbou et les deux autres terroirs avec un pourcentage de mâles plus élevé ($\chi^2=28.0$ et $p < 10^{-4}$).

La composition des troupeaux par classe d'âge des bovins (Figure 4-5) est différente selon les terroirs ($\chi^2 = 37.9$, $p < 10^{-4}$ pour $ddl=10$). Ces différences apparaissent surtout au niveau de l'importance des femelles adultes et des mâles adultes (Annexe 4.4). La proportion de femelles adultes est plus élevée à Kodey (26.6%) et Tchigo Tegui (23.9%) qu'à Banizoumbou (16.5%). En revanche, la proportion de mâles adultes est plus importante à Banizoumbou (6.5%) qu'à Kodey (4.4%) et Tchigo Tegui (3.9%).

La composition des troupeaux caprins (Figure 4-5) diffère selon les terroirs ($\chi^2=71.9$, $p < 10^{-4}$ pour $ddl=10$). Les différences sont plus prononcées entre Banizoumbou et les deux autres terroirs au niveau des femelles adultes qui ne représentent que 19.9%. Cette catégorie représente respectivement 31% et 27% à Kodey et Tchigo Tegui. La proportion de lactantes à Banizoumbou est supérieure à celles des deux autres terroirs. Il en est de même des jeunes non sevrés qui représentent 31.6% à Banizoumbou et 22.5% à Kodey.

La composition des troupeaux ovins et des caprins présente des tendances similaires à celle des troupeaux bovins. Les différences entre Banizoumbou et les autres terroirs sont maintenues tant au niveau des adultes femelles, des lactantes que des jeunes non sevrés ($\chi^2=66.9$; $p < 10^{-4}$, $ddl = 10$). Les histogrammes de composition mettent en évidence le caractère reproducteur des troupeaux avec des proportions de femelles très élevées dans toutes les espèces.

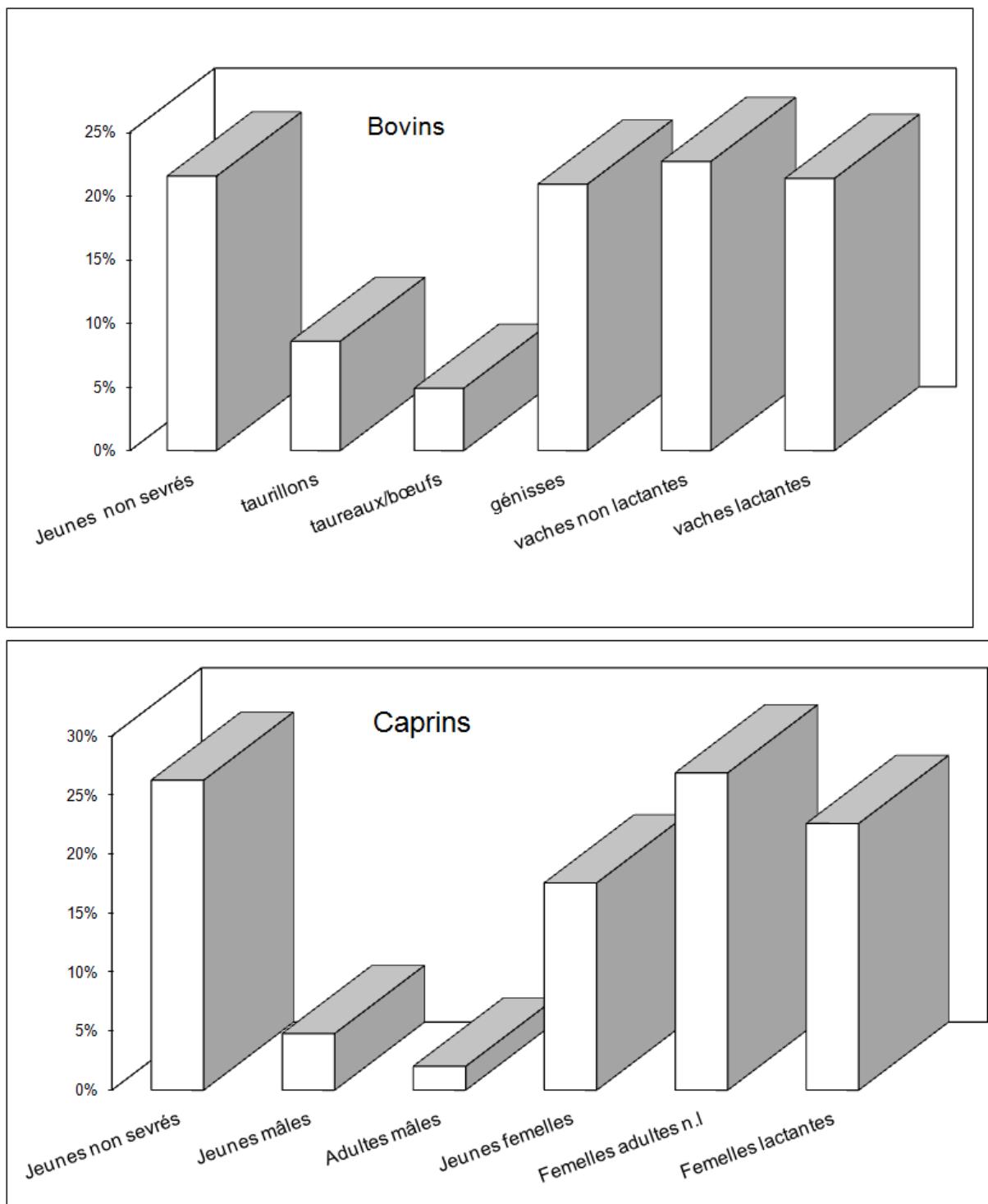


Figure 4-5 : Composition des troupeaux des gestionnaires

4.3.3.2 La structure des troupeaux non gestionnaires

La composition des troupeaux bovins, caprins, ovins des non gestionnaires (Figure 4-6) a été évaluée sur la base de l'ensemble des animaux rencontrés pendant les visites au cours de la période considérée. Les visites où l'éleveur n'a pas d'animaux, n'ont pas été prises en compte dans le calcul des moyennes. Le test d'homogénéité de la distribution par classe d'âge en fonction des terroirs indique des différences significatives de composition selon la zone d'étude (Annexe 4.5). La probabilité d'observer un χ^2 supérieur à la valeur trouvée pour les 3 espèces bovine, caprine, ovine ($\chi^2=229.1$, $\chi^2=282.5$, $\chi^2=320.1$; $ddl = 10$) est inférieure au seuil $\alpha=0.05$. Toutefois, l'association entre les compositions des troupeaux et les terroirs est à considérer avec beaucoup moins de certitude à cause des valeurs de l'indice V de Cramer²⁰ qui sont respectivement de 0.17, 0.13 et 0.16 pour les bovins, caprins et ovins. En effet, le nombre réduit des effectifs par exploitation oblige à un regroupement des effectifs par terroir pour en dériver une composition. Un tel effectif important entraîne un biais dans l'étude de l'association conduite. On peut cependant retenir que les caractéristiques principales des troupeaux des non gestionnaires sont les suivantes :

- ✓ Une forte proportion de mâles dans les troupeaux bovins. Ils représentent 56% des effectifs en moyenne avec une tendance à des proportions plus élevées de l'ordre 62% à Kodey ;
- ✓ Pour les caprins et les ovins, la caractéristique principale reste le faible nombre de mâles (jeunes mâles et adultes mâles) dans les 3 terroirs et des proportions plus élevées en lactantes ;

²⁰ L'estimateur V de Cramer indique la mesure de l'association entre deux variables nominales et est compris entre -1 et 1 pour les tableaux 2x2 et 0 à 1 pour les tableaux à plusieurs modalités et supérieures à 2.

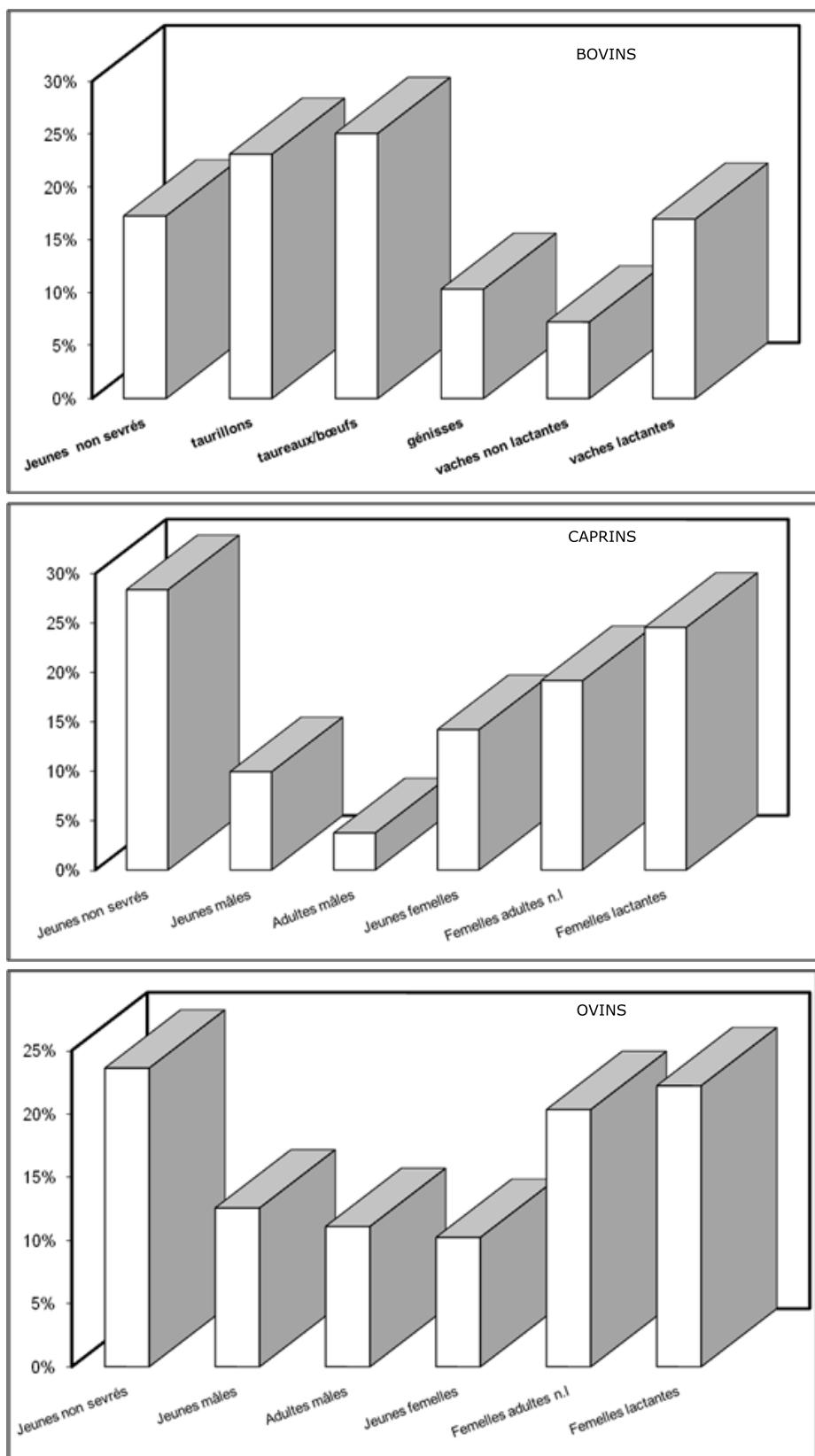


Figure 4-6 : Composition des troupeaux des non gestionnaires

4.3.4 La répartition des animaux selon le type de propriété

4.3.4.1 Les troupeaux gestionnaires

Dans les troupeaux des gestionnaires, l'éleveur est propriétaire de 58% des bovins, 88% des caprins et 80% des ovins (Annexe 4.6). La répartition des animaux par mode de propriété diffère entre les terroirs et pour les trois espèces ($p < 0.05$). Dans les troupeaux bovins, le gestionnaire possède 70% des effectifs à Tchigo Tegui et un peu plus de 50% à Banizoumbou et Kodey. Les modes de confiage identifiés diffèrent dans les trois terroirs et selon les saisons. Les gestionnaires de Banizoumbou pratiquent essentiellement le confiage rémunéré en argent à durée déterminée au cours de toutes les saisons avec un pourcentage élevé en début de saison sèche (Annexe 4.7). Les troupeaux conduits par les éleveurs gestionnaires de Banizoumbou au cours de cette période sont composés à part égale d'animaux confiés et d'animaux propres aux gestionnaires, de l'ordre de 42%. Le confiage rémunéré en nature existe aussi au cours de toutes les saisons avec une proportion moyenne de 15% dans les troupeaux. Le confiage Habanaï ne dépasse guère 3% dans les troupeaux.

De très fortes proportions de troupeaux confiés par le mode de rémunération en nature existent à Kodey pendant l'hivernage. Au cours de cette période, la moitié des troupeaux conduits sont dans ce statut. Dans ce terroir, ce type de confiage est permanent durant toute l'année à l'exception des périodes de pâture des résidus en début de saison sèche (Annexe 4.6). Le confiage rémunéré en argent et le Habanaï ne dépassent guère 1% et 2%.

A Tchigo Tegui, la propriété personnelle des gestionnaires domine au cours de toutes les saisons. Les animaux confiés en mode de rémunération en nature sont à peu près constants toute l'année avec une proportion de l'ordre de 15%, similaire à Banizoumbou (Annexe 4-6). La rémunération salariale est plus pratiquée en hivernage et surtout en seconde période. Le confiage des petits ruminants est une pratique peu courante comparée à celui des bovins. Les animaux propres aux gestionnaires représentent respectivement 83% des effectifs caprins et 76% des effectifs ovins. Dans les troupeaux de petits ruminants, la pratique du salariat rémunéré à période déterminée est plus fréquente. Elle représente 21% des effectifs caprins et 24% des effectifs ovins à Banizoumbou. Les autres modes de confiage existent mais ne

dépassent guère 5% à 8% du troupeau sauf à Kodey où les animaux confiés avec le mode rémunéré à période indéterminée représentent 11%.

4.3.4.2 Les troupeaux non gestionnaires

La propriété personnelle des non gestionnaires dans leurs troupeaux représente 95% des troupeaux bovins et ovins, et 97% des troupeaux caprins. Les bovins confiés en salariat et en mode Taalfi à Tchigo Tegui représentent 17% des effectifs. A Kodey, 8% des bovins sont aussi en mode Taalfi. Au cours d'une période de 12 mois, les animaux confiés (tout mode de confiage) représentent environ 11% des troupeaux bovins, 1% des troupeaux caprins et 7% des troupeaux ovins. Les troupeaux bovins des non gestionnaires de Kodey ont des taux de confiage plus élevés que les deux autres zones. Les animaux confiés dans ce terroir représentent 25% du total des troupeaux.

4.3.5 Indicateurs zootechniques des troupeaux

4.3.5.1 Les ventes

L'exploitation comprend essentiellement les ventes, l'autoconsommation et les dons. Dans les trois terroirs, la forme d'exploitation la plus fréquente est la vente. Les ventes annuelles ont été respectivement de 2%, 5% et 10% des effectifs des troupeaux bovins, ovins et caprins. Le nombre total d'animaux vendus relevés au cours des 12 mois était de 61 bovins, 365 caprins et 97 ovins. Les catégories d'animaux les plus vendues diffèrent selon les espèces. Les jeunes mâles bovins et ovins sont les plus vendus et leur poids dans les ventes totales est de 46% et de 42%. A l'exception des caprins, les mâles, jeunes comme adultes, sont les plus vendus. Ils représentent respectivement 62%, 68% des ventes de bovins et d'ovins. Les ventes de caprins portent sur toutes les catégories à l'exception des femelles lactantes. Ces dernières sont les moins concernées par les ventes dans les trois espèces (Annexe 4.7). Le rythme des ventes diffère selon les saisons. Les ventes sont plus importantes en dernière période de saison sèche pour toutes les espèces. En début de saison humide, il n'y a pas de vente de bovins (Annexe 4.8). Les ventes enregistrées dans les troupeaux non gestionnaires ont été de 6%, 16% et 22% respectivement pour les bovins, les caprins et les ovins. Ces proportions sont supérieures à celles observées dans les troupeaux des gestionnaires.

4.3.5.2 Les achats d'animaux

Les achats d'animaux, toute classe d'âge confondue, sur 12 mois représentent 1% du total des bovins, 2% des ovins et 1% des caprins (Annexe 4.9). Les catégories fortement représentées dans les bovins achetés sont les génisses, les taurillons et les taureaux. Les jeunes mâles représentent la catégorie la plus importante des ovins. Les jeunes femelles représentent la catégorie la plus importante des caprins (Figure 4-7). Les périodes d'achat de prédilection des bovins se situent surtout en fin de saison des pluies. Les achats de petits ruminants et en l'occurrence les ovins se situent en fin de saison sèche (Figure 4-8).

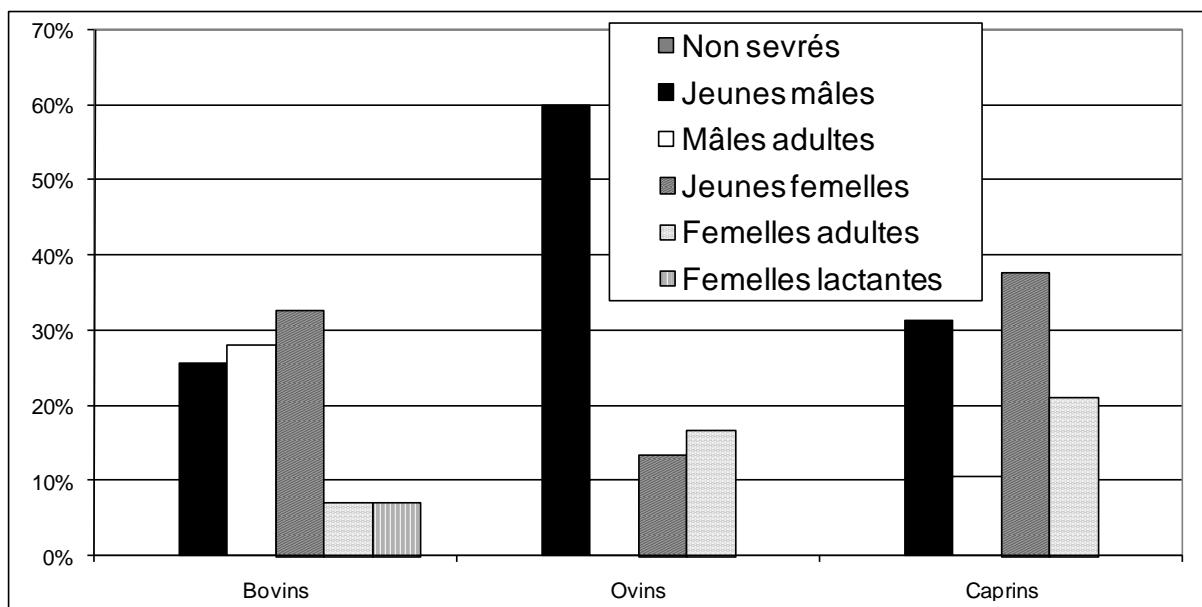


Figure 4-7 : Catégories d'animaux achetés dans les troupeaux bovins, ovins et caprins

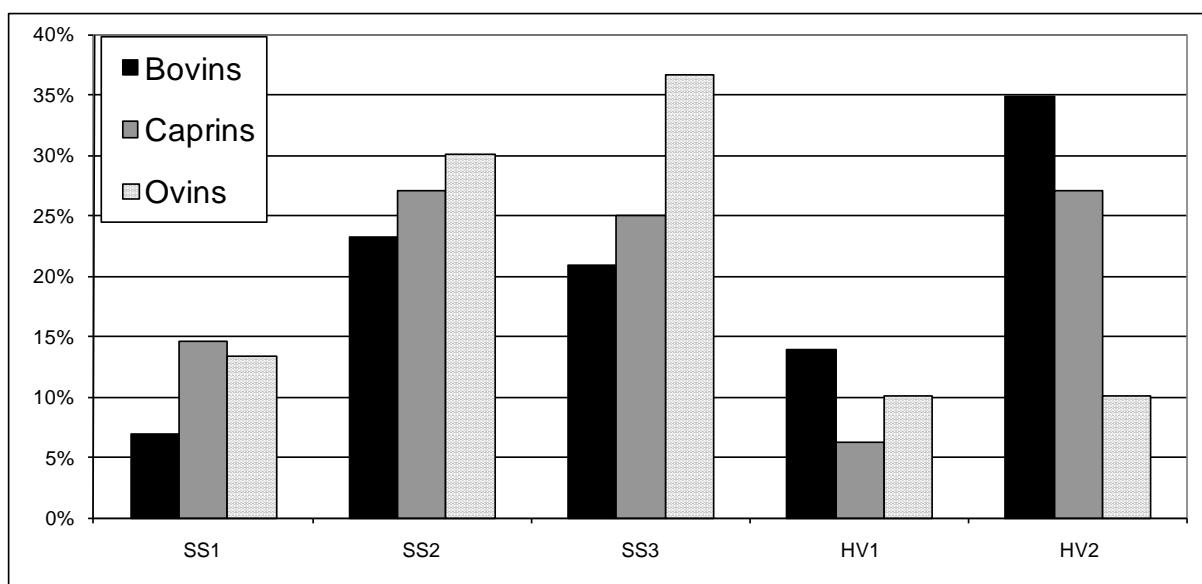


Figure 4-8 : Répartition saisonnière des achats

Les achats d'animaux dans les troupeaux non gestionnaires représentent respectivement 9%, 14%, 16% pour les bovins, caprins et les ovins. Ces taux sont supérieurs aux taux constatés chez les gestionnaires. Les achats sont plus importants au niveau de toutes les espèces à Kodey par rapport aux deux autres terroirs. Le terroir de Tchigo Tegui a des taux relativement bas par rapport aux deux autres zones.

4.3.5.3 Les mortalités

Les quotients de mortalité, toutes catégories confondues sont de 0.5% pour l'espèce bovine, 4.5% pour l'espèce ovine et 4.7% des caprins (Table 4-6). Les quotients enregistrés à Banizoumbou sont supérieurs à ceux des deux autres terroirs pour les trois espèces avec des écarts plus importants au niveau des petits ruminants. Les mortalités bovines concernent surtout les jeunes non sevrés et les jeunes mâles. Les mortalités de petits ruminants touchent toutes les catégories avec des quotients atteignant 17% pour les jeunes mâles caprins et 15% pour les jeunes femelles caprines à Banizoumbou. Des quotients très élevés ont été relevés chez les femelles lactantes caprines et ovines, respectivement 5% et 7% sur l'ensemble des troupeaux avec des maxima de 16% enregistrés à Banizoumbou. Les mortalités bovines et ovines surviennent surtout en fin de saison sèche et en début d'hivernage. Les mortalités caprines sont fréquentes en milieu de saison sèche, en fin de saison sèche et en début de saison des pluies (Figure 4-9).

Table 4-6 : Quotient de mortalité par classe d'âge, par espèce et par terroir

Espèce	Terroirs	Non sevrés	Jeunes mâles	Mâles adultes	Jeunes femelles	Femelles adultes	Femelles lactantes
Bovins	Banizoumbou	2%	0%	0%	0%	1%	1%
	Kodey	0%	3%	0%	1%	0%	0%
	Tchigo Tegui	1%	2%	0%	0%	0%	0%
Ovins	Banizoumbou	8%	12%	0%	8%	4%	6%
	Kodey	3%	0%	12%	1%	4%	3%
	Tchigo Tegui	6%	4%	12%	2%	1%	6%
Caprins	Banizoumbou	8%	17%	6%	15%	8%	16%
	Kodey	0%	0%	6%	1%	0%	2%
	Tchigo Tegui	3%	12%	0%	0%	1%	0%
Ensemble Terroirs							
Bovins		1%	2%	0%	0%	0%	0%
Ovins		6%	4%	8%	3%	3%	5%
Caprins		4%	10%	5%	5%	2%	7%

Les quotients de mortalité sont plus élevés dans les troupeaux non gestionnaires et sont respectivement de 2%, 13% et 15% pour les bovins, caprins et ovins. Des taux supérieurs à la moyenne des trois zones ont été relevés dans les troupeaux de Banizoumbou au niveau des bovins et des caprins (5% et 26%) et à Kodey au niveau des caprins et des ovins (14% et 25%).

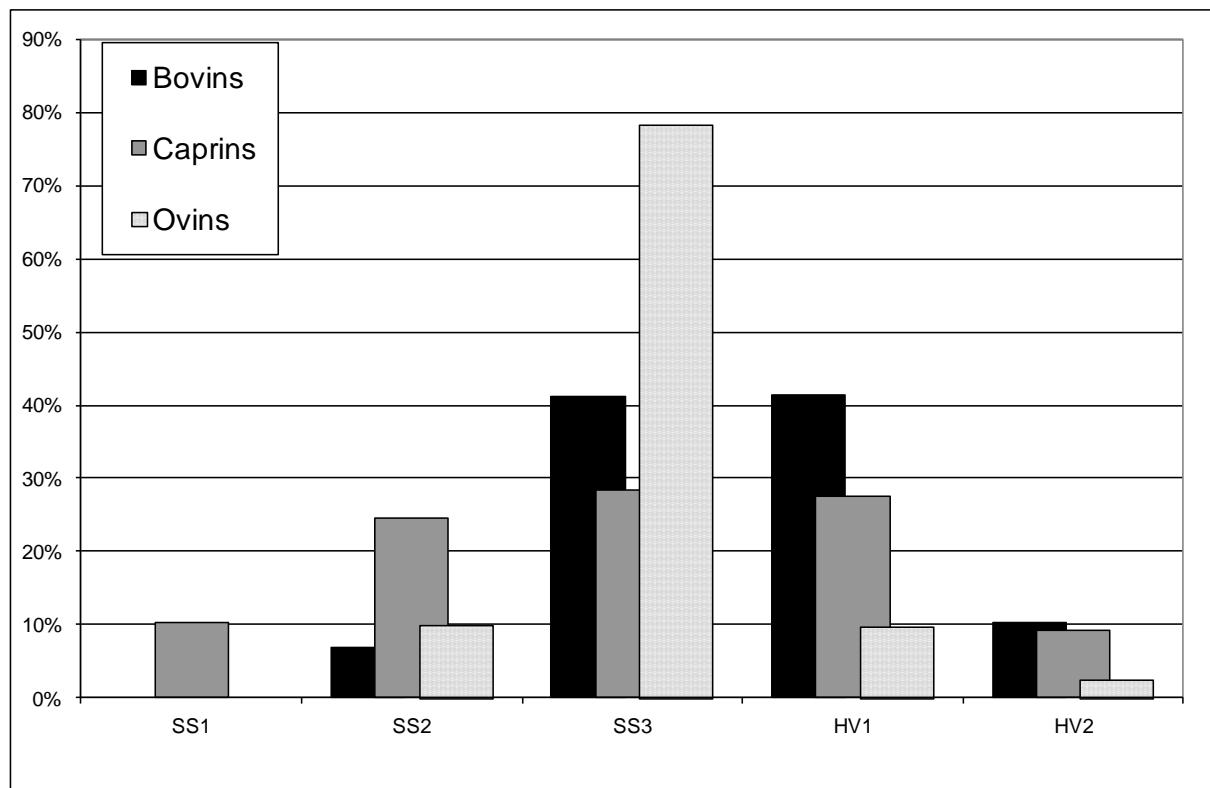


Figure 4-9 : Evolution saisonnière des quotients de mortalité

4.3.5.4 Les naissances

Les naissances totales au cours de l'année comptabilisées dans les troupeaux des gestionnaires ont été rapportées au nombre moyen de femelles (Annexe 4.10) et au nombre moyen de femelles lactantes (Annexe 4.11). Le nombre de naissances rapporté au nombre de femelles est de $33\% \pm 2\%$ pour les bovins, $66\% \pm 10\%$ pour les caprins et $78\% \pm 13\%$ pour les ovins. Les différences entre terroirs sont significatives ($F=3.8$ et $p=0.02$ pour $ddl = 2$). Les troupeaux bovins de Kodey enregistrent les taux les plus faibles des trois terroirs. Les taux de fécondité des petits ruminants dans les trois terroirs ne diffèrent pas au seuil de 5% ($F=1.4$, $p=0.25$, $ddl = 2$ pour les caprins et $F= 0.8$, $p=0.44$, $ddl = 2$ pour les ovins). Le nombre de naissances

rapporté au nombre de lactantes est respectivement de $63\% \pm 4\%$, $111\% \pm 11\%$, $127\% \pm 14\%$. Le taux rapporté à l'ensemble des femelles qui appartiennent aux gestionnaires et des femelles confiées selon le type Habanaï donne des taux respectifs de 62%, 63% et 73% pour les bovins, ovins et caprins. Les naissances bovines sont réparties sur toute l'année avec une fréquence de 35% en début de saison des pluies, et de 23% en fin de saison sèche. Les fréquences les plus faibles ont été observées dans les deux premières parties de la saison sèche avec respectivement 6% et 16% des naissances (Figure 4-10). Les naissances des petits ruminants ont surtout lieu en saison sèche. Seuls 20% des naissances sont enregistrés en saison hivernale. Des différences existent entre les trois terroirs. A Banizoumbou, il n'y pas de naissance en début de saison sèche. En revanche, les naissances en seconde partie de saison des pluies sont plus fréquentes que dans les deux autres terroirs.

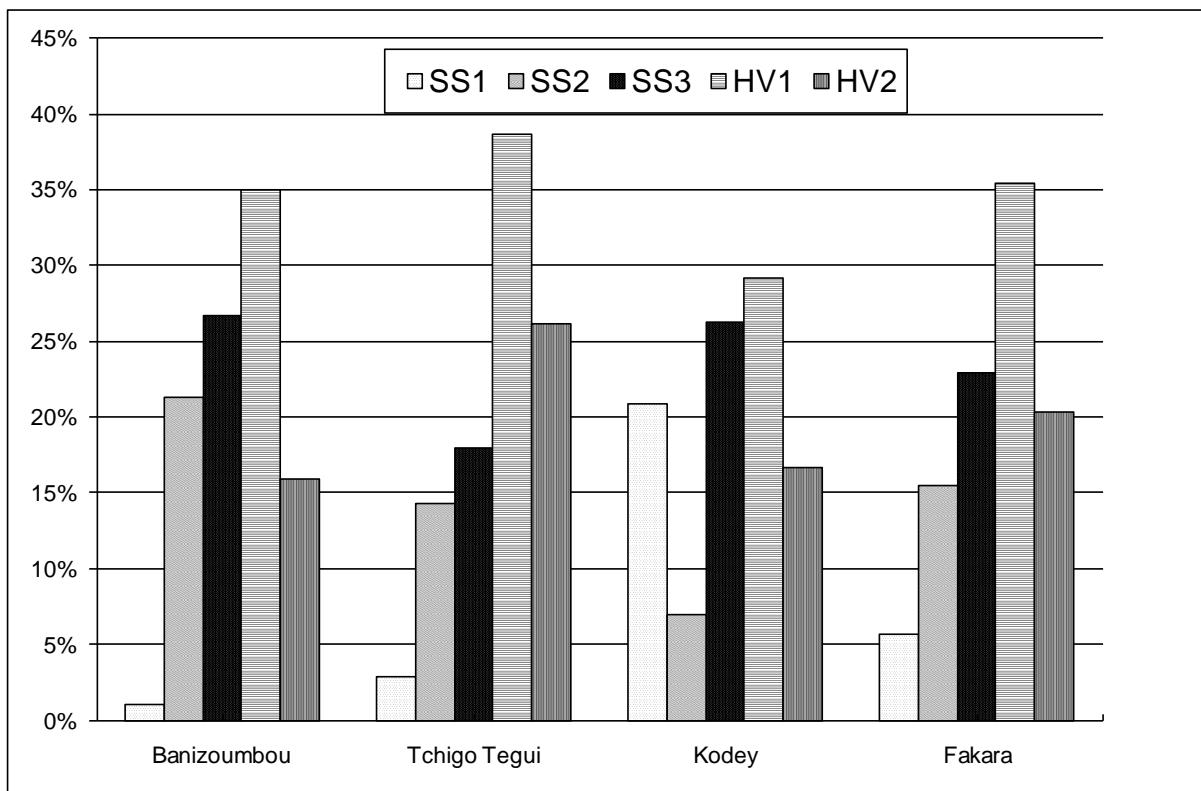


Figure 4-10 : Répartition saisonnière des naissances dans les troupeaux bovins

Dans les troupeaux de non gestionnaires, le rapport des naissances au cours de l'année par rapport à l'effectif moyen est respectivement de 6%, 16%, 22% pour les bovins, caprins et ovins. Les taux relevés à Kodey sont plus élevés que dans les deux autres zones.

4.3.6 Etude des durées de transhumance

La transhumance est pratiquée par 43% des gestionnaires. Cette proportion varie selon le terroir. Elle est de 35%, 55% et 38% respectivement à Banizoumbou, Kodey, et Tchigo Tegui. Les fréquences des départs en transhumance, tous types confondus, au cours d'une année varient de un à six, avec une forte proportion de départ unique (65.4%). Les gestionnaires qui effectuent plus d'un départ en transhumance représentent 14% pour 2 départs, 8% pour 3 départs et environ 4% pour plus de 3 départs. La période de pointe des transhumances se situe entre novembre et janvier où l'on enregistre 55% des départs (Figure 4-11). Au cours de la saison des pluies, les départs enregistrés se situent surtout en milieu de saison au mois d'août. Des départs en transhumance sont enregistrés aussi tardivement à la fin de la saison sèche. Dans certains terroirs, la transhumance en fin de saison sèche ou en saison des pluies représente le premier ou le second départ. L'organisation de la transhumance suit un calendrier différent selon les terroirs. Pour les départs, les éleveurs de Kodey et de Tchigo Tegui ont des chronogrammes similaires. Les transhumances débutent dès la fin de la pâture des résidus de récolte en première période de saison sèche. Plus de 70% des départs sont enregistrés entre la première et la seconde période de saison sèche à Kodey et Tchigo Tegui et 64% à Banizoumbou. Les durées des transhumances (Annexe 4.12) ont été évaluées sur la base des absences relevées lors du passage de l'enquêteur et des informations fournies par l'éleveur ou un membre de sa famille. Les durées moyennes ont été de 113 ± 1 jours soit 3 mois et 3 semaines. Les durées moyennes, toutes espèces confondues, diffèrent entre terroirs ($F=15.9$, $ddl = 2$; $p < 10^{-4}$). Les terroirs de Kodey et Tchigo Tegui ont des durées moyennes respectives de 132 ± 3 jours et 117 ± 2 jours, supérieures aux durées enregistrées à Banizoumbou qui sont de 91 ± 1 jours. L'analyse de la fréquence des départs en transhumance des gestionnaires possédant des bovins en fonction de la taille des troupeaux montre que les grands troupeaux ont une fréquence plus élevée notamment à Kodey. La comparaison du nombre moyen d'UBT des troupeaux selon les fréquences de départ en transhumance (1 fois, 2 fois, 3 fois, etc..) aboutit à une différence significative ($p=0.002$, $F=4.91$ et $ddl=4$). Les différences hautement significatives sont observées entre les troupeaux ayant 1 à 2 départs et celles ayant des fréquences élevées de l'ordre de 6 départs. La transhumance n'existe pas chez les non gestionnaires. Cependant, leurs animaux confiés aux gestionnaires effectuent la transhumance avec leur troupeau d'accueil.

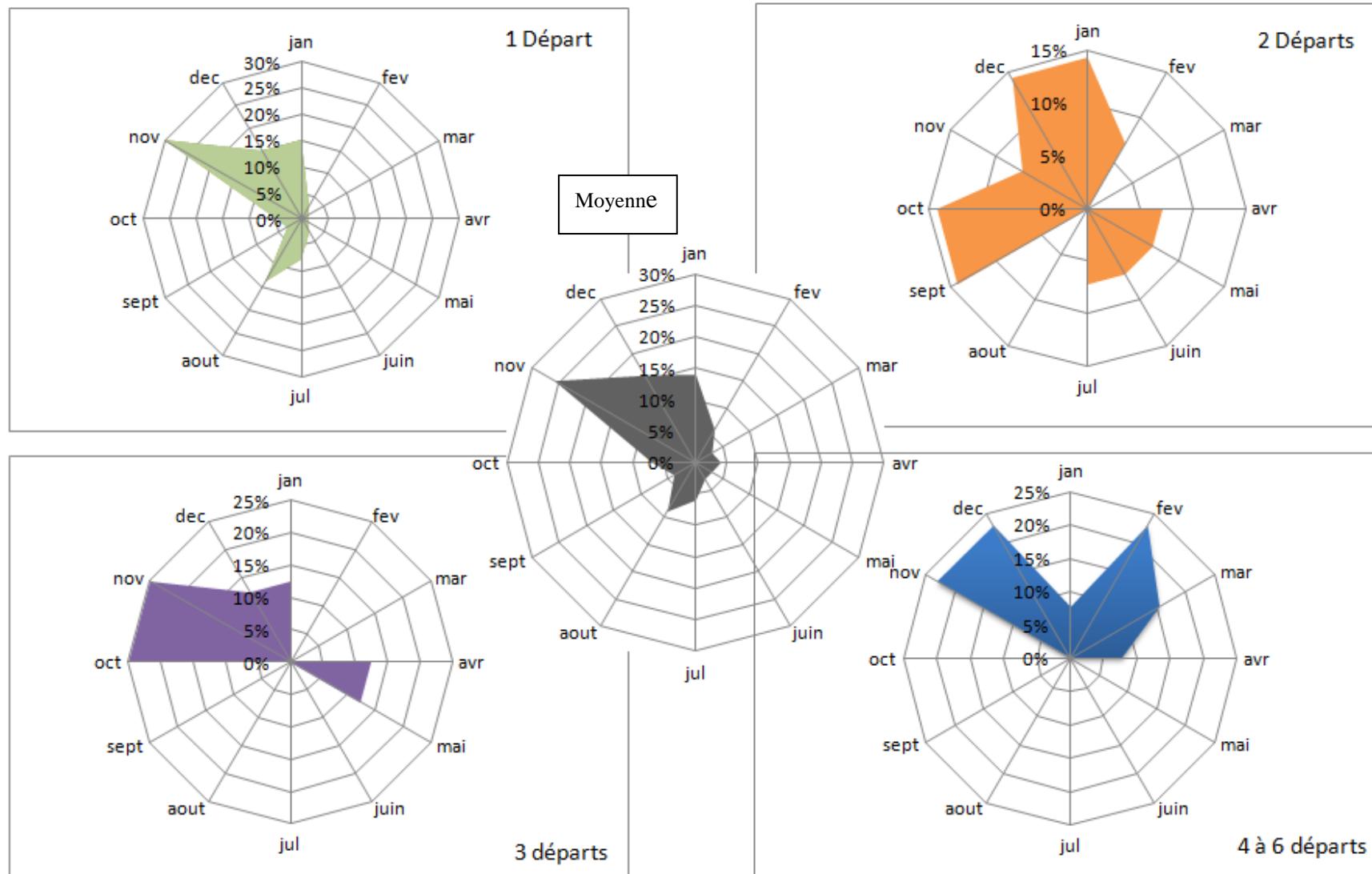


Figure 4-11 : Evolution mensuelle des départs en transhumance et par nombre de départ (la figure centrale représente l'évolution pour l'ensemble des départs)

4.3.7 La répartition saisonnière des effectifs du cheptel

Le nombre d'UBT total moyen par terroir est respectivement de 439.8 ± 33.7 , 474.9 ± 96.2 et 519.0 ± 63.0 pour Banizoumbou, Kodey et Tchigo Tegui. Les variabilités saisonnières observées restent élevées à Kodey et Tchigo Tegui (Figure 4-12). L'hypothèse d'égalité des effectifs présents dans les trois terroirs ne peut pas être rejetée au seuil $\alpha=0.05$ ($p=0.73$). La moyenne marginale par terroir et par saison est de l'ordre de 477.9 ± 154.6 avec une très forte hétérogénéité intra-saison de l'ordre de 32.4%. Les écarts entre les saisons observées à Kodey et Tchigo Tegui sont les plus élevés avec des niveaux deux à quatre fois supérieurs selon les saisons considérées dans la comparaison.

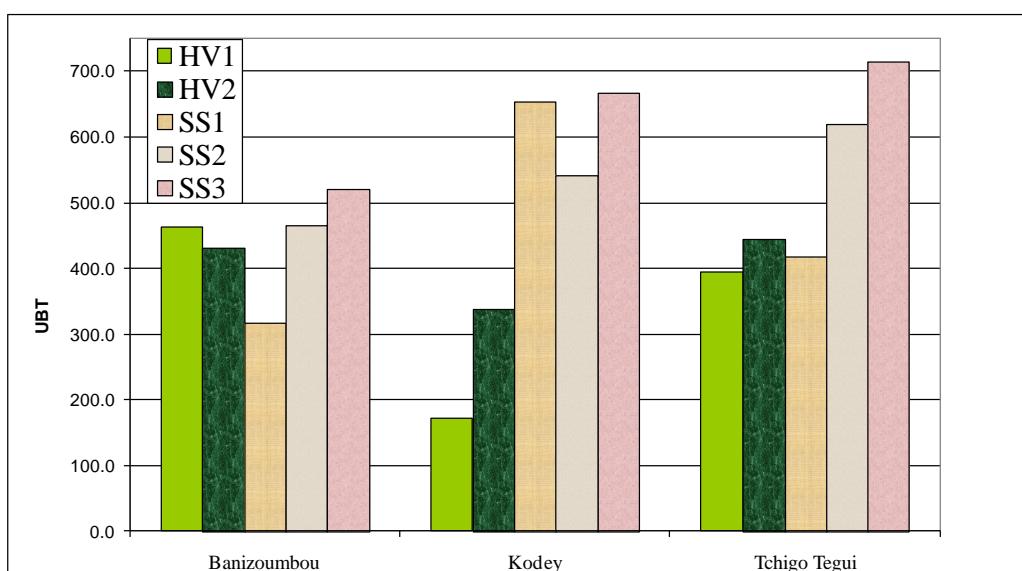


Figure 4-12 : Effectif total saisonnier par terroir - gestionnaire

Des variations significatives du nombre d'UBT par troupeau (Annexe 4.13) ont été surtout observées à Kodey et Tchigo Tegui. Cette variation saisonnière est plus importante à Kodey que dans les autres terroirs et passe de 5.7 ± 1.0 UBT en première période de saison des pluies (HV1) à 13.6 ± 1.1 en troisième période de saison sèche (SS3). On note également une plus grande variabilité entre les troupeaux des trois terroirs au cours des deux périodes de l'hivernage. Cette variabilité disparaît au cours des deux dernières périodes de saison sèche. Le comportement des éleveurs diffère entre terroirs et entre les saisons. Le test de l'analyse de l'interaction entre terroir et saison est significatif ($F=2.21$, $p=0.0254$, $ddl=8$). La comparaison multiple des moyennes met surtout en évidence les amplitudes élevées à Kodey entre les effectifs moyens de la première période de l'hivernage et celle de la dernière période de la

saison sèche. Les amplitudes élevées entre les effectifs moyens en période 2 d'hivernage et la dernière période de saison sèche sont aussi significatives.

Le nombre d'UBT moyen annuel des non gestionnaires des trois terroirs est respectivement de 70.8 ± 1.5 , 41.5 ± 0.2 , 107.0 ± 2.6 pour Banizoumbou, Kodey et Tchigo Tegui (Figure 4-13). Les variabilités saisonnières sont plus marquées à Banizoumbou et Tchigo Tegui qu'à Kodey avec des tendances différentes. A Tchigo Tegui, le nombre d'UBT par saison diminue progressivement de la saison humide à la saison sèche, tandis qu'à Banizoumbou, il augmente de la saison humide à la saison sèche.

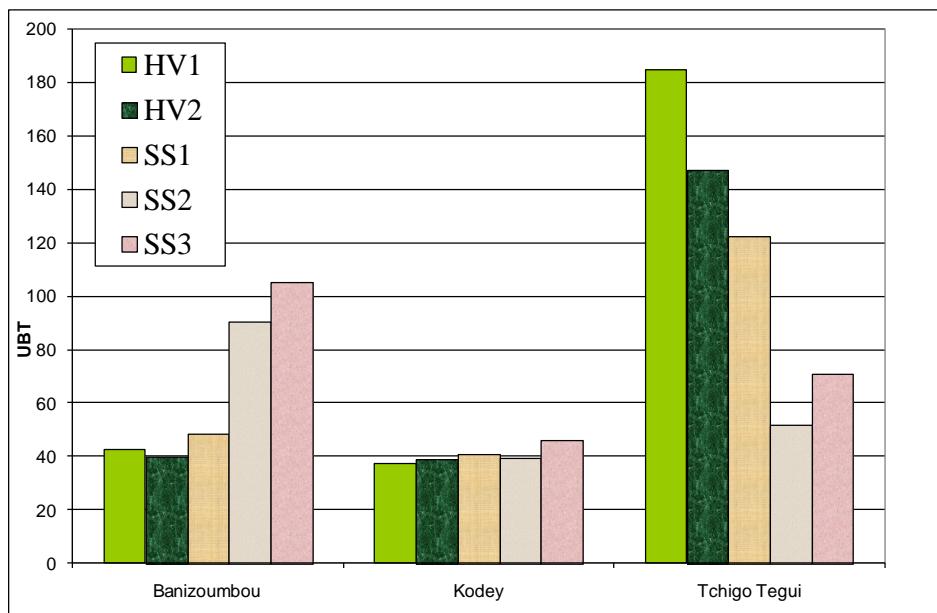


Figure 4-13 : Effectif total saisonnier par terroir – non gestionnaire

Le nombre d'UBT total de la zone d'étude est de l'ordre de 1707.7 ± 112.6 . Sur l'ensemble de la zone d'étude, le nombre d'UBT moyen de l'année est supérieur à Tchigo Tegui par rapport aux deux autres terroirs avec plus de 100 UBT de plus que les deux autres sites. Les variations saisonnières y sont moins élevées également. L'écart relatif de l'amplitude inter-saisonnier par rapport à la moyenne annuelle des charges est de l'ordre de 38%. Dans l'ensemble de la zone d'étude, il est de 50% en moyenne. L'amplitude la plus élevée est celle de Kodey qui atteint 94%. Les effectifs minimaux de Tchigo Tegui et de Banizoumbou ne se situent pas à la même période qu'à Kodey (Annexe 4.14). En revanche, les charges maximales se situent toutes en fin de saison sèche.

4.3.8 Les différents modes de conduite des troupeaux au pâturage

Suivant la typologie des gardiennages retenus par l'équipe de l'ILRI dans leur enquête (Turner, 1995b; Turner, 1999a) pour caractériser les activités d'élevage dans le Fakara, le gardiennage est le mode le plus pratiqué dans l'ensemble des terroirs pour les troupeaux bovins. Il représente 82% des formes de gardiennages rencontrés sur l'ensemble de la période d'étude. Cette pratique baisse en intensité dans les deux dernières parties de saison sèche où il ne représente que 69% en SS2 et 67% en SS3. Au cours de ces deux dernières périodes, le pâturage semi-surveillé (NS) représente 21% et 20%. Le pâturage libre (PL) représente aussi 12% en SS3 et 9% en SS2. Les gestionnaires pratiquent très peu l'embouche bovine. Les modes de conduite enregistrés dans les troupeaux caprins laissent apparaître une prédominance du gardiennage en hivernage et en première partie de saison sèche (Table 4-7).

Table 4-7 : Importance des différents types de conduite – gestionnaire

	Gardiennage	semi-surveillé	libre	Piquet	Embouche
Bovins					
HV1	84%	8%	7%	1%	0%
HV2	99%	0%	0%	1%	0%
SS1	93%	1%	4%	1%	1%
SS2	69%	9%	21%	0%	1%
SS3	67%	12%	20%	0%	1%
Ensemble	82%	6%	10%	1%	1%
Caprins					
HV1	50%	29%	9%	8%	3%
HV2	79%	1%	0%	10%	9%
SS1	62%	14%	17%	1%	7%
SS2	2%	71%	22%	0%	4%
SS3	1%	84%	14%	0%	1%
Ensemble	36%	43%	13%	4%	5%
Ovins					
HV1	62%	13%	6%	6%	14%
HV2	70%	1%	0%	7%	22%
SS1	65%	7%	9%	1%	18%
SS2	46%	18%	18%	0%	18%
SS3	44%	29%	12%	0%	15%
Ensemble	57%	15%	9%	3%	17%

Cette forme de gardiennage représente en moyenne 50% en première période de saison des pluies et 79% en seconde période. Elle est presque inexistante dans les deux dernières parties de la saison sèche où elle dépasse à peine 2%. En revanche, au cours de cette période, le pâturage libre est prédominant et représente entre 71% et 84%. Contrairement aux bovins, l'embouche caprine est présente dans cette région et représente 9% en seconde période de saison des pluies et 7% en première période de saison sèche. Elle est présente aussi au cours des autres saisons mais dans une moindre proportion. En saison des pluies, les caprins sont attachés au piquet. Cette contention représente 8% à 10% des cas.

Dans les troupeaux ovins, une des caractéristiques est la forte proportion de l'embouche sur l'ensemble des saisons. Cette pratique est présente dans 17% des cas et prédomine surtout dans la deuxième partie de la saison hivernale. En saison sèche, le pâturage semi-libre ou libre est prédominant. Les comportements dans les terroirs diffèrent surtout en saison sèche. Au cours de cette période, les animaux de Kodey restent toujours sous le gardiennage en grande proportion, tandis que ceux des deux autres terroirs pratiquent également la pâture libre et le gardiennage. Les non gestionnaires pratiquent surtout la pâture libre en saison sèche. En saison des pluies, les animaux sont surtout attachés au piquet et beaucoup plus en seconde partie qu'en première partie. La pratique de l'embouche est présente au niveau de toutes les espèces. Elle se pratique toute l'année sur les petits ruminants. L'embouche bovine est surtout pratiquée en saison sèche.

4.4 Discussion

L'objectif de cette analyse d'un cycle annuel d'informations sur la gestion des troupeaux a été de quantifier la dynamique du cheptel au cours des cinq saisons retenues et par terroir. Cette quantification est utilisée pour la modélisation spatiale des flux et bilans organiques et minéraux à l'échelle de l'exploitation agricole et du terroir. Les méthodes de dénombrement, le comptage direct des animaux et l'évaluation par différence agrégée sur une période de temps supérieure à une année, ainsi que la fréquence des relevés permettent de prendre en compte les variations d'effectifs liées aux méthodes de gestion du bétail de ces zones. L'existence de variations saisonnières a été souvent la base des assertions sur la non fiabilité des effectifs du cheptel dans les pays du Sahel (Wint W. et Bourn, 1994; Wane, 2006b). Les difficultés inhérentes à la collecte des données sur les effectifs du cheptel dans les systèmes agropastoraux sont essentiellement liées à la complexité de la propriété du bétail (Colin De verdière, 1995), au mode de gestion au pâturage (Vanderlinden, 2002) et aux mouvements saisonniers des troupeaux (Burnsilver, Boone *et al.*, 2004). Ces éléments, souvent ignorés dans les enquêtes ont été largement pris en compte dans cette enquête (Hiernaux et Ayantude, 2004). L'analyse saisonnière des données sur une année a également permis d'établir des compositions moyennes de troupeaux. Cette approche ne comporte pas de biais liés aux fluctuations saisonnières de la composition des troupeaux observée (Faugère, Dockes *et al.*, 1990) car l'enquête couvre plusieurs saisons. Néanmoins, l'absence d'identification individuelle des animaux²¹, préconisée dans le suivi individuel des animaux et qui permet la reconstitution de la carrière des femelles (Meyer, 1989; Planchenault, 1992) est une limite à l'évaluation de certains paramètres de reproduction. Toutefois, les quotients de mortalité et d'exploitation ont été calculés à partir des déclarations de mortalité et de vente lors du suivi. Suite aux dénombrements effectués uniquement quand les troupeaux rentrent au campement ou au village, on pourrait penser que des animaux restés au pâturage ne soient pas pris en compte. Ce type de biais est faible étant donné la fréquence des relevés, la méthode de comptage par différence et la gestion des animaux au parcours (Hiernaux, Turner *et al.*, 2004). En effet, les enquêteurs de l'ILRI au cours de ces opérations ont logé dans les villages

²¹ L'identification des animaux a été souvent réalisée dans le cadre de suivi des troupeaux que nous avons eu à conduire au Burkina Faso (Meyer, 1989). L'identification par des boucles est rejetée par les éleveurs car après les opérations, cette identification devient inutile dans un contexte où les éleveurs connaissent bien individuellement leurs animaux.

et dans les campements visités. Il leur était donc plus facile de choisir un horaire qui leur permettait de rencontrer l'éleveur avec ou sans son troupeau (Turner, 1995b).

Les tailles moyennes des troupeaux dans cette région d'étude sont inférieures aux tailles des grands troupeaux sahéliens rencontrés en zone d'élevage peul (Breman et de Wit, 1983). La diminution des effectifs du bétail observée chez les éleveurs peuls, grands éleveurs d'antan, est essentiellement liée à une nouvelle redistribution du cheptel au sein de la population (Bassett et Turner, 2007; Turner, 2009). L'élevage constitue un placement sûr pour les agriculteurs et les habitants des zones urbaines disposant de moyens financiers leur permettant d'acquérir du cheptel. On assiste depuis les crises successives liées aux sécheresses et à la précarité des autres activités, à un transfert de propriété du bétail (Bassett et Turner, 2007). En effet, cette baisse d'effectifs des grands éleveurs n'a pas entraîné une chute de la population animale dans les pays sahéliens où la population animale a continué de croître à des rythmes de l'ordre de 3% à 4% (Bahili et Djaby, 1993) après les sécheresses de 1972-73 et de 83-84 (Bernus, 1975 ; Bernus, 1984a). Dans ces zones agropastorales où les cultures sont prédominantes pour la satisfaction des besoins alimentaires, les exploitations pratiquent l'élevage et les cultures. Les agriculteurs Djerma qui vivent dans les villages ont, pour activité principale, les cultures et ils possèdent souvent des animaux. Les agropasteurs peuls cultivent des champs et assurent la gestion du bétail. Ces deux groupes sociaux ont des pratiques différentes de conduite et gardiennage des troupeaux (Hiernaux, Fernandez-Rivera *et al.*, 1998). Les tailles des troupeaux restent inférieures aux tailles relevées dans les pays d'élevage pastoraux sans cultures où les peuls ont en moyenne 40 à 60 têtes (de Grandi, Breman *et al.*, 1996). Cette diminution des effectifs des élevages peuls est souvent interprétée comme une adaptation à l'offre fourragère limitée mais aussi aux contraintes de main d'œuvre pour la conduite des animaux dans les pâturages en zone agro pastorale. Turner et Hiernaux(2008) soulignent que la faiblesse des effectifs bovins dans les troupeaux du Fakara peut aussi être liée aux difficultés de trouver de la main d'œuvre étant donné le vieillissement des bergers. Les tailles des troupeaux sont similaires à celles observées pour les trois espèces par Ayantunde, Williams *et al.*(2000) dans la même zone d'étude, à Kodey, mais aussi à Toukounouss plus au nord. Dans la même zone d'étude, sur un échantillon de 8 villages et sur base de 262 exploitations échantillonnées, Loireau (1998) trouve des tailles de troupeaux de l'ordre de 5 bovins et 6 petits ruminants pour 19 % des exploitations, et 14 bovins et 38 petits ruminants pour 9% des exploitations. Les exploitations ayant les grands troupeaux

appartiennent à l'ethnie peule. Ces valeurs concordent bien avec les résultats des enquêtes menées à Banizoumbou. Au Niger, les études conduites par Colin de Verdière (1995) à Filingué donnent en moyenne 11.1 UBT par exploitation, ce qui correspond aux valeurs obtenues pour les gestionnaires du Fakara. La plupart des travaux conduits dans l'ouest du Niger concordent bien avec les valeurs trouvées chez les gestionnaires du Fakara (Schlecht, Hiernaux *et al.*, 2004 ;Achard et Banoin, 2003b). Dans les zones similaires au Sahel en dehors du Niger où des études de bilan ont été conduites, à l'image des villages sédentaires du Mali à M'peresso (Kante, 2001), les effectifs bovins des exploitations sont du même ordre. En revanche, les effectifs de petits ruminants des éleveurs de notre zone d'étude sont 2 fois supérieurs. Cette tendance est courante en zone sahélienne où les effectifs de petits ruminants vont croissant vers le nord. Ces variations entre les zones soudanaises et sahéliennes sont liées à des contraintes sanitaires, économiques et sociologiques (Turner, 2004 ;Turner et Hiernaux, 2008 ;Turner, 2009) et à aussi à la rusticité de certaines races de petits ruminants (Wane, 2006b). Ces animaux dits à cycle court ont surtout été utilisés pour la reconstitution du cheptel après les sécheresses (Wilson, 1991 ;Marichatou, Mamane *et al.*, 2002). Dans la zone de M'peresso au Mali, Kante (2001) trouve des UBT moyens de l'ordre de 26.0 ± 8.2 supérieurs à ceux observés dans les exploitations gestionnaires du Fakara qui d'après nos observations, ne dépassent guère 13.6 ± 1.1 UBT.

La présence des trois espèces, bovine, ovine et caprine dans les troupeaux au Sahel est une des caractéristiques de l'élevage en zone agropastorale. Cette pratique se justifie par l'économie et l'exploitation judicieuse des ressources. Les caprins et les ovins constituent la partie rapidement mobilisable de l'épargne (Lhoste, 1987; Landais et Lhoste, 1993). Les bovins constituent un fonds de garantie en soi qui permet de faire face aux grosses dépenses (mariage, pèlerinage, etc.). Les caprins prennent progressivement de plus en plus une place prépondérante par rapport aux ovins à cause de leur prolificité (Le Gal et Planchenault, 1993). Basé sur les statistiques nationales à l'échelle du Niger (Wane, 2006a, Marichatou, Mamane *et al.*, 2002; CSAO-OCDE et CEDEAO, 2008), le ratio des petits ruminants sur les bovins augmente d'année en année à l'échelle du pays (William, Powell *et al.*, 1993b). Ces tendances font de l'élevage des petits ruminants, une source importante d'accès à différentes ressources économiques par les familles les moins nanties en milieu rural.

La composition des troupeaux caractérise un système d'élevage et des pratiques de gestion. La structure des troupeaux bovins des gestionnaires, avec une répartition des mâles, femelles dans un rapport de 30% et 70% est très commune aux élevages bovins sahéliens (Otte et Chilonda, 2002). Cette répartition est caractéristique des troupeaux naisseurs et des laitiers. Les mêmes proportions de mâles de l'ordre de 31.8% sont trouvées dans les enquêtes de Meyer (1989) et de Colin de Verdière (1995). Les différences existant entre les terroirs caractérisent bien les objectifs assignés à ce type d'élevage dans ces communautés avec, d'une part, les troupeaux naisseurs des éleveurs peuls qui comportent un taux de femelles élevé et, d'autre part, des troupeaux à vocation d'investissement dans les zones de Banizoumbou où les taux de mâles sont plus élevés. Contrairement aux zones agropastorales du Mali (Kante, 2001), cette orientation des éleveurs n'est pas suivie par une embouche des mâles bovins avant la vente. En revanche, cette tendance existe au niveau des petits ruminants où l'importance de la proportion de mâles est liée à une pratique de l'embouche et une plus grande commercialisation. La composition des troupeaux non gestionnaires est caractéristique des zones où les bovins sont destinés à l'embouche ou utilisés comme animaux de trait (William, Powell *et al.*, 1993a).

Dans les troupeaux de petits ruminants, la proportion élevée de femelles chez les non gestionnaires est indicatrice d'une plus grande exploitation des mâles. La vente partielle des animaux apparaît très faible au regard des taux relevés dans des zones similaires du Sahel (Colin De verdière, 1995). Cette capitalisation du bétail dans les exploitations gestionnaires est très poussée chez les éleveurs peuls, pour qui, avoir la possession de bétail constitue une assurance contre des risques (Toutain, 2001). Elle concerne plus les femelles et pas les mâles dans une logique de production. Les taux de vente relevés chez les non gestionnaires sont plus élevés. Cette situation contredit les relations établies entre les effectifs et les taux d'exploitation. La capitalisation des troupeaux s'explique en partie par la concurrence existante entre les élevages situés autour de la ville de Niamey (Belli, Turini *et al.*, 2008) et dans les villages proches des marchés pour l'approvisionnement de la zone urbaine. Le cheptel est de manière générale très peu exploité car les ventes de petits ruminants s'effectuent au prorata des besoins limités essentiellement à l'alimentation quotidienne de la famille. Les bovins sont vendus pour les dépenses occasionnelles plus importantes telles que les mariages, les funérailles et les départs à la Mecque (Bode, 2004). Les éleveurs non

gestionnaires vendent non seulement plus, mais ils achètent beaucoup plus que les gestionnaires. Leur élevage est à cycle court avec une opportunité de recyclage rapide. Cette tendance à capitaliser est aussi partagée par les éleveurs mais à un degré moindre. Les mortalités relevées dans les troupeaux des gestionnaires sont plus faibles que celles observées dans les troupeaux non gestionnaires. Les éleveurs Djerma n'ont pas une grande maîtrise de la santé animale et les dépenses liées à la prophylaxie sont très faibles (La Rovere, 2001). Les fortes mortalités des bovins non sevrés des non gestionnaires ont été observées aussi par Colin de Verdière (1995). Elles seraient essentiellement liées à la malnutrition avec une fréquence beaucoup plus élevée en saison sèche et au parasitisme en début de saison des pluies. La mortalité de petits ruminants et de bovins adultes en saison sèche est souvent due à l'ingestion de corps étrangers qui constituent dans la plupart des pays un sérieux problème²². La prophylaxie sanitaire est très peu pratiquée par les agro-éleveurs. Marichatou (2002) relève des faibles taux de vaccination et de vermifugation dans un échantillon de troupeaux de petits ruminants étudiés, de l'ordre de 21% et de 13%.

La fréquence élevée des naissances de bovins concentrée entre la fin de la saison sèche et le début d'hivernage est très courante dans les régions sahéliennes. Ce regroupement des naissances tient compte de la disponibilité d'une alimentation suffisante et d'eau d'abreuvement pour les lactantes. Le taux de mise bas est relativement bas. Cependant, ce rapport diffère d'année en année. Les périodes pendant lesquelles les naissances ont lieu chez les petits ruminants sont aussi similaires à plusieurs zones sahéliennes (Bourzat, 1989). Le nombre de naissances par femelle reste légèrement plus élevé que dans certaines zones du Niger (Colin De verdière, 1995).

Le système de confiage pratiqué dans la région du Fakara existe dans toute la région de l'Ouest Niger (Loireau, 1998). La forte proportion d'animaux n'appartenant pas aux gestionnaires, 39% en moyenne et environ 45% à Banizoumbou et Kodey, confirme l'importance de cette pratique. Ce qui a peut être longtemps perturbé les statistiques nationales du cheptel parce qu'elle n'était pas prise en compte. Les raisons de ces pratiques sont multiples. Les pratiques de solidarité relevées comme le 'habanaï' portent sur très peu

²² L'ingestion de corps étrangers fréquent dans ces régions n'est pas seulement liée à un problème de malnutrition comme nous avons pu le constater dans des zones de savane en Guinée lors de notre séjour en 2005.cf.photo de l'abattoir de Pitta en annexe.

d'animaux. On pourrait presque parler de disparition de cette pratique. Les études conduites au Niger soulignent les difficultés liées au faible nombre de têtes de bétail dans les familles (Colin De verdière, 1995) et à la disparition du noyau familial (Bode, 2004). Ces difficultés poussent les éleveurs spécialisés à assurer le gardiennage en rémunérant un berger. Dans le Fakara, le confiage n'apparaît davantage comme une option économique que comme une réalité sociale.

La pratique de la transhumance (Ayantunde, Fernández-Rivera *et al.*, 2008) relevée dans cette région agropastorale est essentiellement liée à la disponibilité en ressources alimentaires et au calendrier agricole. Sous l'impact de plusieurs facteurs climatiques et sociologiques, les mouvements de transhumance dans cette région du Niger ont connu des changements considérables (Boutrais, 2007). Les durées de transhumance observées indiquent que les éleveurs passent plus de temps dans leur terroir qu'en transhumance. Les séjours les plus longs observés sont conformes à ceux publiés par Boutrais (2007). La fréquence des départs en transhumance est fonction du nombre de bétail appartenant au gestionnaire. Dans cette région, Loireau (1998) distingue quatre types de déplacements qui dépassent la zone d'étude et qui couvrent en plus les cantons de Dantiandou, Koygolo, Harikanassou et Tagazar. Le rythme saisonnier observé montre que pendant l'hivernage, les effectifs animaux présents dans les terroirs sont plus faibles qu'en saison sèche. Les troupeaux des gestionnaires comme des non gestionnaires en saison sèche restent dans les terroirs. Cette présence est surtout motivée par le parage dans les futurs champs ou autour des campements (Achard, Banoin *et al.*, 1998) qui permet de renouveler les stocks de déjections animales utilisés pour la fumure des champs. Les déplacements se font entre les points d'eau et les campements. En hivernage, la plupart des animaux quittent les zones cultivées pour les zones de parcours sans culture et ne reviennent qu'à la fin des récoltes pour tirer parti des résidus de cultures. Le gardiennage des troupeaux est de rigueur au cours de cette période. Certains éleveurs, très peu nombreux, effectuent au cours de cette période d'hivernage, des transhumances de plus de 50 kms (Turner et Hiernaux, 2008).

4.5 Conclusion partielle

L'évaluation des effectifs du cheptel dans les trois terroirs par la méthode du comptage direct et des différences a permis d'évaluer l'importance du capital cheptel qui entre en jeu pour le recyclage de la matière organique et la dynamique temporelle du troupeau dans les trois terroirs. Des différences apparaissent entre les trois zones d'études, tant en termes d'importance du troupeau que de la dynamique saisonnière. Ce suivi a permis de quantifier la dynamique des troupeaux entre les groupes sociaux à travers l'importance du système de confiage rémunéré et limité dans le temps. L'importance de la dynamique saisonnière des troupeaux dans les différents terroirs met en exergue les pressions exercées sur les ressources en saison sèche au niveau de chaque terroir supérieures à celles de la saison hivernale. Les taux d'exploitation des troupeaux restent faibles comparés à ceux des troupeaux de zones soudaniennes, et les mortalités sont élevées (Meyer, 1989).

La prise en compte de cette dynamique saisonnière de la répartition du cheptel des différents groupes sociaux dans le calcul des bilans devrait améliorer la compréhension du rôle de l'élevage dans le recyclage des éléments nutritifs. Toutefois, cette représentation temporelle peut s'avérer insuffisante sans la prise en compte de la distribution spatiale du cheptel dans les parcours, ce qui sera traité dans le chapitre suivant.

5 Dynamique spatio-temporelle de l'ingestion et de l'excrétion à l'échelle des unités de gestion des ressources naturelles

5.1 Introduction

L'établissement des bilans d'éléments minéraux dans les agroécosystèmes culture-élevage nécessite une évaluation précise des flux liés à l'ingestion alimentaire et à l'excrétion par le bétail à des échelles spatio-temporelles utiles pour la prise de décision par les gestionnaires locaux des ressources naturelles. Dans les systèmes de production mixtes culture - élevage où l'élevage est de type extensif, l'alimentation des animaux domestiques est assurée essentiellement par les pâturages naturels avec une contribution importante des jachères (Powell, Fernandez-Rivera *et al.*, 1996; Achard et Banoin, 2003b; Powell, Pearson *et al.*, 2004), les terres abandonnées et les résidus de récoltes des cultures vivrières. La production végétale naturelle et cultivée dans ces régions est très dépendante des conditions climatiques (Hiernaux et Le Houerou, 2006) et des techniques culturales (Floret et Pontanier, 1997). La variabilité interannuelle et saisonnière de cette production végétale conditionne les quantités de masse végétale disponibles pour l'alimentation animale (Hiernaux et Turner, 1996; Turner, Hiernaux *et al.*, 2005). Les pratiques des éleveurs dans la conduite des troupeaux (Turner et Hiernaux, 2008) sont fonction du rythme saisonnier des disponibilités fourragères, de l'occupation des sols et de plusieurs autres facteurs liés aux centres de décision en matière de gestion des exploitations. La mobilité des troupeaux dans l'espace villageois (Niamir-Fuller, 1999; Turner et Hiernaux, 2002; Turner, Hiernaux *et al.*, 2005) qui est une des pratiques d'accès à l'alimentation animale, donne son empreinte à la distribution spatio-temporelle des prélèvements et des restitutions (Landais et Lhoste, 1993). Cependant, la distribution spatiale des activités d'élevage à l'échelle des espaces villageois dans le Sahel, avant les grandes sécheresses des années 1980, a connu très peu d'engouement en matière de recherche (Boudet, 1975b). Les études menées sur le déplacement des troupeaux d'élevage ont surtout porté sur les pistes à bétail des grandes zones d'élevage vers les zones de transhumance à l'intérieur d'un pays, ou à l'échelle sous-régionale (Clanet, 1987). Ces études ont permis de mieux comprendre les grandes transhumances et d'aménager les zones d'accueil par l'installation de forage, le balisage des pistes qui traversent des zones de cultures dans certains

cas. Elles ont donné lieu à l'établissement de plusieurs cartes de mouvement du bétail à l'échelle régionale sur plusieurs pays (Clanet, 1987). Ces approches ont cependant longtemps ignoré l'impact local de la dynamique spatiale de l'élevage sur les activités agricoles et l'environnement. Les pistes à bétail, qui partent des villages en direction des pâturages et des points d'eau ont été décrites dans les monographies comme des trajectoires utiles à la protection des cultures contre les dégâts des animaux. Les activités liées à la pâture du bétail n'étaient pas suffisamment prises en considération dans le recyclage de la matière organique. L'organisation villageoise a été longtemps perçue comme une structure auréolaire induite dans certaines régions par les règles du système foncier (Blanc-Pamard et Cambrezy, 1995; Loireau, 1998; Manlay, 2000; Fotsing, Cheylan *et al.*, 2003). Les parcours situés aux confins des zones agricoles tenaient également lieu d'élément clé pour l'accès du bétail à l'alimentation et la répartition des déjections animales. Cette schématisation auréolaire de l'espace a conduit à proposer dans certains cas, des espaces cloisonnés en termes de zones strictes réservées à l'élevage et à la production végétale, et souvent à des délimitations territoriales de zones pastorales comme au Niger.

A la suite des déséquilibres causés par les différentes sécheresses sur l'élevage et les systèmes de production agricole, les éleveurs, pour minimiser le risque lié aux aléas climatiques (Toutain, 2001), se sont installés dans les zones agricoles pour y cultiver, sans perdre leur aptitude pastorale. Bonfiglioli (1990) dresse une typologie détaillée des différentes formes d'agropastoralisme dans lesquelles les éleveurs ont été amenés à une "*simplification des modèles de mobilité pastorale*". Cette simplification de la mobilité n'a pas entraîné la disparition des modes de pâture diurne et nocturne (Ayantunde, Fernandez-Rivera *et al.*, 1999). Face à la pression agricole sur les terres, liée à l'accroissement naturel de la population et aux migrations de populations d'agriculteurs ou d'éleveurs à la recherche du bien être, le partage de l'espace entre système de culture et système pastoral a orienté les chercheurs vers une meilleure compréhension de la distribution spatiale du cheptel et son rôle dans le recyclage de la matière organique à l'échelle des villages et des terroirs (Stangel, 1995; Powell, Fernández-Rivera *et al.*, 1996; Turner et Hiernaux, 2002). Les contraintes et les attentes liées à l'intégration agriculture-élevage (Lhoste, 1987) ont fait émerger de nombreux autres thèmes de recherche sur l'élevage extensif.

Le développement des études systémiques dans les années 1980 (Landais, Lhoste *et al.*, 1987) a permis de tester de nouvelles approches qui mettent l'acteur et ses pratiques au centre de la recherche. Ces approches ont considérablement amélioré la compréhension de l'organisation des activités et leurs conséquences sur le milieu (Lhoste, 2002). Les travaux de modélisation conduits par Balent (1993) et Meuret (1993) ont permis de mettre en relation les composantes spatiales et temporelles des systèmes d'élevage étudiés, et d'utiliser les systèmes d'information géographiques (SIG) pour la maîtrise des espaces pâturés. Ces techniques ont été appliquées dans les systèmes extensifs au Sénégal pour établir des relations entre les pratiques et les performances des ruminants (Ickowick, 1995). Dans la mise en relation du comportement de l'animal au pâturage avec le milieu, Diarra *et al* (1993) montrent qu'il existe un lien étroit entre le comportement alimentaire des animaux et la distribution spatiale des ressources végétales. Face à la crise sur la mobilité dans les systèmes mixtes agriculture-élevage, en plus des aspects zootechniques, Turner (1999a) aborde les aspects socio-écologiques du rôle de la conduite des animaux et leur impact sur la spatialité de l'utilisation des ressources fourragères. Plusieurs études conduites au Niger ont permis d'approfondir le rôle du bétail dans le recyclage de la matière organique et dans le transfert de fertilité entre l'élevage et les cultures. Parmi ces travaux, ceux conduits par l'ILRI (William, Powell *et al.*, 1993a; Powell, Fernandez-Rivera *et al.*, 1995; Fernández-Rivera, Hiernaux *et al.*, 2005) ont contribué à l'approfondissement des thématiques sur le rôle du bétail dans le recyclage de la matière organique. Ces travaux pluridisciplinaires et intégrés ont porté sur l'introduction des questions de spatialité liées à l'organisation du terroir (Turner et Hiernaux, 2002), la variabilité des ressources fourragères (Hiernaux, Ayantunde *et al.*, 2009), l'impact des modes de gestion des troupeaux au pâturage (Turner, Hiernaux *et al.*, 2005), la variabilité de la pression de la pâture (Turner et Hiernaux, 2008) et enfin l'établissement des bilans d'éléments minéraux à l'échelle des terroirs et de l'exploitation (Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.*, 1997; Busqué, 2002). D'autres travaux sur des zones similaires au Fakara et situées au Niger (Schlecht, Hiernaux *et al.*, 2004) et au Sénégal (Manlay, 2000) ont permis de mieux élucider la variabilité spatio-temporelle de la pâture et de l'excrétion dans les pâturages communautaires à l'échelle terroir. Dans le cadre de l'ingestion, les travaux menés par l'ILRI et plus particulièrement ceux de Ayantunde (1999; 2001; 2002) ont permis une meilleure quantification et caractérisation de l'ingestion diurne et nocturne et ses effets sur l'excrétion et les performances des animaux. Dans la plupart de ces études, le rôle du bétail dans le

recyclage de la matière organique et la nécessité de prendre en compte les systèmes communautaires dans l'évaluation des bilans d'éléments minéraux ont été soulignés. Très peu d'études (Krogh, 1997; Manlay, Ickowicz *et al.*, 2004 ; Schlecht, Hiernaux *et al.*, 2004) utilisent les itinéraires des troupeaux sur l'ensemble des espaces sous gestion communautaire pour évaluer les flux à des échelles allant de la parcelle cultivée ou non au terroir villageois. Pour évaluer les flux d'ingestion et d'excrétion aux échelles de gestion des ressources communautaires, les itinéraires suivis par le bétail au cours d'un cycle annuel suivant les différentes saisons définis dans l'agro-système du Fakara, ont été couplés aux occupations de sols à travers des unités cartographiques de suivi du bétail. Cette démarche permet de prendre en compte les spécificités liées à la mobilité du cheptel et à l'utilisation du territoire, dans le but d'obtenir les flux liés à l'élevage dans différentes unités à l'intérieur du terroir. Cette approche permet également aussi de démontrer les potentialités des systèmes d'information géographique et la modélisation spatiale dans les systèmes complexes comme les agro-écosystèmes (Stoorvogel, 1995 ; Wade, Schultz *et al.*, 1998 ;Coppolillo, 2000; Turner, Hiernaux *et al.*, 2005) comme complément aux modèles et calculateurs de flux et bilans des éléments minéraux.

En se basant sur les données recueillies dans le cadre des recherches de l'ILRI déjà citées, dont un résumé complet est fourni dans Hiernaux (2004), et sur les travaux d'analyse et de cartographie des activités de l'élevage à l'échelle des unités géographiques dans les terroirs (Turner et Hiernaux, 2002), l'approche NUTPAST est utilisée dans ce chapitre pour la quantification de l'ingestion et de l'excrétion à l'échelle des unités d'occupation des sols dans l'unité géographique. Cette approche utilise les éléments suivants pour cette quantification:

- ✓ Les itinéraires suivis par chaque troupeau dans les trois sites sur une période de 12 mois (Turner, 1995b ; Turner et Hiernaux, 2002)
- ✓ les temps d'activités journalières, par saison et par terroir des animaux dans les occupations de sols (William, Powell *et al.*, 1993a; Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.*, 1997,Fernández-Rivera, Hiernaux *et al.*, 2005 ;Turner et Hiernaux, 2002)
- ✓ les statistiques d'ingestion et d'excrétion pour un animal donné, par unité de temps, par espèce et par catégorie d'animal, par saison ainsi que le poids

correspondant (Schlecht, Fernández-Rivera *et al.*, 1997 ; Fernandez-Rivera, Williams *et al.*, 1995a; Fernández-Rivera, Hiernaux *et al.*, 2005).

Les unités spatiales dans lesquelles l'évaluation est faite sont les unités d'occupation des sols dans les unités géographiques (cf. chapitre 2). L'échelle temporelle de l'évaluation des flux porte sur les 5 périodes retenues pour la division du temps dans les agroécosystèmes culture-elevage de la zone d'étude (chapitre 2). Cette évaluation a essentiellement pour but de mettre en place des plans d'information sur les flux liés à l'ingestion et à l'excrétion à l'échelle du terroir. Ces flux seront utilisés pour l'évaluation des bilans partiels à l'échelle des mêmes unités d'occupation des sols et de l'exploitation agricole dans le chapitre suivant.

5.2 Méthodes

5.2.1 Données nécessaires au calcul de l'ingestion et de l'excrétion

Une des thématiques traitées dans les recherches conduites à l'ILRI au Niger de 1992 à 2004 a porté sur le rôle de l'élevage dans le recyclage de la matière organique et le transfert de fertilité (William, Powell *et al.*, 1993a, De Leeuw, Reynolds *et al.*, 1995; Fernandez-Rivera, Williams *et al.*, 1995b). Ces travaux ont permis de disposer d'une quantité importante d'informations, qui ont fait l'objet de plusieurs publications. La documentation des bases de données réalisée par l'ILRI a été poursuivie avec l'appui de la coopération belge et la coopération japonaise (Gerard, Traore *et al.*, 2007). Une partie des données utilisées dans ce travail est constituée de celles de l'ILRI précisées dans les articles scientifiques cités ci-dessus ainsi que dans des notes et rapports. Parmi ces travaux, on retrouve ceux relatifs aux premières bases spatiales sur les unités géographiques (Turner, 1995a), ceux effectués sur les sols (Hiernaux, 1996) et ceux sur l'occupation des sols (Gérard, 2000). L'ensemble des données utilisées répond à un concept de schéma des flux de matière organique pour l'étude des transferts des éléments nutritifs qui comprend les unités de sol, la végétation et les troupeaux (cf. chapitre 2)

5.2.2 Les échelles de calcul et d'agrégation de l'ingestion et de l'excrétion

5.2.2.1 Les unités géographiques

L'espace d'étude a été subdivisé en 694 unités géographiques (Turner, 1995a) identifiables sur le terrain par des éléments physiques (pistes, topographie, sols). Les unités géographiques ont une superficie moyenne de 71.5 ha calculée en projection UTM 31 Nord. Les superficies des unités géographiques sont très variables et le coefficient de variation est de 69.5%. Elles constituent des entités spatiales dont les frontières sont fixes au cours de l'étude. Elles permettent ainsi une restitution des dynamiques existantes entre le milieu, l'animal et l'homme. Les itinéraires suivis par les troupeaux au pâturage recoupent plusieurs unités géographiques. Un troupeau t se déplace d'une unité géographique bu_1 (budgeting unit 1) à une autre unité bu_2 . Le circuit de l'animal est ainsi composé de plusieurs unités géographiques. Le terme ‘unité de compte’ attribué à ces entités spatiales correspond à leur rôle dans la formalisation utilisée. Ces unités permettent la comptabilisation des entrées et des sorties dans le cadre des transferts d'éléments nutritifs. Elles sont utilisées comme base d'agrégation des ressources végétales (voir chapitre 3).

5.2.2.2 Les unités d'occupation des sols

Les cartes d'occupation des sols utilisées représentent l'empreinte d'une campagne agricole. Elles ont été établies sur base de photographies aériennes à basse altitude à l'aide d'une caméra 24x36 montée sur un aéroplane volant à une altitude moyenne de 1200 m après les récoltes (Hiernaux, 1996; Hiernaux et Ayantude, 2004). Les classes d'occupation des sols sont les zones cultivées, les zones cultivées avec fumure, les sols incultivables, les jachères, les friches et les zones d'habitation. Les occupations de sols constituent la plus petite unité d'expression des masses végétales disponibles.

5.2.2.3 Les informations sur les itinéraires des troupeaux et les activités des troupeaux

Plusieurs suivis des troupeaux allant du suivi individuel d'un animal témoin dans un troupeau au pâturage à une rétrospective complète des itinéraires suivis par les gestionnaires lors des enquêtes sur le cheptel ont permis de relever les itinéraires diurnes et nocturnes avec les horaires relatifs aux activités de l'animal dans les unités géographiques traversées (Turner, 1995b; Hiernaux et Ayantude, 2004). De telles enquêtes sont entachées d'omissions ou

d'erreurs de relevé dans les circuits. Les erreurs les plus rencontrées sont les omissions des unités traversées et les heures de certaines activités. Les méthodes utilisées pour la correction de ces erreurs ont été décrites et les résultats ont été spatialisés pour obtenir la pression de pâture à l'échelle des unités géographiques (Turner et Hiernaux, 2002). Ces résultats ont été utilisés par la suite pour l'étude de l'impact de la conduite des troupeaux sur la pression de pâture (Turner, Hiernaux *et al.*, 2005). Les itinéraires sont composés par une succession d'unités géographiques traversées par un troupeau dans la journée et dans la nuit. Cette notion diffère de celle des pistes linéaires et des suivis effectués dans plusieurs études à l'aide de GPS (Ickowicz, Usengumuremyi *et al.*, 1997; Manlay, Ickowicz *et al.*, 2004; Schlecht, Hulsebusch *et al.*, 2004). La méthode du "shortest path" (algorithme qui permet de calculer le plus court chemin à l'intérieur d'un polygone (Shi, Zhu *et al.*, 1998) a été utilisée par Turner (2002) pour déterminer les distances parcourues par le bétail sur les itinéraires. Le suivi, toutes les 5 minutes des activités (pâture, repos, marche, abreuvement) d'un animal adulte choisi au hasard a permis de déterminer la durée de chaque activité (Hiernaux et Ayantude, 2004). Ce suivi individuel par sondage a porté sur 396 itinéraires pendant 15 mois (Turner, Hiernaux *et al.*, 2005). Il a aussi permis de déterminer la répartition du temps total dans les occupations de sol. Au cours du dénombrement des troupeaux (chapitre 4), le second suivi rétrospectif sur la même période a permis de relever au cours des 24 dernières heures, le circuit de pâture du troupeau. Ces circuits de pâture diurne et nocturne ont été identifiés sur la base de la carte des unités géographiques mises à disposition des enquêteurs (Turner, Hiernaux *et al.*, 2005).

5.2.2.4 Les paramètres d'ingestion et d'excrétion

Ils sont exprimés en saison et par catégorie d'animal en gMS/mn :

- la quantité de matière sèche ingérée
- la quantité de matière sèche excrétée.

Ces paramètres (Annexe 5.1) ont été établis sur la base des essais menés par l'ILRI (Schlecht, Mahler *et al.*, 1995; Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.*, 1997; Schlecht, Fernández-Rivera *et al.*, 1997; Schlecht, Hiernaux *et al.*, 2006).

Les informations de base utilisées sont :

- le poids vif par classe d'âge, par espèce et par saison,

- la quantité journalière de matière sèche en gramme (g) ingérée par kg de poids vif, par classe d'âge, espèce et saison ;
- Le temps de pâture en minutes par jour par classe d'âge, espèce et saison
- La digestibilité de la matière sèche par classe d'âge, espèce et saison

Les normes d'ingestion et d'excrétion du bétail utilisées, prennent en compte les modalités liées à la saison, à l'espèce et à la classe d'âge des animaux, à la différence de plusieurs études sur le rôle de l'élevage dans le recyclage de la matière organique qui utilisent des moyennes globales. Les quantités ingérées et excrétées sont liées au temps de pâture (Ayantunde, Fernandez-Rivera *et al.*, 2001). L'impact de la qualité des parcours a certes une influence sur les quantités ingérées, cependant les différences qui existent entre les résidus de cultures et les herbacées des jachères ne sont pas importantes en termes de qualité nutritionnelle (Schlecht, Fernández-Rivera *et al.*, 1997). De même pour l'excrétion, les quantités excrétées par animal et par jour dépendent de la digestibilité des aliments et des quantités de fourrage ingérées (Landais et Lhoste, 1993; Fernández-Rivera, Hiernaux *et al.*, 2005). La gestion des troupeaux et son impact sur le comportement des animaux au pâturage, notamment les temps de marche et de pâture influent aussi sur l'excrétion. La distinction n'a pas été faite entre l'urine et les fèces dans les déjections animales malgré le comportement différent des urines par rapport aux déjections solides (Brouwer et Powell, 1998). De grandes quantités d'azote contenues dans les urines sont perdues par volatilisation du NH₃ juste après les dépôts de déjections (Powell, Fernandez-Rivera *et al.*, 1995; Schlecht, Mahler *et al.*, 1995).

5.2.2.5 La notion temporelle (rappel chapitre 2)

La modélisation des systèmes d'élevage extensif pose plusieurs difficultés d'ordre méthodologique de part la variabilité temporelle des ressources et des exigences que cela impose aux acteurs en termes de pratique de conduite. L'un des principes admis dans ces approches est le découpage du temps en fonction de pratiques d'élevage et des événements qui marquent le fonctionnement des systèmes étudiés (Landais et Balent, 2001). Les saisons considérées dans cette étude (Turner, 1995b) sont fonction du climat et de l'accessibilité aux ressources fourragères. Le découpage qui découle de cette approche comprend 5 saisons, dont deux en saison des pluies (HV1 et HV2) et trois en saison sèche (SS1, SS2 et SS3). Ces

saisons correspondent à des activités agro-pastorales spécifiques. Le découpage en deux périodes pour la saison des pluies se justifie parce que le démarrage de cette saison au Sahel est très variable et peut s'étaler du 15 mai au 15 juillet (Sivakumar, 1988). Dans les cas d'installation tardive de la saison, la période considérée HV1 a un niveau de production plus faible que la seconde période HV2. Les besoins alimentaires du bétail sont assurés par les zones non cultivées. La période SS1 correspond à l'ouverture des champs pour l'utilisation des résidus de récolte. Cette période est relayée par une période très difficile pour l'élevage tant au niveau de la disponibilité des fourrages que de l'eau. C'est aussi la période de départ en transhumance.

5.2.3 Méthode d'évaluation de l'ingestion et de l'excrétion aux différentes échelles

L'évaluation de l'ingestion et de l'excrétion est réalisée pour les troupeaux gestionnaires et les troupeaux non gestionnaires au niveau spatial et selon les 5 découpages saisonniers dans NUTPAST. Cette méthode vise à déterminer la quantité de matière sèche consommée et excrétée par unité de surface au cours d'une année. Ces quantités sont converties en quantité d'azote, de phosphore et de potassium contenues dans les fourrages et les déjections animales. Le contenu en éléments minéraux des plantes est celui retenu dans le chapitre 3. Dans la comptabilisation des ligneux dans la ration alimentaire, le taux de 5% a été retenu pour la saison des pluies (HV1 et HV2) et celui de 10% pour la saison sèche (Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.*, 1997 ; Ouédraogo-Koné, Kaboré-Zoungrana *et al.*, 2006).

Le contenu en éléments minéraux des déjections animales provient des analyses de déjections animales prélevées sur les sites du Fakara (Fernandez-Rivera, Williams *et al.*, 1995b; Schlecht, Fernández-Rivera *et al.*, 1997; Fernández-Rivera, Hiernaux *et al.*, 2005). Les quantités de matière sèche obtenues sont agrégées par la suite aux différentes échelles. Les plus petites unités spatiales de calcul des flux liés à l'ingestion et de l'excrétion par unité de surface sont les unités d'occupation des sols dans l'unité géographique. Les flux sont exprimés en kilogramme de matière sèche par unité de surface (hectare).

5.2.3.1 Quantification de la fréquentation pastorale à la pâture et au repos

5.2.3.1.1 Les troupeaux gestionnaires

Les durées journalières et nocturnes de chaque troupeau gestionnaire dans les unités géographiques (Turner, 2002) ont été intégrées suivant les activités de pâture (pâture et marche) et suivant les activités au cours desquelles l'excrétion a lieu (pâture, marche, repos, abreuvement). Sur la base de ces durées, les étapes suivantes ont été suivies pour chaque saison:

- Evaluation de la durée des activités dans les occupations de sols au sein des unités géographiques au prorata des quantités de masse appétible évaluées dans le chapitre 3 sur la base des durées d'activités dans les unités géographiques.
- Les durées d'activités cumulées de la pâture et de la marche ont été utilisées pour le calcul de l'ingestion. Les durées d'activités au repos, à l'abreuvement ont été utilisées en plus pour le calcul de l'excrétion.
- Sur la base des itinéraires suivis pour chaque troupeau, une agrégation des effectifs du cheptel corrigés suivant le taux de sondage réel (fréquence des suivis) par type d'animal a été réalisée pour chaque occupation de sol dans l'unité géographique. Les effectifs sont donnés en nombre de têtes par jour et par saison.
- Le nombre total d'animaux (conversion en Unité Bétail Tropical) par unité de temps (heure), par jour et par unité de superficie (hectare) au cours de chaque saison est calculé par occupation de sol dans les unités géographiques et pour chacune des quatre activités.

Le niveau spatial d'agrégation est l'unité d'occupation des sols dans une unité géographique et le niveau temporel d'agrégation est la saison. La pression totale de pâture (UBT.heure) est calculée dans l'occupation des sols.

5.2.3.1.2 Les troupeaux non gestionnaires

Dans le Fakara, les troupeaux des agriculteurs à la différence des troupeaux peuls pâturent généralement à proximité des concessions en hivernage sous la conduite des enfants et dans l'ensemble de l'espace villageois en saison sèche. Les points d'eau constituent un bon repère de délimitation des zones de pâture entre les villages (Schlecht, 2002; Bodé, 2004). Les non

gestionnaires n'ont pas été suivis comme les gestionnaires au niveau des itinéraires de pâture. La taille de leur troupeau est beaucoup plus réduite que celle des gestionnaires. Pour le calcul de l'ingestion et de l'excrétion, les considérations suivantes ont été retenues:

- i) au cours des périodes d'hivernage, l'alimentation est assurée autour des concessions. La charge est équivalente à 1 ha par UBT et l'abreuvement s'effectue dans les mares les plus proches. Le repos se fait autour de la concession pour protéger les champs.
- ii) pendant les périodes de saison sèche, les animaux utilisent les pistes à bétail à proximité des concessions et l'abreuvement s'effectue dans les points d'eau les plus proches. Le repos se fait autour de la concession.
- iii) les activités de pâturage se situent essentiellement entre les points d'eau et les concessions.

Ces considérations amènent à évaluer sur le plan spatial, les zones de pâture des animaux en hivernage et en saison sèche. En hivernage, la zone de pâture et de repos a été déterminée à partir du point central de l'unité géographique du lieu d'habitation du non gestionnaire. A partir de ce point central, un rayon d'action a été déterminé sur la base du nombre d'UBT (nUBT) de non gestionnaires habitant l'unité géographique ou le campement à raison de 1 ha par UBT suivant la formule :

$$(2) r = \sqrt{\frac{k * nUBT}{\pi}} \text{ avec } k = 10\,000 \text{ m}^2$$

Au cours de l'hivernage, les mares temporaires sont très proches des habitations et sont généralement incluses dans les zones tampons identifiées. Le temps d'abreuvement est donc comptabilisé dans ces zones. En saison sèche, les troupeaux pâturent dans les champs pour les résidus de récoltes et sur l'ensemble des terres de la communauté. Les troupeaux des non gestionnaires accèdent généralement aux zones de pâture par des pistes proches des localités. Ces pistes ont été recherchées par analyse spatiale par la fonction "proche "²³ d'Arctoolbox

²³ La fonction "near" ou proche calcule la distance entre chaque point d'une couverture et l'arc, le point ou le nœud le plus proche d'une autre couverture. Un rayon de recherche non nécessaire permet de mieux définir le rayon de recherche

sur les couches géographiques des pistes et des campements. La distance maximale de recherche pour inclure toutes les pistes est de 2000 mètres. Cette valeur a été retenue car elle permet d'obtenir des surfaces fourragères suffisantes autour des pistes pour l'ensemble des villages où se trouvent des non gestionnaires. Une zone tampon d'environ 400 mètres autour des pistes a été retenue suite aux observations effectuées sur le comportement des troupeaux non villageois (Bodé, 2004). Le nombre total des UBT des villages est attribué à la zone tampon correspondant à la piste la plus proche.

Les durées à la pâture, à l'abreuvement, à la marche et au repos au pâturage pour les troupeaux des non gestionnaires sont issues des statistiques moyennes de comportement des animaux en pâture libre (Schlecht, Mahler *et al.*, 1995). Elles sont respectivement en moyenne de 7 h, 30 mn, 1 h et 2h. Le nombre d'UBT des concessions et le temps total d'activité pour la pâture et l'excrétion (pâture et autres activités) sont attribués aux zones tampon en hivernage (rayon autour des concessions) et période sèche (zone autour des pistes). Le nombre d'UBT heure par zone tampon pour la pâture et l'excrétion est ramené à l'unité de surface de chaque zone. La désagrégation de ces unités tampons en pixel de 1 ha permet une intégration des valeurs ainsi obtenues au niveau des autres entités géographiques (unités géographiques, unités d'occupations des sols).

L'intensité de pâture est la résultante des disponibilités fourragères et des modes de conduite des animaux par les éleveurs. Elle permet de relever l'importance des différentes occupations de sol dans la conduite des animaux et leur rythme saisonnier.

5.2.3.2 Evaluation des flux liés à l'ingestion et à l'excrétion

Aux valeurs d'UBT heure obtenues par type d'animal, par espèce, par unité géographique, par occupation des sols et par saison (au taux de 4% de sondage), sont appliqués les paramètres d'ingestion et d'excrétion de l'annexe 5.1. La spatialisation des entités correspondantes avec les valeurs obtenues dans les mailles de 100 * 100 mètres et de celles issues des quantités obtenues pour les non gestionnaires permet d'obtenir les quantités totales par maille de 1 ha. La conversion en flux d'éléments minéraux se fait par application des taux d'azote, de phosphore et de potassium contenu dans 1 gramme de matière sèche végétale ou de matière sèche de déjections animales. Le contenu en azote, phosphore et potassium des déjections animales (Annexe 5.2) provient des moyennes calculées sur la base des travaux conduits au

Niger et dans d'autres régions similaires (Fernandez-Rivera, Williams *et al.*, 1995a; Schlecht, 1995; Somda, Powell *et al.*, 1995; Schlecht, Fernández-Rivera *et al.*, 1997; Buerkert et Hiernaux, 1998)

5.2.4 Analyse statistique des résultats

Les résultats de pression de pâture, les quantités ingérées et excrétées sont analysées en fonction des terroirs, selon les différentes saisons et selon les unités d'occupation (cultures fumées et non fumées, jachères, sols incultivables, friches et zones d'habitation). Ces analyses ont pour but de quantifier l'importance des flux saisonniers selon les unités spatiales en fonction de la mobilité du bétail. Les comparaisons multiples de moyennes de l'intensité de charge, des flux et des bilans sont effectuées avec SAS en utilisant la procédure GLM (General Linear model). Les tests d'homogénéité ont été effectués par la procédure FREQ et l'examen des probabilités liées à la statistique χ^2 . Le niveau de signification pour les tests d'inférence statistique retenus est $\alpha=0.05$. Ce niveau sera précisé dans les cas où des seuils différents sont choisis. Dans le calcul des moyennes des quantités exprimées par unité de surface comme l'ingestion et l'excrétion, les unités cartographiques ayant des valeurs nulles n'ont pas été prises en compte. Cette omission entraîne des différences entre les estimations globales qui prennent en compte les superficies totales des trois terroirs et les moyennes calculées sans les unités ayant des valeurs nulles.

L'expression de la charge peut être exprimée de plusieurs manières. Elle est définie comme le nombre de têtes de bétail par unité de surface et par période. Quand la période est annuelle ou saisonnière, on parle de charge annuelle ou de charge saisonnière. L'unité utilisée est l'UBT/ha ou Ha/UBT par an ou par saison (Boudet, 1975b). L'expression de la surface retenue pour la simplicité de lecture de certaines valeurs est le km² ou l'hectare.

5.3 Résultats

5.3.1 Les charges sur les terres de parcours

Ramenée à la superficie totale cartographiée, soit 30825 hectares (sans les zones hors terroir), la densité moyenne du cheptel est de 5.5 UBT.km⁻². La densité moyenne calculée sur l'ensemble des terroirs est de 4.2 UBT.km⁻² en hivernage et de 6.9 UBT.km⁻² en fin de saison sèche (Figure 5-1). L'écart moyen²⁴ des valeurs saisonnières à Kodey est de 2.3 et celui des deux autres terroirs de 0.7. Cette variation importante dans le terroir de Kodey est liée à la pression agricole de la période hivernale et son impact sur la mobilité du cheptel. Les charges saisonnières sont évaluées comme les densités à la différence que les superficies utilisées sont celles des parcours disponibles à savoir les jachères, friches et sols incultivables pour l'hivernage et les superficies totales des parcours (cultures, jachères, friches, sols incultivables) en saison sèche. La charge moyenne annuelle dans les trois terroirs est de 5, 7 et 8 UBT.km⁻² à Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey respectivement.

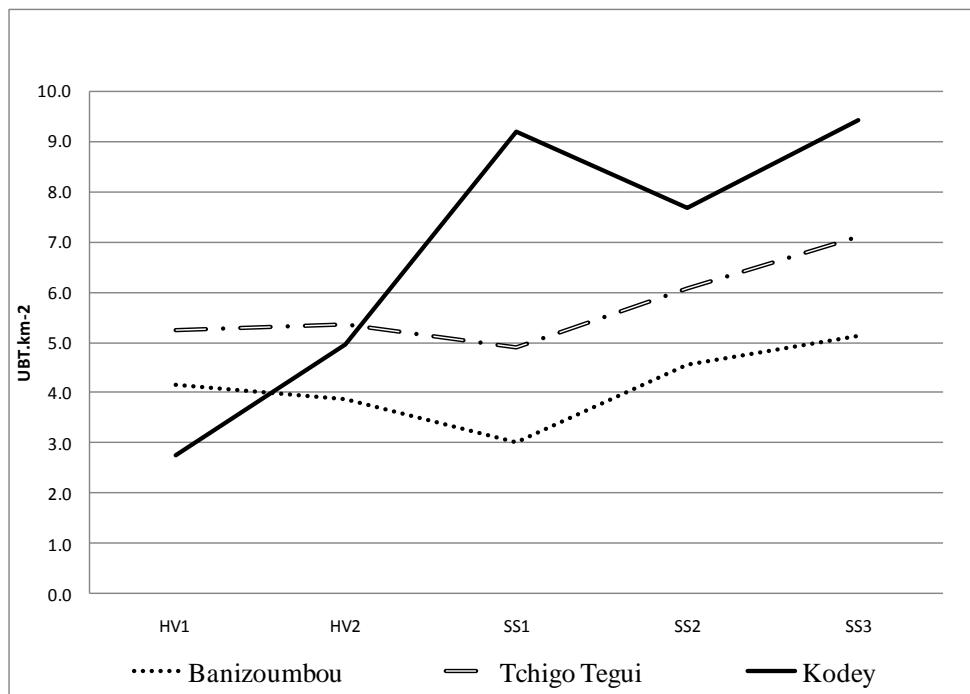


Figure 5-1 : Variation saisonnière de la densité du cheptel dans les trois terroirs

²⁴Ecart moyen = $\frac{1}{n} \sum |x - \bar{x}|$ avec x la charge saisonnière et \bar{x} la moyenne des 5 saisons, n=5

A la différence de la densité, les charges sont beaucoup plus élevées en seconde période de saison des pluies après l'installation des champs (Figure 5-2). A l'exception de la pâture des mauvaises herbes en début d'hivernage sous le gardiennage des bergers dans les champs, les jachères et les autres zones non cultivées sont très pâturées pendant l'hivernage. L'ouverture des champs pour l'accès aux résidus de récolte entraîne une augmentation des superficies pâturables. Les charges les plus élevées, de l'ordre de $19 \text{ UBT}.\text{km}^{-2}$ ont été relevées à Kodey dans la seconde période de l'hivernage et les charges les plus faibles, de l'ordre de $4 \text{ UBT}/\text{km}^2$ à Banizoumbou à l'ouverture des champs.

La charge moyenne journalière est de $0.86 \pm 0.03 \text{ UBT}.\text{ha}^{-1}$ au cours de la journée et de $0.25 \pm 0.02 \text{ UBT}.\text{ha}^{-1}$ au cours de la nuit. Ces pressions pastorales ne s'exercent pas sur l'ensemble du territoire comme le laissent penser les deux premiers indicateurs mais seulement sur une partie des unités géographiques dans la journée et dans la nuit (Figure 5-3). Il n'y pas de différence significative entre les terroirs pour la pression diurne (test de Tukey – Kramer : $F=0.92$, $\text{ddl}=2$, $p=0.4$). Les pressions sont respectivement de 0.88, 0.84 et 0.96 pour Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey. La pression nocturne diffère cependant entre les terroirs ($F=8.45$, $\text{ddl}=2$, $p=3.10^{-4}$) avec une valeur à Kodey de $0.36 \text{ UBT}.\text{ha}^{-1}$ supérieure à celle de Banizoumbou (0.20) et de Tchigo Tegui (0.19).

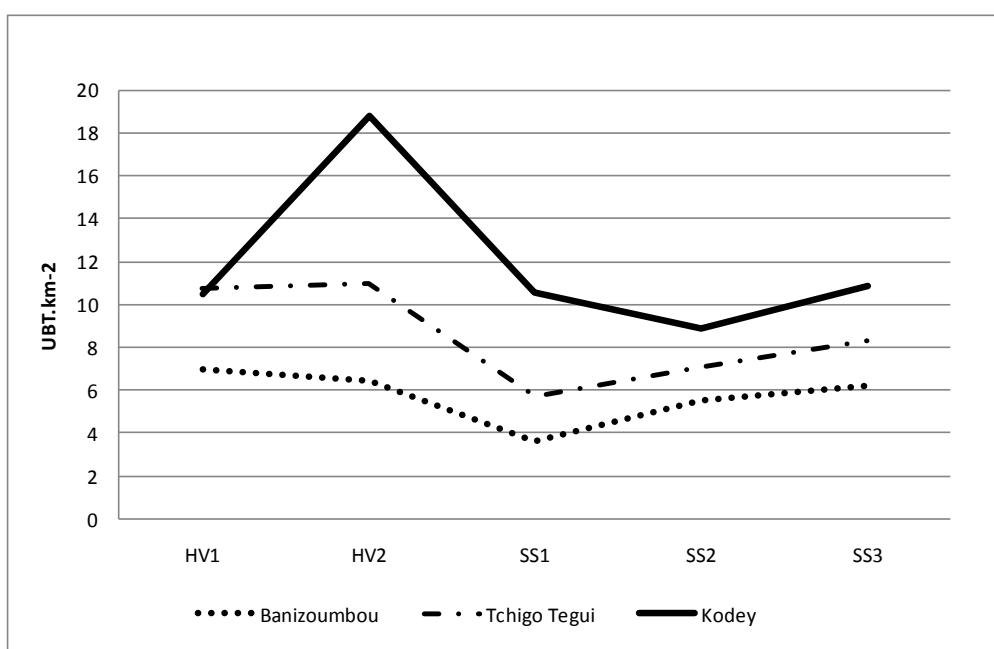


Figure 5-2 : Variation saisonnière des charges animales dans les terroirs

Les comparaisons multiples par le test de Tukey indiquent qu'il n'y a pas de différence significative entre Banizoumbou et Tchigo Tegui au seuil de signification $\alpha=0.05$. Les différences entre les deux terroirs ne dépassent pas $0.012 \text{ UBT.ha}^{-1}$ avec un intervalle de confiance de la différence comprise entre $-9.10^{-2} \text{ UBT.ha}^{-1}$ et $12.10^{-2} \text{ UBT.ha}^{-1}$. Les surfaces explorées par le bétail au cours de la journée et au cours de la nuit représentent respectivement, en tenant compte uniquement des surfaces des unités géographiques, 46% et 11% soit respectivement 22582 ha et 5398 ha (Figure 5-3). Les tendances saisonnières indiquent que les superficies explorées baissent en seconde partie de saison des pluies (Annexe 5.3) en raison certainement de l'intensité des pluies, des risques de tornade et de la disponibilité fourragère sur les jachères. A la récolte, cette baisse est encore prononcée car la pâture est orientée vers les résidus de récolte. Les superficies explorées la nuit suivent la même tendance que celles du jour. Les pistes suivies pour la pâture et les points d'abreuvement couvrent l'ensemble des terroirs avec des zones de pâture préférentielles en hivernage et en saison sèche (Annexe 5.4).

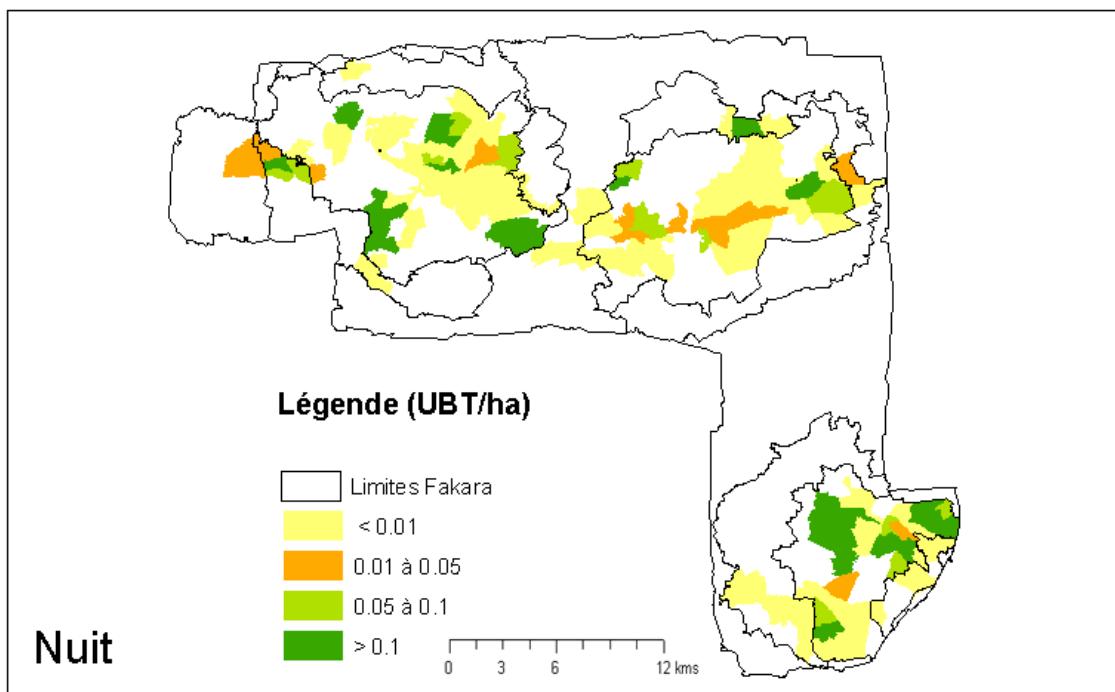
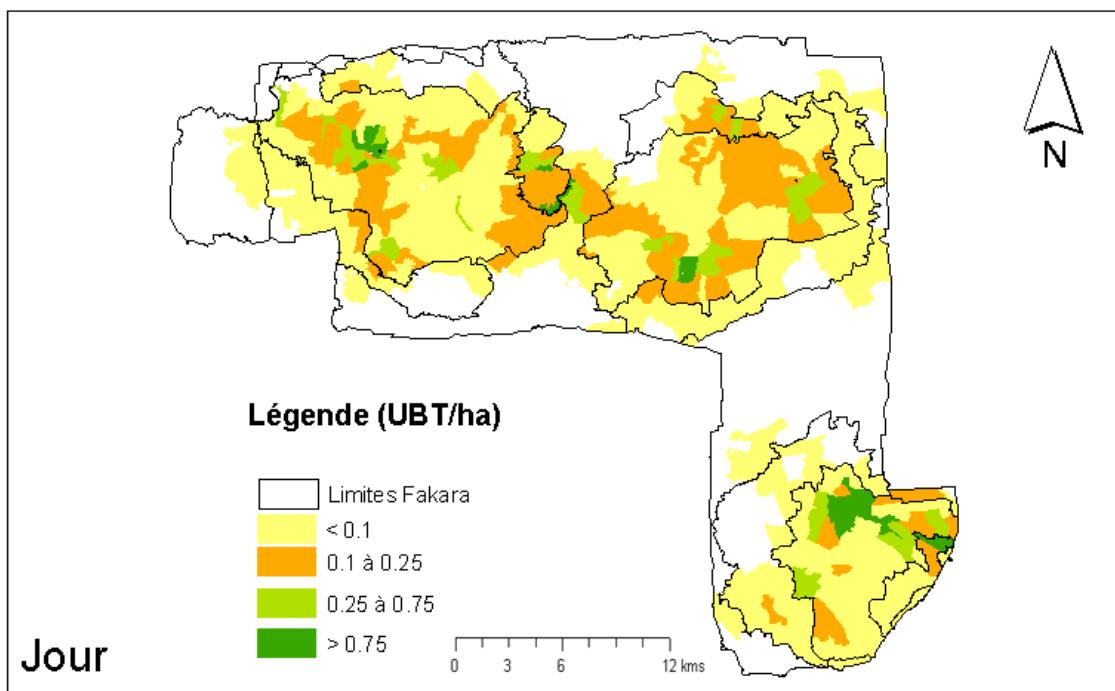


Figure 5-3 : Charge diurne et nocturne en hivernage (1) dans les trois terroirs du Fakara

Les itinéraires suivis par le bétail utilisés pour ces cartes ne couvrent pas forcément les zones où la végétation a été évaluée.

5.3.2 L'intensité de la charge

5.3.2.1 Temps de pâture

Le temps de pâture est essentiellement lié à la disponibilité fourragère en hivernage dans les jachères et à la libération des zones cultivées en saison sèche (Table 5-1). L'analyse de variance multifactorielle entre la saison et l'occupation des sols montre une différence hautement significative entre les saisons, l'occupation des sols et leur interaction (respectivement $F=24.4$, 94.6 , et 17.5 pour $ddl=3$, 4 et 12). Les deux facteurs pris ensemble expliquent 80% de la variabilité observée. Les différences saisonnières pour le temps passé dans chaque occupation de sol apparaissent significatives uniquement pour les jachères et les champs (respectivement $F=36.09$ et 54.21 pour $ddl=3$ et $p < 10^{-4}$). Les contrastes saisonniers (Annexe 5.5) indiquent aussi des différences significatives entre le début de la saison sèche et la fin de la saison sèche, et aussi entre la période hivernale et la saison sèche. Ces résultats suggèrent de considérer le temps passé dans les unités d'occupation en trois périodes, l'hivernage, les deux premières périodes de la saison sèche et la fin de la saison sèche. De ces agrégations, il ressort que les jachères constituent la première source d'alimentation en hivernage avec 72% de fréquentation. L'utilisation des champs couvre toute la saison sèche avec une fréquence de 53% en SS1 et SS2. Au cours de la dernière période de la saison sèche (SS3), les champs et les jachères ont des fréquences similaires de l'ordre de 42% (Figure 5-4).

Table 5-1 : Durée moyenne de la pâture journalière selon la nature de l'occupation de sol en minutes

	Sol incultivables	Jachères	Champs	C. fumés	Friches
HV (1&2)	55 ± 12	329 ± 32	14 ± 7	4 ± 2	75 ± 14
SS1	12 ± 3	102 ± 10	264 ± 16	57 ± 6	17 ± 7
SS2	14 ± 2	160 ± 18	221 ± 23	40 ± 6	23 ± 9
SS3	40 ± 8	372 ± 53	399 ± 58	66 ± 6	64 ± 17
Ensemble	30 ± 5	241 ± 25	224 ± 28	42 ± 5	45 ± 7

Unité = minutes

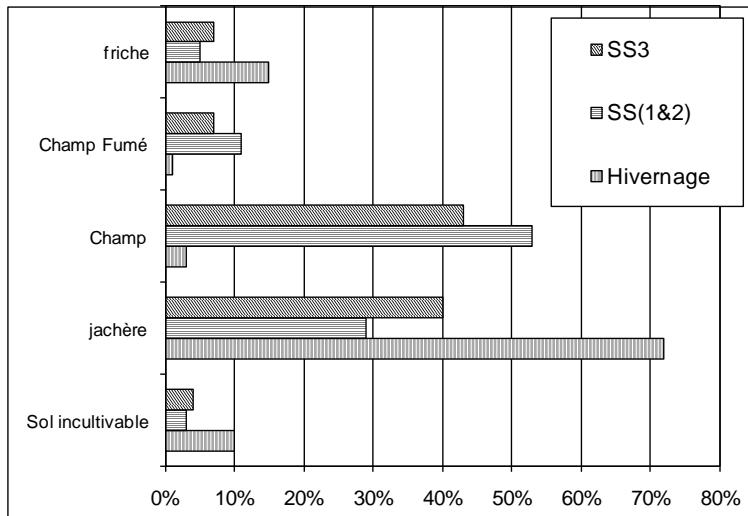


Figure 5-4 : Proportion de temps journalier passé dans les occupations de sols

5.3.2.2 L'intensité de charge dans les occupations de sols

L'intensité de charge est exprimée en nombre d'UBT. heure par unité de surface et par jour. Elle a été évaluée par unité géographique, par occupation des sols dans l'unité géographique et par saison. L'évaluation de l'intensité de charge dans les unités d'occupation des sols tient compte de la répartition temporelle des activités de l'animal au cours des différentes saisons dans les différents types d'occupation de sols.

L'intensité de charge moyenne des occupations de sol sur l'ensemble des terroirs est de l'ordre $1.7 \text{ UBT.h.ha}^{-1}$. Elle reste très variable suivant les types d'occupation de sol avec un minimum de $0.5 \pm 0.1 \text{ UBT.h.ha}^{-1}$ pour les friches et les sols incultivables, et des maxima de $4.8 \pm 0.5 \text{ UBT.h.ha}^{-1}$ (Annexe 5.6). Un indice de pression saisonnier a été calculé sur la base du rapport de l'intensité de pâture moyen dans une occupation de sol sur la somme des intensités de pâtures saisonnières de toutes les catégories d'occupation de sols. La variation saisonnière dans les fréquentations des parcours est marquée par l'importance des jachères en hivernage et des cultures en saison sèche. Les pâturages communautaires constitués par les friches et les sols incultivables (S), présents surtout sur les plateaux ont un indice de l'ordre de 40% en hivernage (20% pour les friches et 20% pour les sols incultivables) et en moyenne 8 % en saison sèche (Figure 5-5). L'intensité de charge en hivernage reste très élevée sur les jachères. L'analyse de l'intensité de charge a été effectuée pour chaque saison afin de comparer, d'une part, les terroirs et, d'autre part les occupations des sols. L'interaction entre terroir et occupation de sol a également été analysée pour les spécificités liées à l'intensité de charge dans une occupation de sol dans un terroir donné.

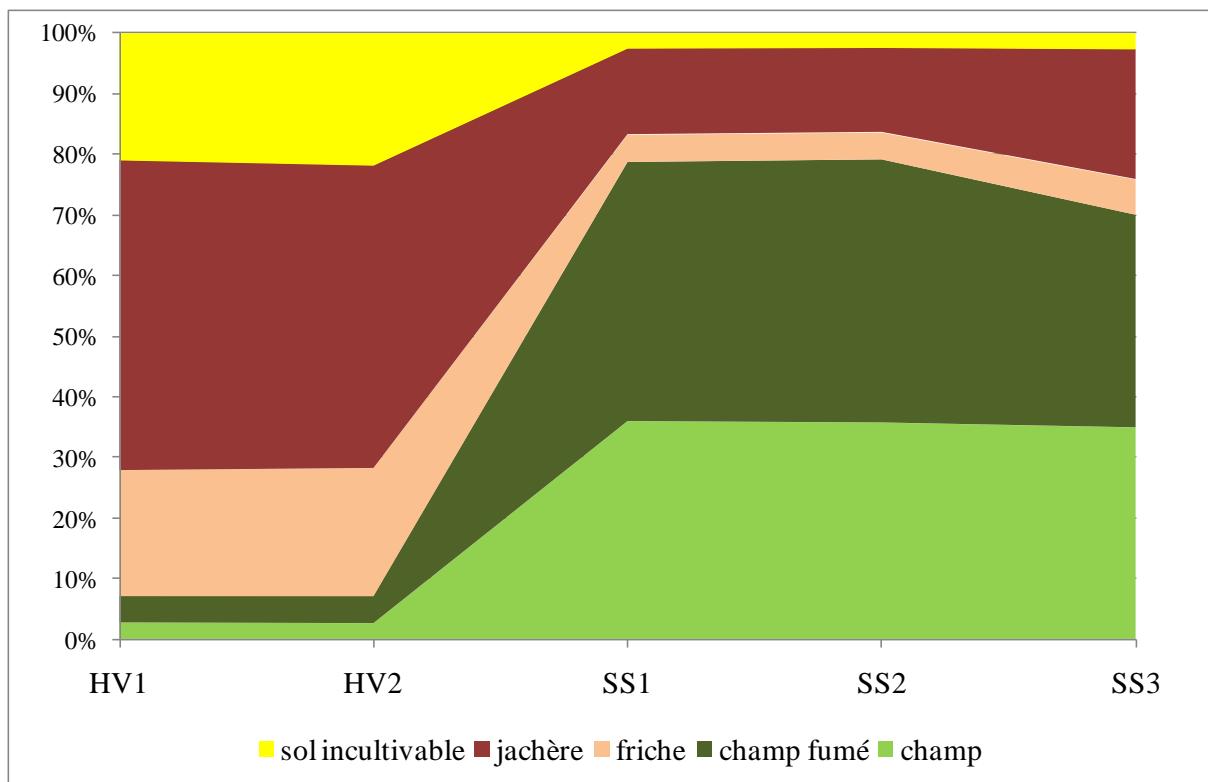


Figure 5-5 : L'indice de pression saisonnier par type d'occupation des sols

Cette figure indique pour chaque saison l'importance du type d'occupation % de la pression totale sur le terroir.

Ces résultats indiquent de manière globale des différences significatives entre les terroirs à l'exception de la dernière période de saison sèche ($F=1.19$, $ddl = 2$, $p = 0.3$). En hivernage (HV1 et HV2) et en première période de saison sèche, l'intensité de charge à Kodey reste supérieure à celle des deux autres terroirs. Cette différence s'estompe à la deuxième période de saison sèche quand la pression de Kodey devient la plus faible. Au niveau des occupations des sols, l'importance des jachères diminue à la récolte en première période de saison sèche pour donner lieu à des pressions plus importantes sur les champs au cours de la saison sèche. L'intensité de charge dans les jachères reste néanmoins supérieure à celles des zones non cultivées (friches, sols incultivables) au cours de cette période (Table 5-2). Les valeurs les plus élevées, supérieures à $393 \text{ UBT.heure.km}^{-2}$ sont enregistrées dans les deux dernières périodes de saison sèche sur les cultures. Le terroir de Kodey enregistre des pressions très fortes au cours de ces périodes avec un équilibre entre l'intensité de charge des cultures et des jachères (test de Tukey: $p=0.09$). En revanche, les valeurs restent très élevées sur les jachères, pâturages et sols incultivables par rapport aux deux autres terroirs.

Table 5-2 : Intensité de charge saisonnière en UBT.heure.km⁻² par type d'occupation de sol

Terroir	Saison	Cultures	Jachères	Friches	Sols incultivables
Banizoumbou	HV1	27	281	159	373
	HV2	18	158	87	210
	SS1	199	36	16	42
	SS2	591	100	33	97
	SS3	654	204	45	132
Tchigo Tegui	HV1	18	219	107	150
	HV2	11	132	70	107
	SS1	219	52	24	28
	SS2	417	106	37	50
	SS3	393	204	59	100
Kodey	HV1	12	680	312	659
	HV2	7	364	208	578
	SS1	205	107	18	24
	SS2	198	130	10	3
	SS3	220	277	27	15

5.3.3 L'ingestion

5.3.3.1 Quantités totales ingérées

Les quantités totales annuelles de matière sèche ingérées dans les trois terroirs sont de 6134 tonnes (Table 5-3). Les quantités totales annuelles ingérées correspondent à 124 kg.MS.ha⁻¹ si l'on tient compte de la superficie des 3 terroirs et des zones hors terroir. La consommation par unité de surface est différente selon les terroirs. Elle est respectivement de 231, 185 et 172 kg.MS.ha⁻¹.an⁻¹ à Kodey, Tchigo Tegui et Banizoumbou. Elle est de 13 kg.MS.ha⁻¹.an dans les zones hors terroir. La superficie totale non fréquentée par le bétail représente 5% des cultures et 9% des pâturages, soit respectivement 543 hectares et 1607 hectares. Ces superficies sont essentiellement situées à Kodey et Banizoumbou. Elles représentent 1% des superficies à Tchigo Tegui.²⁵

²⁵ Ces superficies ont été considérées dans le calcul des paramètres d'ingestion et d'excrétion par unité de surface ;

Table 5-3 : Quantités totales de matière sèche ingérée dans les terroirs et par saison

Terroir	Superficie (ha)	HV1	HV2	SS1	SS2	SS3	Total annuel
Banizoumbou	12182	256	268	274	525	771	2094
Tchigo Tegui	11064	226	241	308	517	757	2050
Kodey	7579	197	184	334	408	623	1748
Hors terroir	18721	37	26	34	49	98	243
Ensemble	49546	716	719	950	1500	2250	6134

Unité = tonne de matière sèche (T)

La répartition des masses ingérées dans la première et la deuxième auréole définie sur la base de l'intensité des activités de pâturage pour chaque terroir, est respectivement de 4/5, 1/5 dans les trois terroirs. Les ingestions dans la première auréole représentent respectivement en début de saison sèche pour Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey, 91%, 90% et 76% des quantités ingérées. Ces proportions se maintiennent pendant les deux premières parties de la saison sèche. Le rapport entre les quantités de matière sèche ingérées par unité de surface entre les deux zones des terroirs est respectivement de 4.3, 3.5 et 3.6 à Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey.

5.3.3.2 L'ingestion journalière par unité de surface dans les unités géographiques

L'ingestion journalière ou le prélèvement journalier moyen de matière sèche par unité de surface dans les unités géographiques est de l'ordre de $322.7 \pm 12.0 \text{ g.MS.ha}^{-1}$. L'ingestion journalière par unité de surface diffère entre les terroirs ($F=6.45$, $p= 0.0016$, $ddl=2$) et entre les saisons ($F=16.29$, $p < 10^{-4}$). L'ingestion journalière à Kodey ($606.9 \pm 50.1 \text{ g.MS.ha}^{-1}$) est supérieure à celle de Tchigo Tegui et Banizoumbou. Les valeurs obtenues en saison sèche sont supérieures à celles des autres saisons dans les trois terroirs (Table 5-4). Un gradient positif d'ingestion apparaît de la première partie de l'hivernage à la troisième partie de la saison sèche avec un niveau plus élevé au début de la saison sèche à Kodey par rapport aux autres périodes. Cette variation est surtout liée aux fluctuations saisonnières des effectifs et à la concentration des troupeaux sur les zones cultivées malgré l'ouverture de toutes les zones de parcours en saison sèche. Les zones situées à proximité des villages ont des valeurs moyennes annuelles d'ingestion journalière plus élevées que les autres zones. Les ingestions journalières dépassent 1000 gr.MS.ha⁻¹ (Figure 5-6).

Table 5-4 : Ingestion journalière par terroir suivant les 5 saisons

Terroir	HV1 (a)	HV2 (ab)	SS1 (ab)	SS2 (b)	SS3 (c)	Ttes saisons
Banizoumbou (a)	344.4 \pm 30.0	361 \pm 35.4	368.4 \pm 47.6	473.2 \pm 61.1	688.1 \pm 66.6	447.0 \pm 22.7
Tchigo Tegui (a)	334.7 \pm 33.9	356.5 \pm 52.0	457 \pm 56.9	513.9 \pm 63.3	744.1 \pm 87.6	481.2 \pm 28.0
Kodey (b)	426.7 \pm 70.5	398.7 \pm 75.9	722.7 \pm 152.2	592 \pm 87.9	894.2 \pm 141.4	606.9 \pm 50.1
Hors terroir	32 \pm 7.5	22.6 \pm 6.7	29.3 \pm 11.0	28.9 \pm 9.7	56.5 \pm 16.6	33.9 \pm 4.9
Ensemble	236.8 \pm 16.3	237.7 \pm 19.3	314 \pm 30.2	332.2 \pm 26.4	493 \pm 35.7	322.7 \pm 12.0

Unité = gramme de matière sèche par hectare et par jour ($\text{g.MS.ha}^{-1}\text{jour}^{-1}$)

Les lettres différentes devant les terroirs ou les saisons indiquent une différence non significative d'après l'ajustement de Tukey.

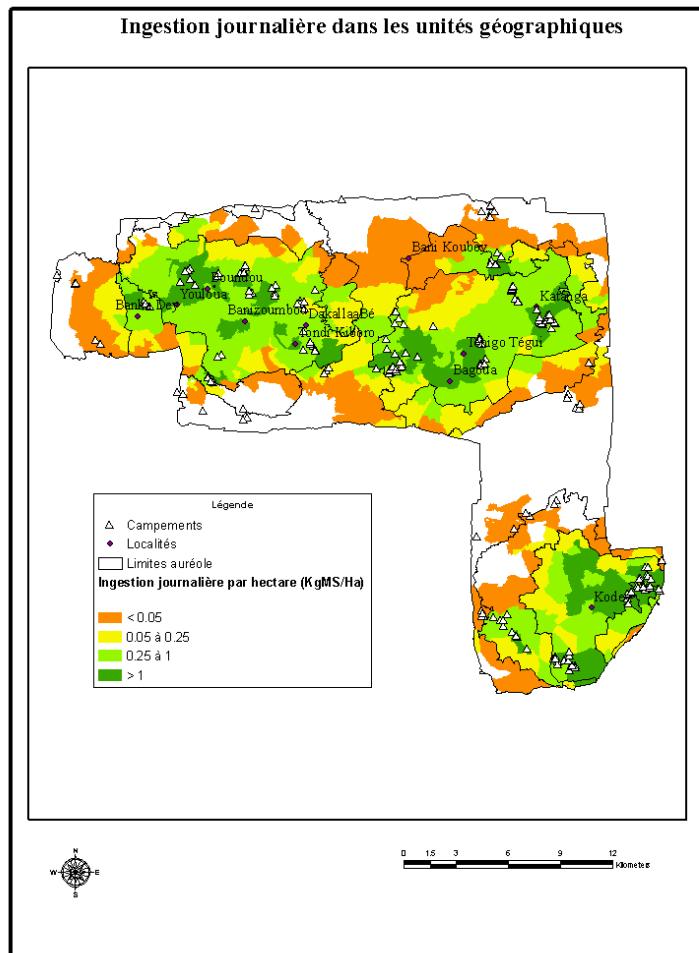


Figure 5-6 : Ingestion journalière moyenne dans les unités géographiques (kgMS/ha)

5.3.3.3 Temps de broutage dans les unités d'occupation des sols

Le temps de broutage est variable suivant les types d'occupation des sols et suivant les saisons (Table 5-5). Le résultat de la comparaison multiple entre espèce et zone ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'égalité du temps de pâture entre espèces dans les différentes zones. Les probabilités respectives sont $p=0.09$ et $p=0.20$ ($F=0.09$ pour $ddl=2$ et $F=1.58$ pour $ddl =2$). En revanche, les différences observées entre saison et occupation de sol sont significatives ($F=12.09$ et $ddl=3$ et $F=47.5$ et $ddl=4$). Le coefficient de détermination du modèle est de 0.83 si l'on considère les trois sources de variation qui sont la saison, l'occupation de sol et l'interaction occupation des sols et saison. Le bétail passe environ 75 % du temps dans les jachères en hivernage et 20 à 40% du temps en saison sèche. Les champs sont surtout fréquentés en saison sèche avec 60% du temps à l'ouverture des champs et 40 à 45% du temps dans les deux dernières parties de la saison sèche. Le temps passé dans les zones incultivables (plateaux et sols abandonnés) ne dépasse guère 21% en hivernage et 6% à 10% en saison sèche.

Table 5-5 : Temps de broutage dans les unités d'occupation de sol au cours d'une journée;

Saison	Sols incultivables.	Jachères	Cultures	Cultures fumées	Friches
HV1	27 \pm 3	280 \pm 6	13 \pm 2	2 \pm 0	42 \pm 4
HV2	29 \pm 3	293 \pm 9	11 \pm 2	1 \pm 0	54 \pm 3
SS1	8 \pm 1	85 \pm 3	231 \pm 3	45 \pm 1	16 \pm 2
SS2	9 \pm 1	150 \pm 5	173 \pm 4	27 \pm 2	24 \pm 3
SS3	25 \pm 3	336 \pm 18	335 \pm 16	44 \pm 4	59 \pm 6

Unité=minutes

5.3.3.4 Ingestion dans les occupations des sols

L'évaluation détaillée de l'ingestion dans les occupations de sols a permis de déterminer la contribution des différentes unités dans l'ingestion totale. Les quantités totales ingérées au cours d'une année proviennent en grande partie des jachères (44%) et des cultures (35%). Les autres pâturages sur sols incultivables et les abords des villages y contribuent pour 11%. Dans les trois terroirs, cette répartition n'est pas similaire ($\chi^2 = 713.9$, $ddl=10$, $p < 10^{-4}$ et $V^{26}=0.24$). Les tendances sont essentiellement marquées par une plus grande contribution des cultures à Kodey pour environ 57% et une plus grande contribution des jachères à Banizoumbou et Tchigo Tegui pour respectivement 54% et 47% (Figure 5-7). La variabilité saisonnière de

²⁶ Indice de Cramer pour la qualité du χ^2 .

l'ingestion journalière est essentiellement marquée par le relais entre les jachères et les cultures quand on passe de la saison des cultures à la saison sèche.

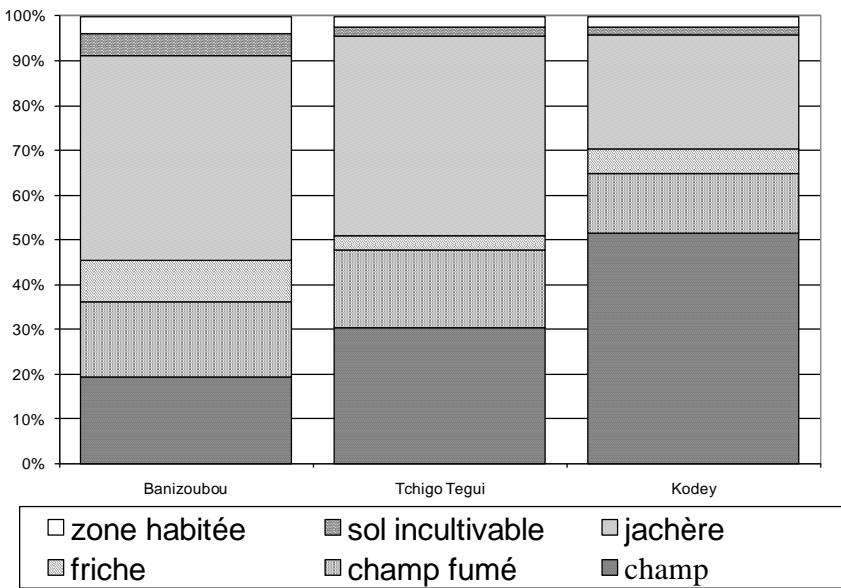


Figure 5-7 : Répartition de l'ingestion totale du terroir par type d'occupation des sols

Les différentes évaluations de masse du chapitre 3 et les évaluations de pression pastorale et d'ingestion permettent d'effectuer le bilan fourrager des différentes entités géographiques dans NUTPAST. Le rapport entre l'ingestion totale et les masses appétibles sur les 12 mois est de 24%. Ce rapport est de 21% à Banizoumbou et Tchigo Tegui, et de 27% à Kodey. Ce rapport est égal à 28%, 25% et 31% sans la prise en compte des ligneux dans les trois terroirs. Les masses ligneuses appétibles ne représentent que 19%, 12% et 6% à Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey (cf. Chapitre sur la végétation). Le rapport de l'ingestion sur les masses disponibles calculées dans les auréoles indique des différences entre l'auréole 1 et l'auréole 2 (Table 5-6). Les taux de consommation atteignent 28% à 38% dans l'auréole 1 et ne dépassent guère 8% à 14% dans l'auréole 2.

Le rapport entre l'ingestion totale et les masses végétales appétibles (Table 5-6) a été calculé d'une part avec les masses évaluées en octobre (R1), et d'autre part, avec les mêmes masses complétées par les ingestions des deux périodes hivernales (R2). Les moyennes pondérées par les superficies des deux rapports ont été évaluées suivant les 5 catégories d'occupation de sol regroupées en cultures, jachères et autres pâturages (friches, sols incultivables). L'analyse de variance non paramétrique (test de Welch) a été utilisée pour les comparaisons de moyenne

étant donné l'inégalité des variances²⁷. Les tests réalisés aussi bien sur les terroirs que sur les occupations de sol sont significatifs ($F=6.6$ pour $ddl=2$ et $p < 10^{-3}$ pour les terroirs ; $F=45.9$ pour $ddl=2$ et $p < 10^{-4}$ pour les occupations de sol).

La variabilité spatiale du rapport d'ingestion met en exergue cette différence entre les auréoles (Figure 5-8). L'examen détaillé de zones spécifiques comme les plateaux (Figure 5-9), essentiellement dominés par la brousse tigrée met en relief des indices élevés à Kodey sur les parcours des plateaux. Les jachères situées sur ces plateaux ont aussi des indices élevés à Banizoumbou et Kodey, respectivement 30% et 22% (Table 5-7).

Table 5-6: Rapport ingestion et masse appétible dans les terroirs

Occupation des sols	Cultures		Jachères		Autres pâturages		moyenne	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
Banizoumbou	22%	22%	29%	23%	16%	10%	23%	19%
Tchigo Tegui	24%	24%	28%	21%	10%	7%	22%	18%
Kodey	27%	25%	40%	24%	43%	20%	32%	24%
Tout terroir	25%	24%	30%	22%	16%	10%	24%	20%

Table 5-7 : Rapport ingestion et disponibilité sur les plateaux

Occupation des sols	Cultures		Jachères		Autres pâturages		moyenne	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
Banizoumbou	6%	6%	30%	27%	6%	5%	8%	8%
Tchigo Tegui	15%	14%	19%	17%	3%	3%	8%	7%
Kodey	10%	10%	22%	17%	34%	23%	24%	17%
Tout terroir	13%	13%	21%	19%	6%	5%	10%	8%

R1 = masses évaluées en octobre

R2 = masse évaluées en octobre + masses ingérées en saison des pluies

²⁷ La transformation arcsinus appliquée aux variables n'a pas permis ici de stabiliser la variance (test de Bartlett: $F=34.04$, $ddl=2$ et $p<0.0001$)

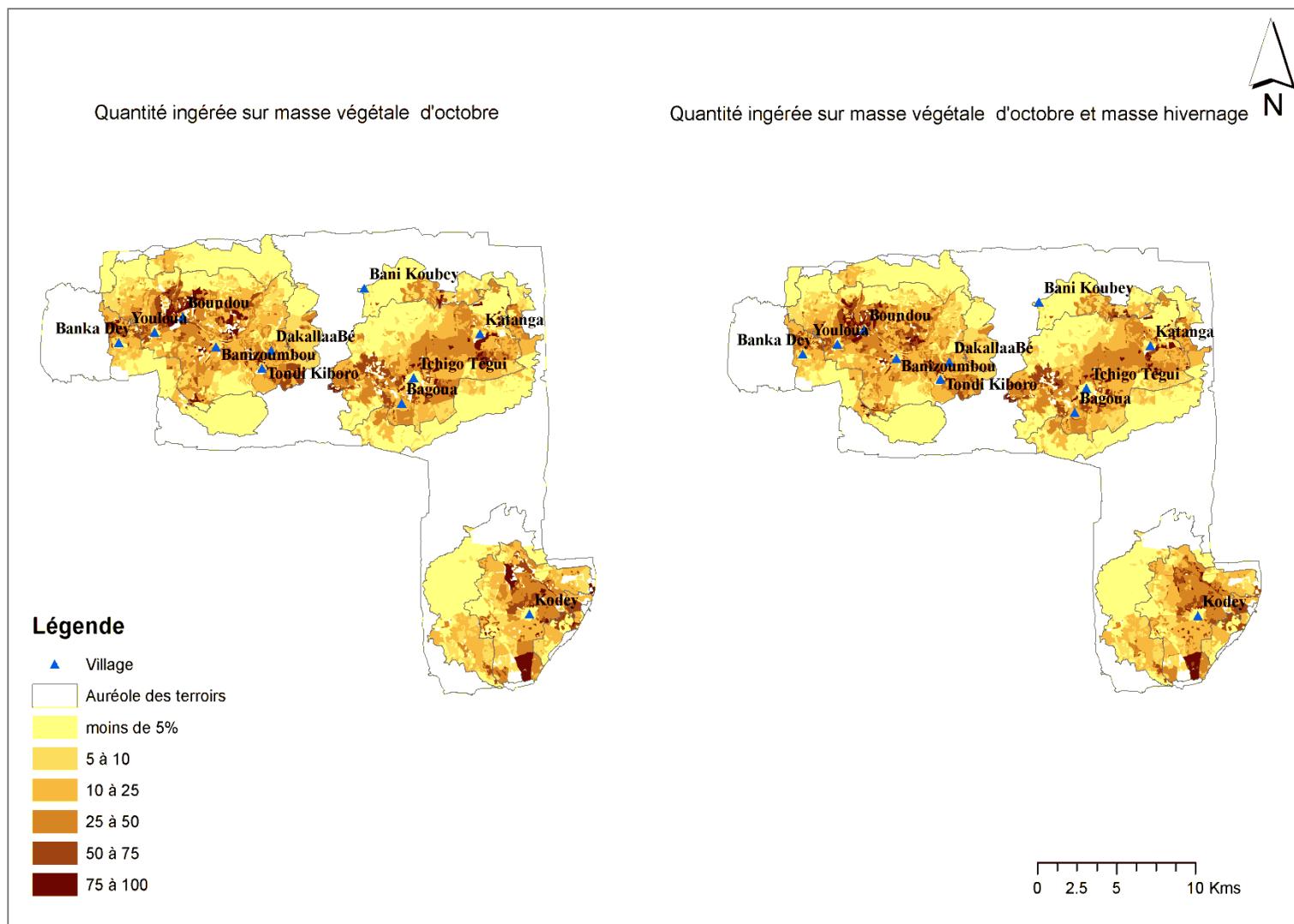


Figure 5-8 : Rapport de l'ingestion totale sur les masses appétibles mesurées en octobre, et sur les masses appétible totales

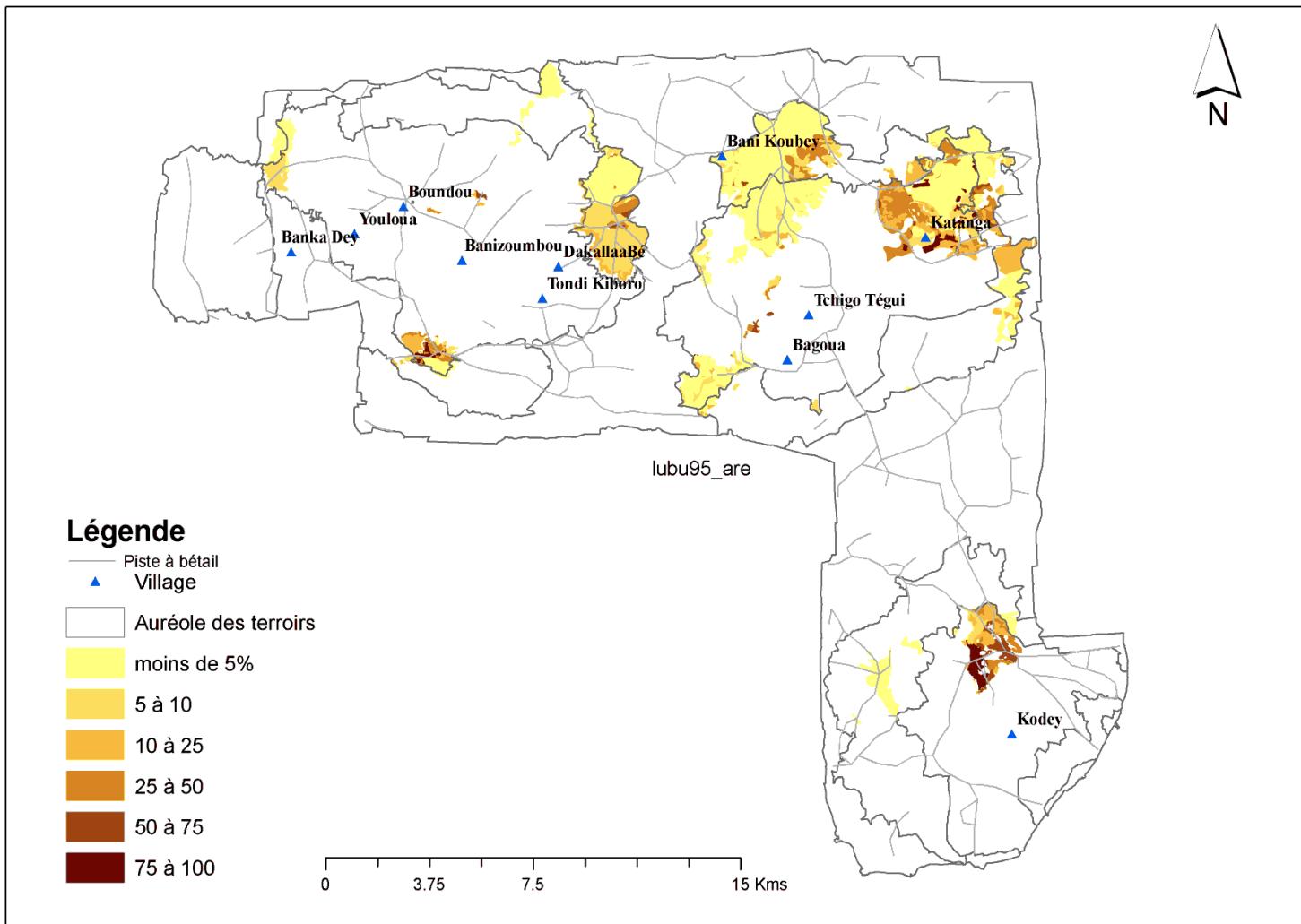


Figure 5-9 : Rapport de l'ingestion sur les masses appétibles dans les plateaux.

5.3.4 L'excrétion

5.3.4.1 Quantités totales excrétées

Les quantités totales de déjections animales²⁸ excrétées par les troupeaux des trois terroirs s'élèvent sur les 12 mois à 2526 tonnes de matière sèche (Table 5-8). La répartition des déjections animales est respectivement de 33%, 36%, 30% et 2% pour Banizoumbou, Tchigo Tegui, Kodey et les zones hors terroir. Les quantités de déjections animales par unité de surface sont de $51 \text{ kg.MS.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ avec des différences importantes entre terroirs. Les quantités de déjections animales par unité de surface et par an dans les trois terroirs sont respectivement de 68, 81, 99 et $3 \text{ kg.MS.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour Banizoumbou, Tchigo Tegui, Kodey et les zones hors terroir.

Table 5-8 : Quantités annuelles de déjections animales dans les terroirs par saison

Terroir	HV1	HV2	SS1	SS2	SS3	Total
Banizoumbou	107	118	133	233	233	824
Tchigo Tegui	103	115	155	263	262	898
Kodey	90	92	181	193	191	747
Hors terroir	8	6	8	15	22	58
Ensemble	308	331	476	704	707	2526

Unité = tonnes de matière sèche

L'évaluation des quantités de déjections animales dans les deux auréoles des terroirs indique des différences importantes du même ordre que celles relevées dans l'ingestion (4/5 contre 1/5). Les déjections animales annuelles par unité de surface dans l'auréole 1 sont respectivement de 94, 117 et $157 \text{ kg.MS.ha}^{-1}$ pour Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey. Les valeurs dans l'auréole 2 sont dans les mêmes terroirs de 27, 22 et 50 kg.MS.ha^{-1} . L'auréole 2 dans les terroirs reste cependant très différente des zones hors terroirs dont les dépôts par unité de surface ne dépassent pas 3 kg.MS.ha^{-1} . D'autres troupeaux extérieurs fréquentent ces zones hors terroir.

²⁸ Les déjections animales sont constituées des excréptions fécales et des excréptions urinaires. Seules sont prises en compte ici les excréptions fécales.

5.3.4.2 Quantités quotidiennes totales excrétées

Les quantités de déjections animales journalières par unité de surface représentent les moyennes pondérées par les superficies des unités géographiques. Les unités géographiques dans lesquelles il n'y a pas eu de déjections n'ont pas été prises en compte dans le calcul des moyennes. Les quantités moyennes journalières de déjections animales par unité de surface dans les unités géographiques sont de l'ordre de $212.4 \text{ g.MS.ha}^{-1}$ avec de fortes variations saisonnières et une plus grande concentration spatiale dans l'auréole 1 (Table 5-9, Figure 5-10).

Table 5-9 : Quantité de déjections annuelles journalières par terroir et par saison

Terroir	HV1	HV2	SS1	SS2	SS3	Toute saison
Nombre UG	431	436	446	448	473	524
Banizoumbou	176.0 ± 35.2	198.0 ± 36.2	258.7 ± 60.9	277.6 ± 91.0	244.0 ± 71.4	229.5 ± 27.8
Tchigo Tegui	157.7 ± 36.9	184.1 ± 52.5	239.7 ± 65.9	284.3 ± 68.2	274.7 ± 60.5	227.6 ± 25.8
Kodey	278.2 ± 77.3	285.3 ± 93.2	525.1 ± 174.3	337.3 ± 101.8	319.0 ± 98.6	349.3 ± 51.0
Hors terroir	26.2 ± 6.0	17.1 ± 4.9	18.9 ± 6.4	27.6 ± 9.4	36.0 ± 13.5	25.3 ± 4.0
Ensemble terroir	162.4 ± 21.8	175.4 ± 25.8	248.7 ± 41.7	245.4 ± 41.0	227.6 ± 35.1	212.4 ± 15.3

Unité : $\text{g.MS.ha}^{-1}.\text{jour}^{-1}$

Pour la comparaison multiple des moyennes, le test de Welch a été utilisé pour vérifier l'égalité des variances. L'hypothèse d'égalité des variances ne peut pas être rejetée dans les cas des terroirs ($F=2.5$, $p=0.08$ pour un $ddl=2$) et dans le cas des saisons ($F=1.9$, $p=0.09$ pour un $ddl=4$). La comparaison simple des données de terroirs, indique que les dépôts journaliers par unité de surface à Kodey sont supérieurs à ceux des deux autres terroirs. Le partitionnement récursif des quantités de déjections animales permet de distinguer ce premier niveau de différence marquée par la distinction nette entre Kodey et les deux autres terroirs (Annexe 5.7). A l'intérieur des deux groupes, le second niveau de partitionnement met en exergue la différence nette entre la première partie de la saison sèche et les autres saisons à Kodey avec respectivement 525 g.MS.ha^{-1} et 307 g.MS.ha^{-1} . En revanche, dans les autres terroirs, le deuxième niveau de partitionnement met en exergue les différences liées entre la saison des pluies et la saison sèche avec respectivement 178 g.MS.ha^{-1} et 263 g.MS.ha^{-1} . A la différence des tendances observées au niveau de l'ingestion, les dépôts de déjections animales sont plus stables après la première partie de la saison sèche. Les relations spatiales établies entre l'ingestion et l'excrétion dans les unités géographiques donnent un R^2 de 0.94. La distribution spatiale du R^2 indique cependant des spécificités dans les terroirs. Les ajustements sont meilleurs autour des localités à l'exception de Boudoun Warou situé aux abords des plateaux et dans une auréole située autour de Kodey (Figure 5-11).

Excrétion journalière moyenne dans les unités géographiques

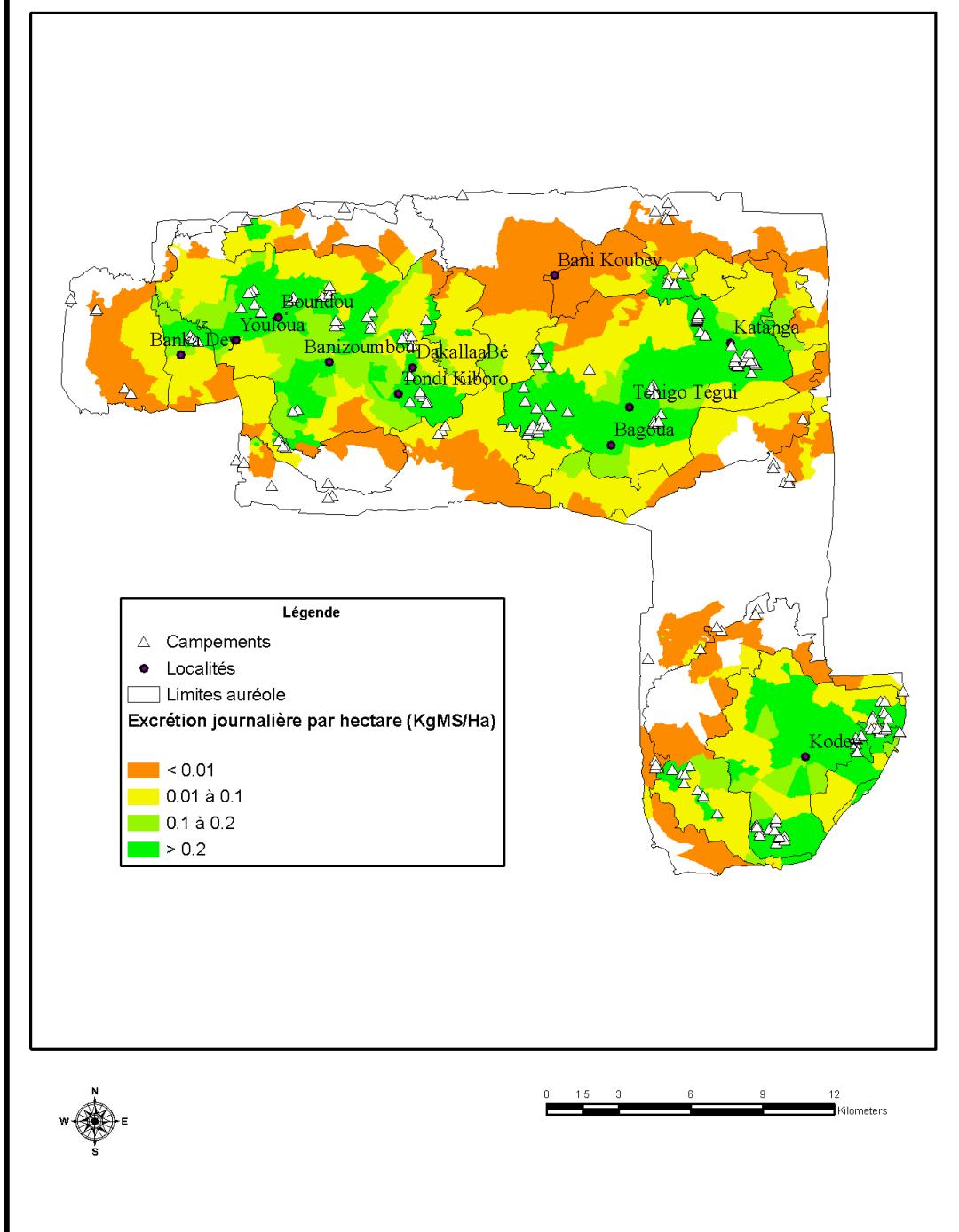


Figure 5-10 : Variabilité spatiale de l'excrétion journalière dans les unités géographiques

**Coefficient de détermination local (R^2)
de la prévision des excréptions par l'ingestion
par la régression des moindres carrés**

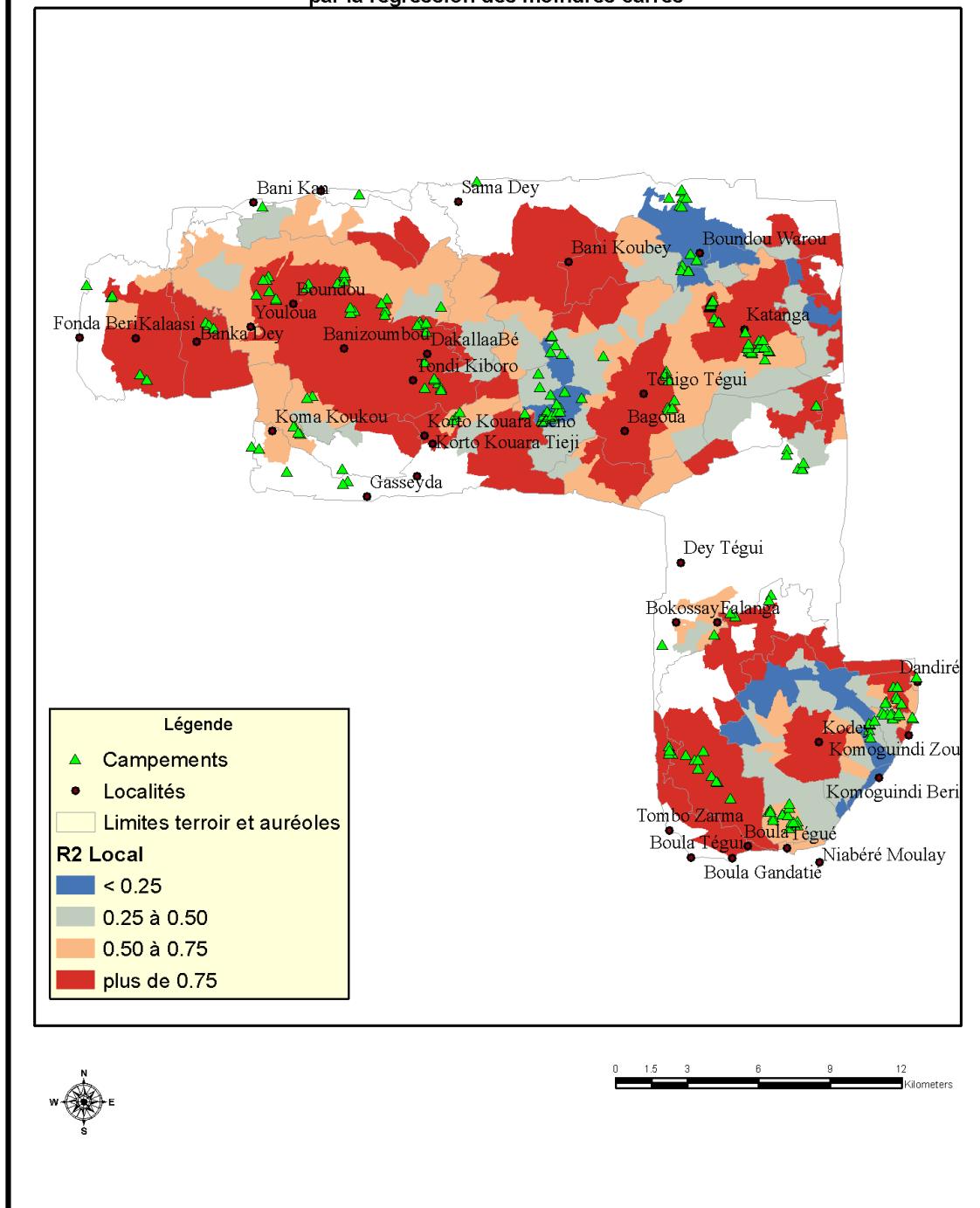


Figure 5-11 : Relation spatiale entre l'ingestion et l'excrétion dans les unités géographiques

5.3.4.3 L'excrétion dans les unités d'occupation des sols

Les paramètres d'excrétion par animal sont rapportés aux durées totales passées dans les parcours, les lieux d'abreuvement, de repos, les temps de parage. Selon les différentes périodes, les durées de séjour des animaux dans les occupations de sols sont liées surtout à la disponibilité de ressources. En hivernage, le bétail séjourne plus de 68% du temps dans les jachères et 15% du temps dans les sols incultivables (Table 5-10). En saison sèche, les zones de cultures sont privilégiées d'une part pour l'accès aux résidus de cultures et d'autre part pour les dépôts des déjections animales lors du repos nocturne.

Table 5-10 : Répartition du temps total de séjour des animaux par occupation des sols

	Sols incultivables	Jachères	Cultures	Cultures fumées	Friches
HV1	14%	68%	3%	1%	14%
HV2	16%	70%	1%	0%	13%
SS1	4%	19%	54%	19%	3%
SS2	3%	30%	45%	17%	4%
SS3	4%	35%	42%	14%	5%

La répartition annuelle des déjections fécales des animaux dans les occupations de sol diffère selon les terroirs et les occupations de sol ($\chi^2 = 226.6$ ddl = 10, $p < 10^{-4}$). Cette répartition indique que les cultures reçoivent environ 49% des déjections animales (cultures fumées ou non) et les parcours 51% (Figure 5-12). Dans les parcours, une grande partie des déjections animales sont sur les jachères. Les déjections animales déposées dans les cultures fumées pendant la pâture des résidus de récolte et au cours des autres activités représentent 16% du total (Table 5-11). Les différences existantes résident d'une part dans la concentration des déjections animales sur les jachères à Banizoumbou et Tchigo Tegui et dans les cultures à Kodey.

Table 5-11 : Quantités de déjections fécales des animaux par occupations des sols dans les terroirs

Terroir/occupation des sols	Cultures	Cultures fumées	Friches	Jachères	Sols incultivables	Zones habitées	Total
Banizoumbou	160	139	77	377	39	33	824
Tchigo Tegui	271	156	31	399	18	22	898
Kodey	385	98	43	189	14	17	747
Total	816	393	150	965	71	73	2468

Unité = tonnes de matière sèche

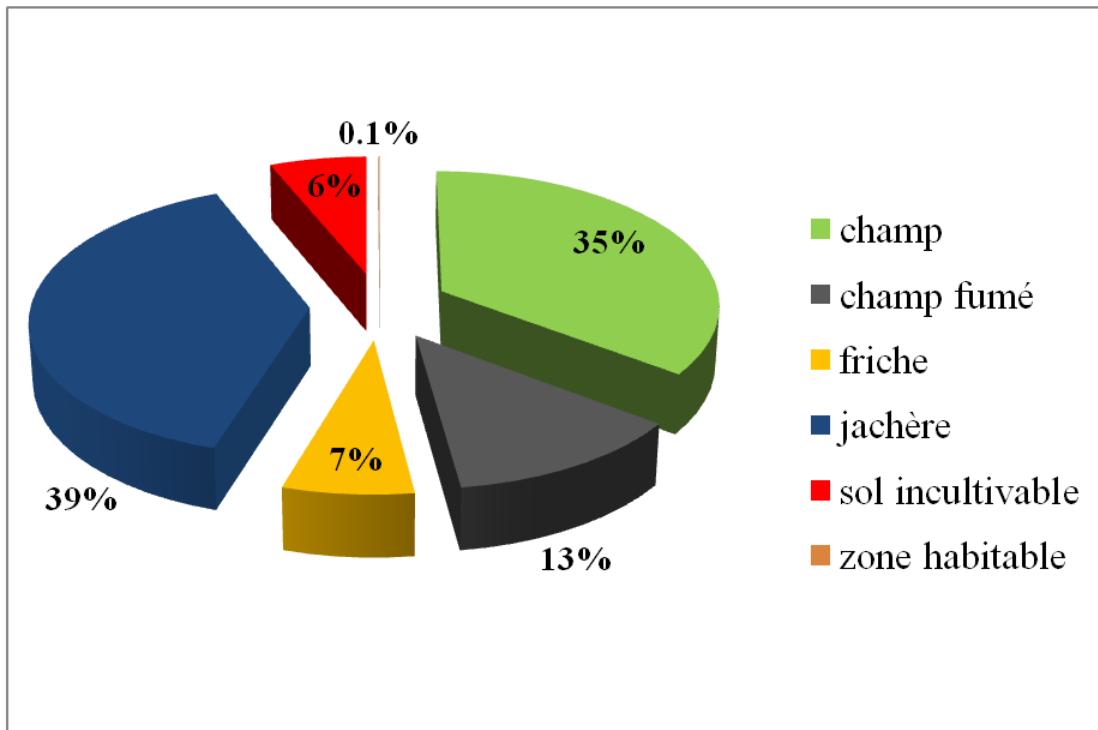


Figure 5-12 : Répartition des excréptions dans les catégories d'occupation des sols

La répartition saisonnière des déjections animales indique que 68 à 72% des déjections animales sont sur les jachères en hivernage. Des proportions similaires sont déposées durant les trois périodes de saison sèche sur les cultures. Cette répartition reste conforme aux disponibilités en ressources alimentaires du bétail au cours des différentes saisons. Les quantités totales annuelles de déjections animales par unité de surface dans les occupations de sols ont été calculées sur la base des quantités totales annuelles de toutes les unités cartographiques et la superficie par type d'occupation des sols et dans les auréoles. Les quantités journalières de déjections animales par unité de surface dans les occupations de sols sont en moyenne de $285 \pm 31 \text{ g.MS.ha}^{-1}$ (Table 5-12). Elles restent très variables entre les occupations de sol avec des gammes de valeurs pour les cultures et les jachères comprises entre 300 et 350 g.MS.ha^{-1} (Figure 5-13) et au cours des différentes saisons. Dans les cultures fumées, les quantités excrétées sont supérieures aux autres occupations de sol avec des valeurs de l'ordre de 510 g.MS.ha^{-1} . Les friches et les sols incultivables présentent les valeurs les plus faibles. Les plus grandes concentrations sont dans les zones habitées. Elles sont dues au repos nocturne. Les différences relevées dans les auréoles vont d'une échelle de 2 à 5.

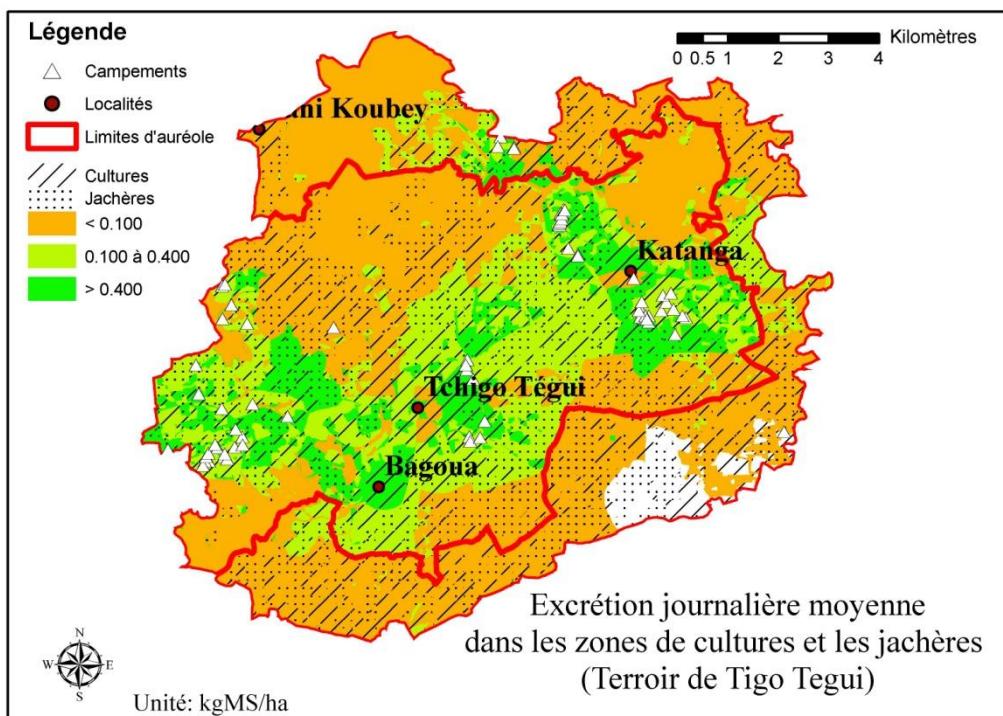


Figure 5-13 : Excrétion journalière dans les occupations de sols à Tchigo Tegui

Table 5-12 : Quantité journalière de déjections animales par terroir, saison et occupation des sols

Terroir	OS	HV1	HV2	SS1	SS2	SS3	moyenne
Banizoumbou	Cultures			530 ±88	576 ±76	433 ±77	511 ±69
	Pâturages	238 ±59	266 ±21	162 ±40	177 ±15	184 ±29	207 ±55
Tchigo Tegui	Cultures			488 ±95	526 ±90	368 ±28	345 ±59
	Pâturages	245 ±67	289 ±66	88 ±75	147 ±14	220 ±87	198 ±37
Kodey	Cultures	65 ±51		654 ±76	397 ±22	411 ±27	386 ±40
	Pâturages	784 ±101	970 ±156	244 ±60	219 ±37	179 ±32	451 ±37
Ensemble OS		210 ±54	347 ±65	313 ±56	297 ±81	278 ±76	285 ±31

Unité = g.MS. ha⁻¹

5.3.5 Le recyclage de la matière sèche

La restitution de matière sèche par les animaux d'élevage, les bovins, les ovins et les caprins est globalement de 42%. Cette proportion est respectivement de 39%, 44%, et 43% à Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey. Des variations importantes apparaissent entre les deux auréoles au sein des terroirs, notamment à Banizoumbou où l'on observe une forte disparité entre l'auréole A et B avec respectivement 46% et 38%, et à Tchigo Tegui avec respectivement 46% et 30%. Les différences observées dans les auréoles de Kodey, de l'ordre de 2%, restent les plus faibles (Table 5-13). Dans les occupations de sol, ce rapport est de 68% dans les cultures fumées, 38% à 40% dans les autres types d'occupation de sol. Les valeurs les plus élevées sont relevées dans les zones habitables et plus particulièrement dans les campements où le bétail passe la nuit (Figure 5-14).

Table 5-13 : Taux de recyclage de la matière sèche dans les occupations de sols par terroir

		cultures	cultures fumées	Friches	Jachères	Sols incultivables	Zones habitées
Banizoumbou	1A	42%	60%	40%	33%	26%	104%
	1B	49%	97%	43%	35%	30%	220%
	All	42%	64%	40%	33%	27%	124%
Tchigo Tegui	2A	41%	68%	32%	44%	34%	171%
	2B	29%	48%	21%	28%	20%	160%
	All	40%	66%	30%	42%	31%	170%
Kodey	3A	38%	83%	47%	40%	30%	304%
	3B	38%	57%	60%	39%	44%	ND
	All	38%	76%	49%	40%	30%	304%
All		39%	68%	40%	38%	29%	160%

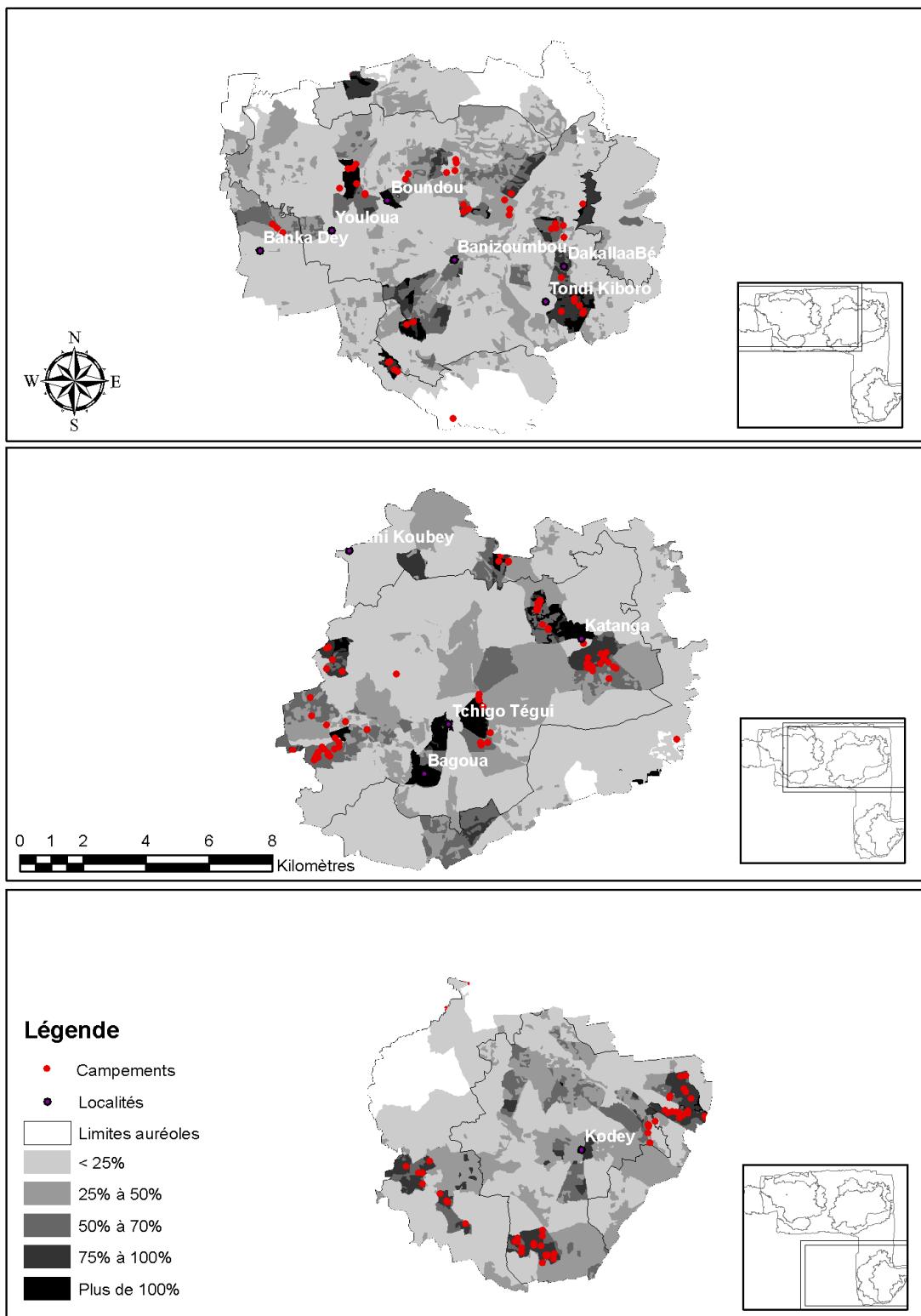


Figure 5-14 : Taux de recyclage de la matière sèche dans les trois terroirs

5.3.6 Le recyclage des éléments minéraux

Les quantités totales d'éléments minéraux ingérées se sont élevées respectivement pour l'azote, le phosphore et le potassium à 96, 7, et 78 Tonnes dans les trois terroirs et les quantités de fèces excrétées de l'ordre de 39, 6 et 32 tonnes (Table 5-14). Le recyclage des éléments minéraux par le bétail est de l'ordre de 40%, 87% et 42% pour l'azote, le phosphore et le potassium. A l'exception du potassium où le taux de recyclage reste le même pour les trois terroirs, les taux de recyclage de l'azote et du phosphore à Kodey et Tchigo Tegui sont supérieurs à celui de Banizoumbou. Les quantités d'éléments minéraux prélevées par unité de surface ont été plus élevées à Tchigo Tegui que dans les deux autres terroirs, de même que les quantités recyclées (Table 5-15). La répartition des quantités d'éléments minéraux dans les deux auréoles est de l'ordre de 85% et 15%. Ces proportions varient entre les trois terroirs. Les valeurs moyennes sont respectées pour le terroir de Banizoumbou. En revanche, à Tchigo Tegui, les quantités excrétées dans la deuxième auréole ne représentent que 10%. A Kodey, ces proportions sont supérieures à celles des deux autres terroirs. Les quantités excrétées dans l'auréole 2 représentent 21% et les quantités ingérées 19 à 25% selon l'élément minéral.

Table 5-14 : Flux totaux d'éléments minéraux par terroir (unités = tonne)

Terroir	Ingestion			Excrétion fécale		
	N	P	K	N	P	K
Banizoumbou	36	3	26	13	2	11
Tchigo Tegui	33	2	27	14	2	12
Kodey	27	2	24	12	2	10
Total (T.MS)	96	7	78	39	6	32

Table 5-15 : Flux d'éléments minéraux par unité de surface dans les trois terroirs

Terroir	Ingestion			Excrétion fécale			Recyclage		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Banizoumbou	3.0	0.2	2.2	1.1	0.2	0.9	36%	77%	41%
Tchigo Tegui	4.8	0.4	3.9	2.0	0.3	1.7	43%	91%	43%
Kodey	2.4	0.2	2.2	1.1	0.2	0.9	43%	94%	41%
All	3.2	0.2	2.6	1.3	0.2	1.1	40%	87%	42%

(unité=kg/ha)

Dans les différentes catégories d'occupation de sol, les stocks d'éléments minéraux, azote et phosphore, ingérés par les animaux proviennent essentiellement des jachères (56%) et des résidus des cultures (21%). Dans le cas du potassium, les résidus de culture constituent la première source (47%) après les jachères (33%). Les restitutions par les déjections vont d'abord aux cultures et cultures fumées (49%) et aux jachères (39%) (Figure 5-15). La

répartition par unité de surface met en relief des prélèvements élevés d'azote dans les jachères et dans les zones habitées de l'ordre de 5.1 à 27.9 kg. ha⁻¹ (Figure 5-16). Les restitutions dans les cultures fumées atteignent 2.3 kg.N.ha⁻¹(Table 5-16).

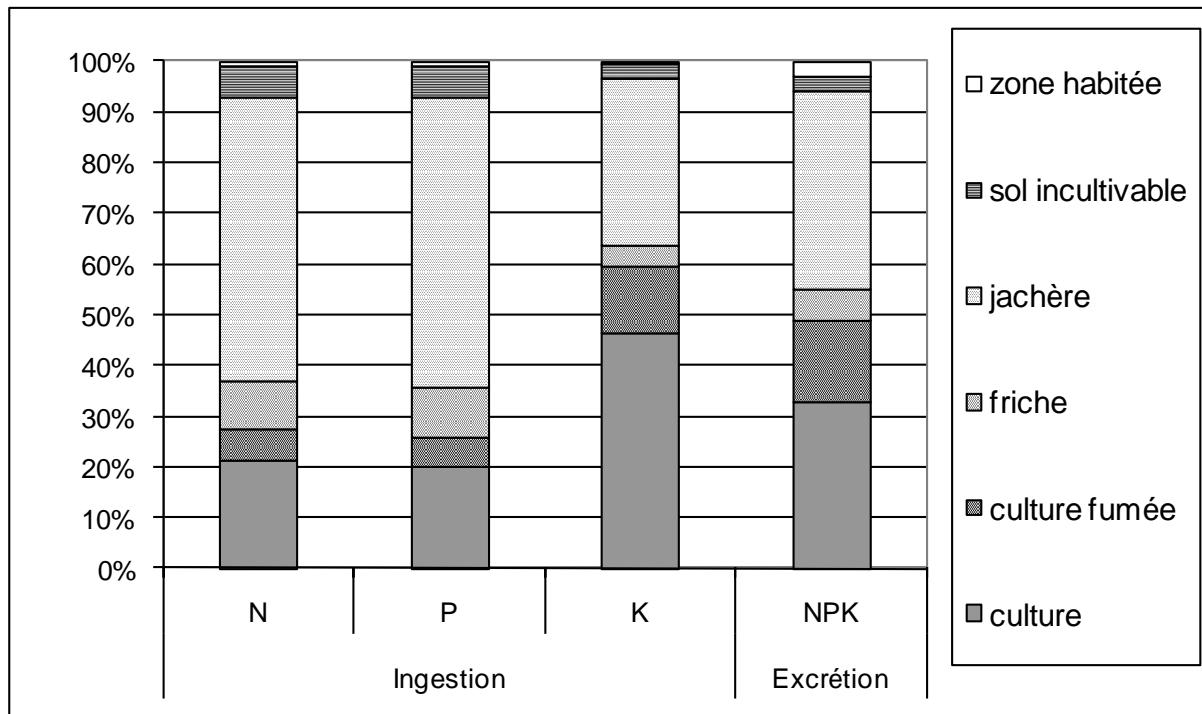


Figure 5-15 : Répartition du N, P, K excrété dans les occupations de sol

Table 5-16 : Flux de N, P, K par unité de surface dans les occupations de sol (unité=kg.ha⁻¹)

Terroir	Ingestion			Excrétion fécale		
	N	P	K	N	P	K
Culture	2.4	0.2	4.1	1.5	0.2	1.2
Culture fumée	2.1	0.1	3.8	2.3	0.4	1.9
Friche	2.2	0.2	0.7	0.6	0.1	0.5
Jachère	5.1	0.4	2.4	1.4	0.2	1.2
Sol incultivable	1.5	0.1	0.5	0.3	0.0	0.2
Zone habitable	27.9	2.1	12.9	33.2	5.3	27.8
Ensemble	3.2	0.2	2.6	1.3	0.2	1.1

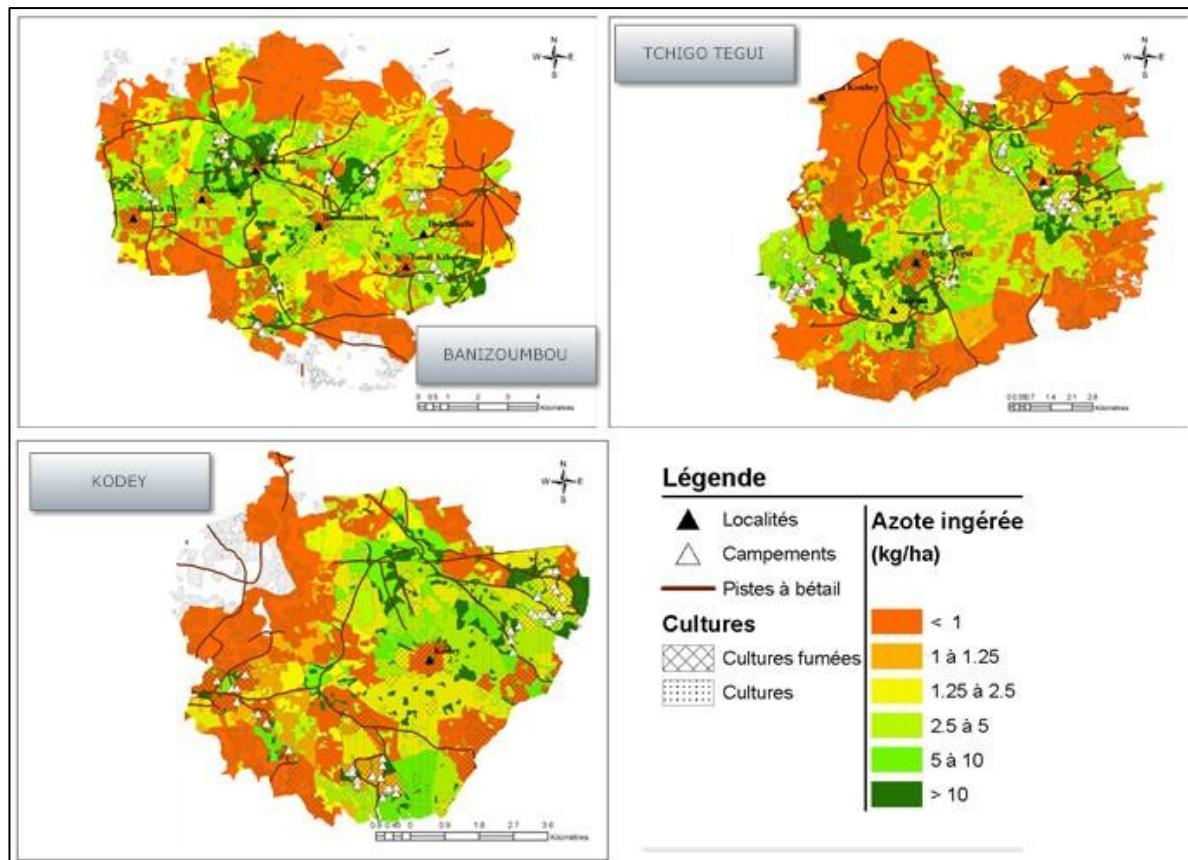


Figure 5-16 : Azote ingéré dans les unités d’occupation de sols

Le test d’homogénéité sur la distribution des éléments minéraux ingérés et excrétés dans les occupations de sols au sein des terroirs sont tous significatifs au seuil $\alpha = 0.05$ avec $ddl=10$ (trois terroirs et six types d’occupation des sols). Les caractéristiques de ces différences sont les suivantes :

- ✓ Pour l’azote et le phosphore, plus de la moitié des quantités ingérées proviennent des jachères à Banizoumbou et Tchigo Tegui. A Kodey, les quantités proviennent de cultures et des jachères. La contribution des cultures présente un gradient entre les trois terroirs avec respectivement 10%, 21% et 38% pour Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey ;
- ✓ Pour le potassium, la contribution des cultures est plus importante à Kodey et Tchigo Tegui et atteint 72% pour les cultures. A Banizoumbou, les jachères en représentent la première source.
- ✓ Au niveau des quantités excrétées, environ 45% sont recyclées dans les jachères à Banizoumbou et Tchigo Tegui et seulement 25% à Kodey. Les

déjections sont surtout effectuées dans les cultures (Figure 5-17, Figure 5-18, Figure 5-19).

La comparaison des moyennes des quantités ingérées et excrétées par unité de surface des différentes unités cartographiques (les zones habitables et les unités avec des valeurs nulles ont été soustraites de cette analyse) indique des différences hautement significatives entre terroirs, entre occupations des sols dans l'auréole 1 (Table 5-17). L'interaction terroir et occupation des sols révèle l'existence de spécificités liées à certaines occupations de sols dans les terroirs. Ces particularités ressortent en faisant l'analyse des contrastes des cultures selon les terroirs ($F= 295,7$ et $p < 0.001$ pour $ddl= (3619/4)$) et des jachères ($F=72.7$, $p< 0.002$). Cette analyse fait apparaître un niveau plus élevé de contribution des cultures à l'azote et au phosphore à Kodey que dans les autres terroirs. De même, la contribution des jachères pour les mêmes éléments minéraux à Tchigo Tegui est mise en évidence. Les différences entre les cultures fumées des trois terroirs ne sont pas significatives ($F =0.32$, $p=0.6$ avec un coefficient de contrastes pour Banizoumbou et Tchigo Tegui de 0.5 chacun et de -1 pour Kodey). Les friches apparaissent différentes ($F=4.7$ et $p =0.03$), de même que les zones incultivables ($F=11.4$ et $p =0.0007$).

Les résultats des comparaisons de moyennes dans l'auréole 2 sont différents de ceux de l'auréole1. Pour l'azote et le phosphore, il n'y a pas de différence significative entre les terroirs. L'omission par la suite de l'effet terroir et de l'interaction met en évidence dans l'auréole 2 des différences significatives entre toutes les occupations de sol à l'exception des cultures fumées ($t=-1.57$ et $p=0.1162.$) pour l'ingestion d'azote et de phosphore (Table 5-18) De même, il n'y pas de différence significative entre les jachères ($t=-0.04$, $p =0.9$) pour ce qui est des excréptions. Dans cette auréole, les résultats sont partiels.

Table 5-17 : Résultats de l'analyse de variance des excréptions fécales par unité de surface dans les terroirs et les occupations de sol.

			Azote		Phosphore		Potassium		NPK (excrétion)	
	Source	DF	F	p	F	p	F	P	F	p
Auréole 1	interaction	8	53.3	<.0001	53.0	<.0001	73.5	<.0001	38.4	<.0001
	Terroir	2	26.3	<.0001	26.1	<.0001	18.7	<.0001	22.9	<.0001
	Occupation des sols	4	100.6	<.0001	110.4	<.0001	90.3	<.0001	33.3	<.0001
Auréole 2	interaction	8	23.0	<.0001	22.1	<.0001	22.6	<.0001	9.4	<.0001
	Terroir	2	0.1	0.8962	0.0	0.9727	10.2	<.0001	6.0	0.0026
	Occupation des sols	4	16.8	<.0001	18.2	<.0001	27.6	<.0001	7.9	<.0001

Table 5-18 : Analyse de variance par modèle généralisé des excréctions dans l'auréole 2

Termes	Paramètres modèle	Erreurs standard	t Ratio	p
Ordonnée à l'origine	19644.951	1219.56	16.11	<.0001
Cultures	5088.0302	1970.202	2.58	0.0099
Cultures fumées	-4934.806	3140.273	-1.57	0.1162
Friches	-15657.03	2583.496	-6.06	<.0001
Jachères	15190.425	1903.922	7.98	<.0001

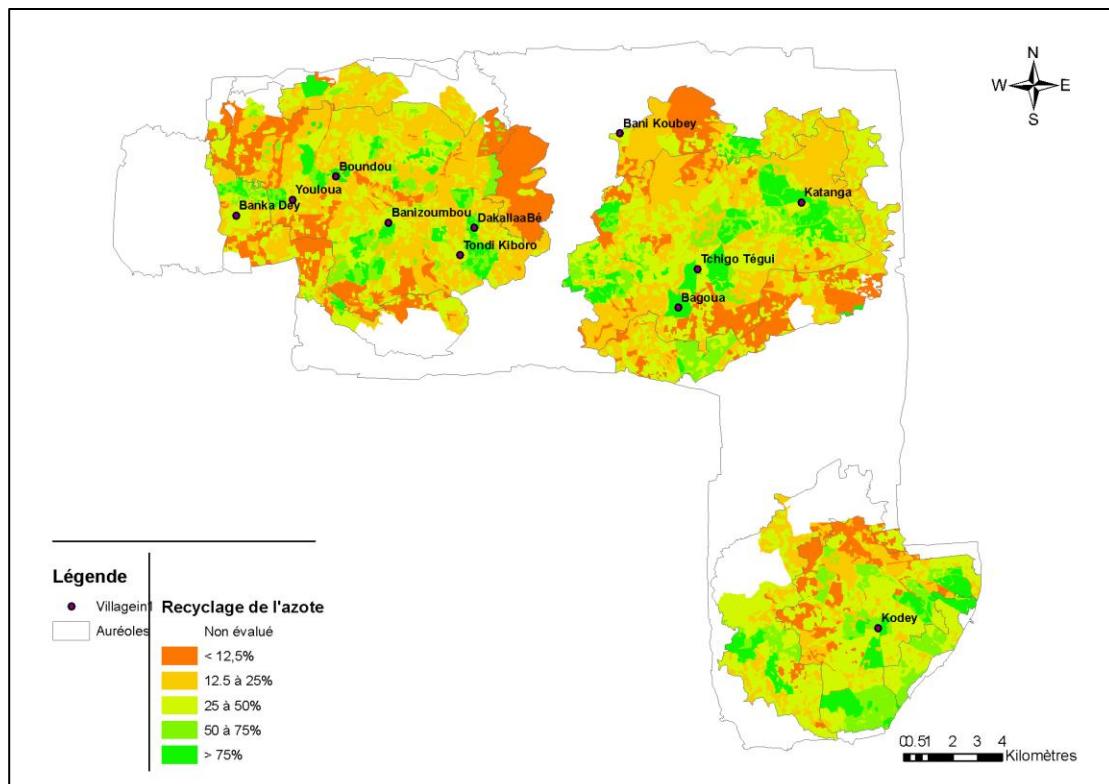


Figure 5-17 : recyclage de l'azote par le cheptel

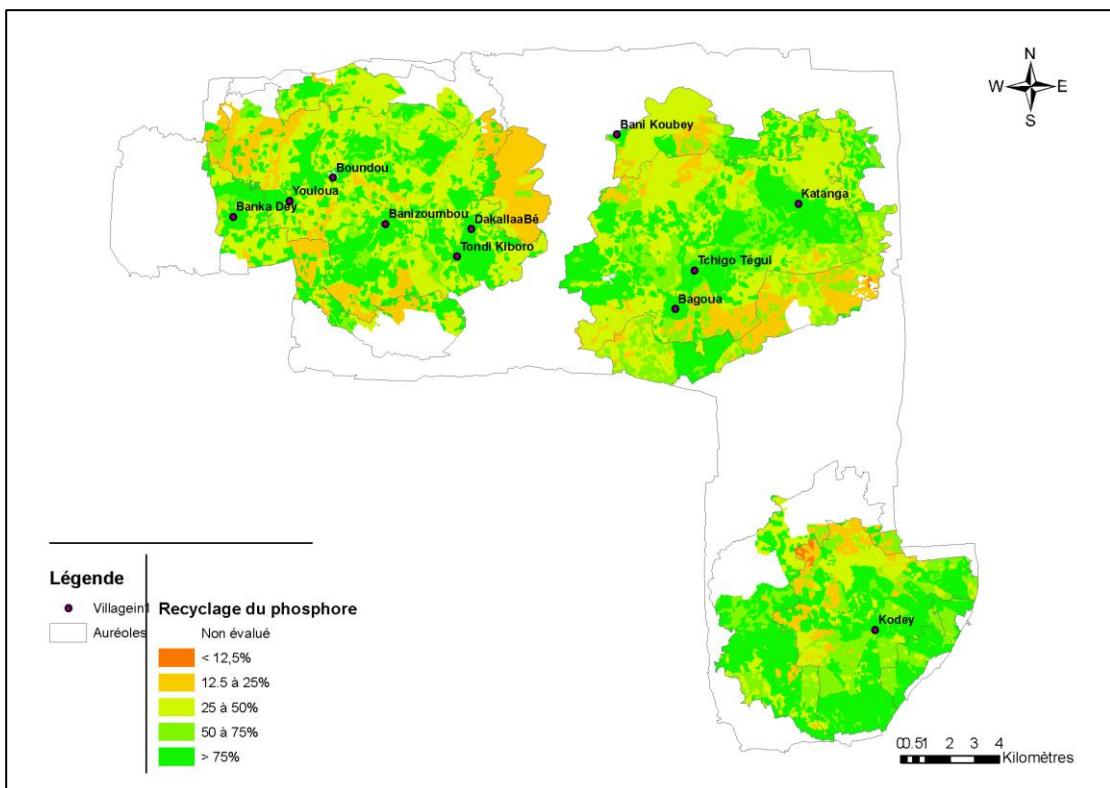


Figure 5-18 : Recyclage du phosphore par le cheptel

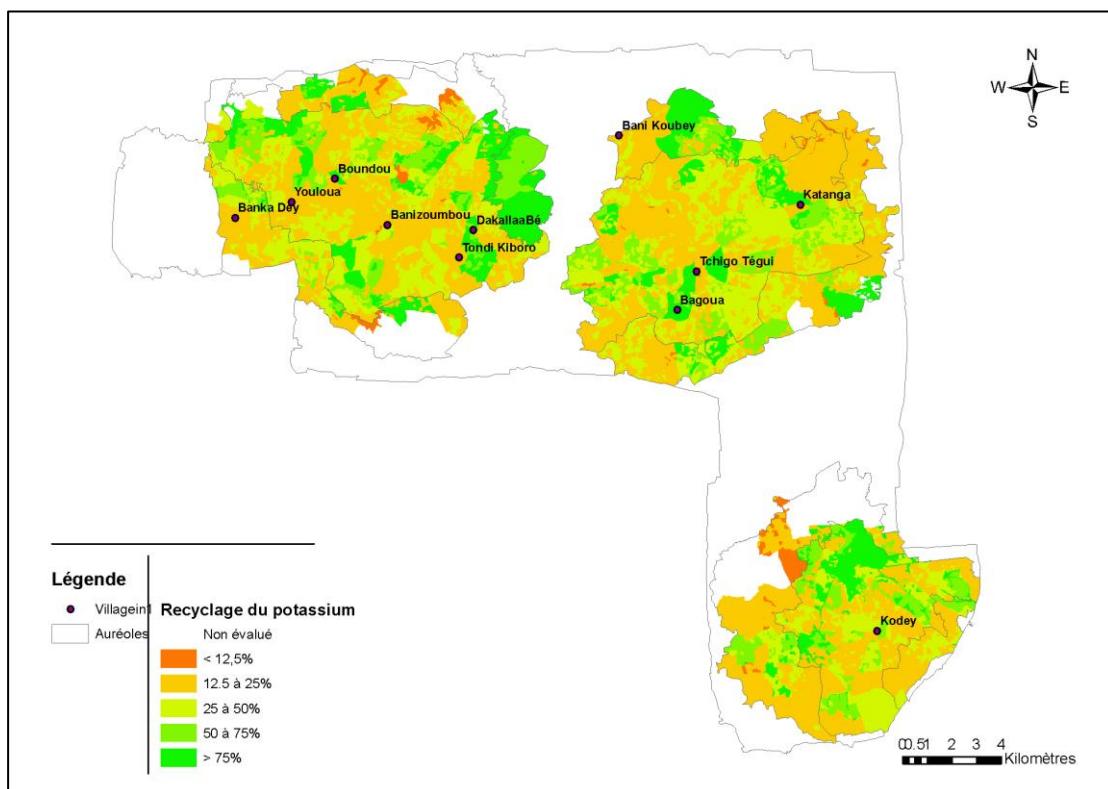


Figure 5-19 : Recyclage du potassium par le cheptel

5.4 Discussion

Dans les agroécosystèmes gérés par des systèmes mixtes culture-élevage avec des périodes de transhumance, l'accès à l'alimentation au cours d'un cycle annuel est assuré par les parcours non éloignés des habitations. Les modes de conduite des troupeaux (gardiennage, pâture libre, au piquet) qui constituent un facteur important dans la gestion des ressources (Turner, 1999a) ont été pris en compte dans les enquêtes sur les itinéraires des troupeaux. Ces modes de conduite qui constituent un facteur prépondérant dans la dynamique spatio-temporelle du cheptel influent sur l'utilisation des parcours au cours des différentes saisons. Pour les non gestionnaires dont les troupeaux n'ont pas fait l'objet de suivi, les paramètres utilisés dans NUTPAST pour le calcul des charges et des flux se basent sur les statistiques observées chez des gestionnaires ayant le même mode de conduite. Le mode de conduite en élevage villageois (les non gestionnaires ici) est basé essentiellement sur la pâture dans les terres du propriétaire.

Les charges moyennes calculées sur les terroirs, en moyenne de 16 ha.UBT^{-1} ou 6.3 UBT.km^{-2} varient entre les terroirs en fonction de l'occupation des sols avec un rapport de 1 à 2 pour Banizoumbou et Kodey qui ont respectivement un pourcentage de terres cultivées de 24% et de 66% et des superficies de jachères de 60% et 29%. Ces charges très variables selon les saisons restent inférieures à celles observées dans le terroir de Ticko situé plus au sud des terroirs de Fakara (Schlecht, Hiernaux *et al.*, 2004) et à celles relevées par Achard (2003b) à Chikal au nord de l'ordre de 24 UBT.km^{-2} . Les écarts de charge entre les trois terroirs sont surtout liés à l'effectif du cheptel et à la disponibilité de pâturage en saison des pluies. Cette pression élevée du cheptel s'observe dans toutes les régions confrontées à une augmentation du cheptel jointe à une augmentation des superficies cultivées (Breman, Groot *et al.*, 2001).

En saison des pluies, le rôle de la jachère devient prépondérant dans l'alimentation du bétail et cette pression s'accompagne dans certains cas d'une surcharge qui modifie la flore des jachères vers une plus grande population de légumineuses et d'herbacées à cycle court (Achard, Pierre *et al.*, 2001). En saison sèche, les résidus de récolte prennent le relais des jachères dans l'alimentation du bétail. Ce changement n'exclut pas une contribution élevée des jachères dans l'alimentation des animaux dans les zones à forte pression pastorale (cas de Kodey). Face à la réduction des superficies des jachères dans ces systèmes agraires, le risque nutritionnel auquel peut être exposé les animaux, peut être élevé. En effet, plusieurs auteurs

(Loireau, 1998, de Rouw, 2004) montrent que de fortes diminutions des jachères ont lieu depuis les années 50. Dans la région d'étude, Bielders, Rajot *et al.* (2004) rapportent que l'emprise des cultures est passée de 12% à 71% en l'espace d'un demi-siècle. La simulation statistique des taux d'occupation des sols de 1974 à 2004 réalisé dans cette étude sur la base des cartes d'occupation des sols existantes dans la zone d'étude indique que seulement 10% des terres seraient en jachère en 2025. Une telle tendance est préjudiciable au cheptel et peut entraîner des migrations des éleveurs comme ils l'ont toujours fait (Turner, 2009) ou une conversion à l'agriculture suite à la réduction des effectifs du cheptel (Mortimore et Turner, 2005).

Les différences observées dans les quantités ingérées par unité de surface au sein des auréoles sont essentiellement liées à l'intensité de culture. En effet, l'intensité de culture de l'auréole située à proximité des villages entraîne une plus grande présence des troupeaux à l'ouverture des champs. De même, l'accès aux champs est prioritaire par le bétail des propriétaires de ces champs avant que l'accès soit ouvert (Bodé, 2004). Les tendances saisonnières sont surtout marquées par l'évolution des effectifs dans les trois terroirs. En effet, dans ces systèmes culture-élevage, la transhumance est toujours de règle en hivernage où les espaces de pâture sont réduits (Ayantunde, Fernández-Rivera *et al.*, 2008). Les éleveurs transhument dans des régions moins cultivées pour disposer d'herbe fraîche d'hivernage et aussi de compléments minéraux comme dans le cas des cures salées fréquentées dans le Nord du Niger. Dans le Fakara, la transhumance d'hivernage se fait dans le nord ou dans des zones très proches de la région. Ces transhumances sont surtout pratiquées par les éleveurs de Kodey (Fernández-Rivera, Hiernaux *et al.*, 2005). Turner, Hiernaux *et al.*, (2002) relèvent que la transhumance concerne respectivement 38%, 77% et 90% des gestionnaires de Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey. Ces transhumances constituaient une stratégie d'optimisation de l'utilisation des parcours et de gestion des zones pastorales (Thébaud et Batterbury, 2001).

Les prélèvements de masse végétale restent faibles dans l'ensemble des trois terroirs avec seulement le quart des masses disponibles ingérées si l'on tient compte des ligneux et le tiers sans le feuillage des ligneux (Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.*, 1997). Ces niveaux de prélèvement sont identiques à ceux trouvés par Manlay, Ickowicz *et al.*, (2004) au Sénégal qui sont de l'ordre de 29%. Lorsque la pression agricole est forte comme à Kodey, les prélèvements dans les jachères sont élevés. En considérant la production totale avec la part de

masse appétible, les prélèvements du bétail seraient de l'ordre de 10% à 15% des masses végétales produites annuellement. Ce niveau de prélèvement très faible s'explique par la forte variabilité des teneurs en éléments nutritifs. Les teneurs en éléments nutritifs des parcours en saison sèche sont insuffisants pour assurer les besoins d'entretien du cheptel. Leur consommation entraîne une dégradation de l'état physiologique du bétail. Dans ces systèmes agraires, plus que le besoin en fourrage, la faible qualité nutritive du fourrage est la contrainte de l'élevage (Penning de Vries et Van Keulen, 1982; Powell, Pearson *et al.*, 2004).

Si l'on ne tient compte que des excréptions fécales, Le recyclage de la matière sèche par le bétail serait de l'ordre de 42% dans les terroirs du Fakara. , 40% d'azote, 87% de phosphore et 42% de potassium. Dans le cas de l'azote et du potassium, il pourrait être plus élevé si l'on tient compte de l'azote urinaire (Schlecht, Hiernaux *et al.*, 2004). Ce recyclage reste très variable dans l'espace. Toutes les zones pâturées reçoivent les déjections animales avec une concentration plus forte dans les lieux où séjournent davantage le bétail, champs fumés, les cultures et les jachères. Dans ce chapitre, la collecte et l'application de fumier dans les champs qui relèvent de la stratégie de l'exploitation agricole n'a pas été prise en compte. En effet, une partie des fortes quantités d'excrétion déposées dans les zones d'habitation desquelles une partie du bétail passe la nuit est utilisée pour la fumure des champs.

Les flux par unité de surface au niveau de l'ingestion dans les trois terroirs sont respectivement pour l'azote, le phosphore et le potassium de 3.2 kg/ha, 0.2 kg/ha et 2.6 kg/ha et les excréptions fécales de l'ordre de 1.3 kg/ha, 0.2 kg/ha et 1.1 kg/ha. Ces quantités restent inférieures aux valeurs trouvées par Manlay (2000) dans les auréoles de savane et de brousse au Sénégal. Ce recyclage, même s'il est faible, reste une des contributions fortes de l'élevage et des productions animales à l'entretien de la fertilité de l'espace villageois (zones de culture et jachères).

5.5 Conclusion partielle

Le caractère extensif de l'élevage dans les systèmes culture-élevage marqué par une mobilité saisonnière contribue à la distribution spatiale des prélevements et des restitutions de matière sèche et d'éléments minéraux dans l'espace villageois. Cette distribution dépend essentiellement de la disponibilité fourragère dans les zones cultivées et de la conduite du cheptel par les éleveurs, en particulier du choix des sites de repos diurne et nocturne (pratique de parcage). La quantification de l'ingestion et de l'excrétion dans l'espace villageois aux échelles spatiales de gestion des ressources naturelles a été réalisée grâce aux informations issues d'un suivi des itinéraires du bétail couplé à un inventaire exhaustif du cheptel. Cette méthode permet ainsi de mieux prendre en compte la spatialité de l'ingestion et de l'excrétion à l'échelle des unités d'occupation de sols et permet de disposer d'un plan d'analyse spatial du rôle de l'élevage dans le recyclage du bétail à l'échelle du terroir villageois et au niveau des unités d'occupation des sols. La quantification précise des flux liés à l'élevage dans les systèmes communautaires des quantités de matière sèche et d'éléments minéraux liés à l'élevage permet ainsi de disposer de valeurs quantifiées du rôle de l'élevage par unité de surface dans un terroir aux fins de couplage à d'autres quantifications pilotées par le système comme le parcage, les cultures et autres activités liées aux flux organiques et d'éléments minéraux dans l'exploitation agricole.

Les prélevements de matière sèche par les animaux domestiques sont très en deçà des disponibilités fourragères et restent marqués par des pressions très fortes en saison des pluies sur les jachères et en saison sèche sur les zones cultivées. Le transfert d'éléments nutritifs qui s'en suit, aussi bien dans les zones de pâturage que dans les zones cultivées peut constituer une des sources de la durabilité de ces systèmes s'il est associé à une gestion de la fertilité des sols et des parcours. Dans ces conditions de gestion, l'augmentation de la productivité des systèmes culture-élevage dont l'évaluation des flux fera l'objet du chapitre suivant, peut être envisagée.

Partie 2 : Evaluation des bilans partiels, et des indicateurs de risque d'épuisement de la fertilité des sols

6 Evaluation des flux biogéochimiques et bilans partiels des exploitations agropastorales

6.1 Introduction

6.1.1 Historique des bilans d'éléments minéraux en ASS

Selon Breman et de Ridder (1993), « *la disponibilité en éléments nutritifs pour la végétation, en l'absence d'apports artificiels, est définie comme étant la fertilité naturelle du sol* ». La quantification des bilans d'éléments nutritifs permet un diagnostic du fonctionnement de l'écosystème à travers le solde des entrées et des sorties organiques et minérales à différentes échelles spatiales et temporelles (Pieri, 1989). L'un des outils les plus utilisés aujourd'hui par les différentes disciplines agronomiques qui participent à la gestion des ressources naturelles pour la durabilité des agroécosystèmes est le bilan de la matière organique et des principaux éléments nutritifs essentiellement les macro-éléments N, P, K. L'origine des bilans de ressources dans les sciences agronomiques date des années 1830 à travers les expérimentations de Boussingault²⁹ (Scoones et Toulmin, 1998). Ces bilans ont servi à évaluer l'effet des apports de fertilisants primaires sur les cultures. A partir des sécheresses des années 1970 et 1980, les travaux du Programme Productivité au Sahel (P.P.S) montrent le rôle des éléments minéraux dans la productivité des pâturages, en liant la qualité du fourrage au taux d'azote et de phosphore du sol (Penning de Vries et Djitéye, 1982). Ces travaux ont montré que la productivité des cultures et des pâturages est limitée par la pauvreté des sols en matière organique, azote et phosphore. Les conclusions de ces études ont permis de proposer de nombreuses pistes pour le développement agricole du Sahel (Breman et de Wit, 1983). Dans son bilan de 30 ans de recherche et de développement agricole au Sud du Sahara, Pieri (1989) a montré l'importance des bilans organiques et minéraux dans la définition des processus d'évolution de la fertilité des sols aux échelles de la plante, du sol et des systèmes de culture. Les conclusions auxquelles il est parvenu posent le problème du maintien de la fertilité des sols cultivés dans les zones de savane au sud du Sahara. Il propose alors des recherches approfondies sur les bases agronomiques de l'entretien et de la fertilité des sols.

²⁹ Jean-Baptiste Joseph Dieudonné Boussingault (1802-1887) est le fondateur de la chimie agricole moderne (http://fr.wikipedia.org/wiki/Jean-Baptiste_Boussingault)

A défaut de pouvoir maintenir la fertilité, les sols s'appauvrisent en éléments nutritifs et une meilleure connaissance de ce processus contribue à mieux comprendre l'état et le processus de la dégradation des sols. Certaines causes de cette dégradation ont été identifiées telles que l'érosion et le déficit de bilan organique des sols cultivés. La mobilisation de la communauté internationale après les sécheresses, a amené l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) à proposer une évaluation du niveau d'épuisement des sols de l'Afrique Sub Saharienne (ASS). Cette étude commanditée par le département eau et sol de la FAO en collaboration avec l'Université Agronomique de Wageningen en 1990, aborde la fertilité des sols africains en partant d'une étude prospective sur deux années dont 1983 et 2000. Les bilans des éléments minéraux azote, phosphore et potassium (N, P, K) sont établis à l'échelle continentale à l'aide d'une méthodologie basée sur cinq flux entrants et sortants dans la couche arable du sol (Figure 6-1)

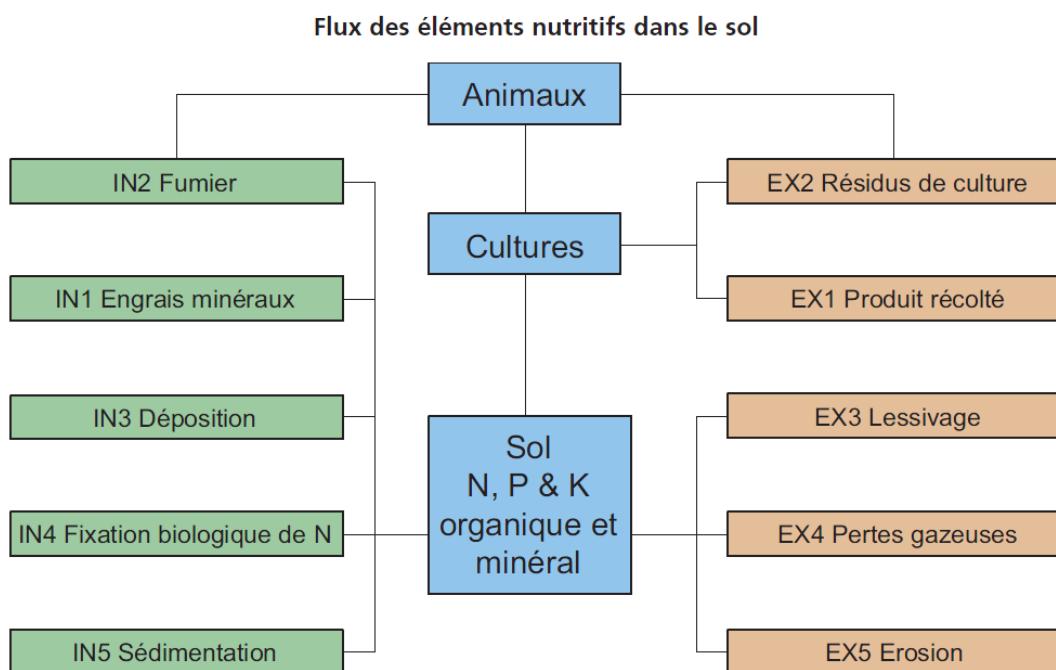


Figure 6-1 : Les 5 flux entrants et sortants de la méthodologie des bilans de la FAO (Source : Roy, Misra *et al.*, 2003) IN_i représente un flux en entrée et EX_i représente un flux en sortie avec i= 1 à 5

Le bilan sur l'ensemble des flux est appelé bilan global et le bilan de gestion des flux reprenant les indices 1 et 2 est appelé bilan partiel. Les macroéléments N, P, K sont les plus étudiés de par leur importance pour la croissance des plantes. Le déficit en ces éléments, des sols de l'ASS (Bationo, Lombo *et al.*, 1998), plus particulièrement en N et P est aussi un des critères qui justifient leur évaluation. Les bilans négatifs issus de cette étude démontrent la pauvreté des sols et la nécessité d'une gestion intégrée de leur fertilité, qui mette en jeu

l'ensemble des processus contribuant aux flux entrants et sortants de matières organiques et éléments minéraux. Au Niger, le bilan global moyen était en 1983 d'environ -16 kg/ha N , -2 kg/ha, -11 kg/ha pour N,P,K (Stoorvogel et Smaling, 1990b; Stoorvogel, Smaling *et al.*, 1993a -Volume 1, Page 81)³⁰. Cette étude a largement contribué à la diffusion de la méthodologie du bilan des éléments minéraux à l'échelle du pays et sur un cycle annuel. A d'autres échelles, plante, animal, parcelle, exploitation agricole, terroir et district, les flux et bilans de matières organiques et de minéraux, partiels ou globaux ont été évalués à travers plusieurs pays (Table 6-1FAO, 2004FAO, 2004FAO, 2004). Les buts visés portent sur l'appui des interventions politiques et des actions de gestion de la fertilité des sols. Les méthodologies de calcul des bilans ont évolué mais n'échappent pas aux difficultés de changement d'échelle et d'intégration des techniques de modélisation (Scoones et Toulmin, 1999; Hieriaux et Schlecht, 2003; Ferge et Magid, 2004).

6.1.2 Typologie des bilans d'éléments nutritifs

Dans un souci d'harmonisation des méthodes, la FAO a réalisé une synthèse des approches et des méthodologies des bilans en 2003 (Roy, Misra *et al.*, 2003). Cette étude a établi une typologie des méthodes selon les échelles géographiques et/ou fonctionnelles des bilans. Trois échelles qui correspondent aux entités géographiques d'évaluation des bilans ont été retenues :

- le niveau macro pour l'échelle mondiale, continentale et nationale,
- le niveau méso pour les zonages agro-écologique, provincial et régional,
- le niveau micro pour l'exploitation agricole ou le village.

Cette classification vise essentiellement les échelles géographiques de gestion et de décision en matière de fertilité des sols. Elle n'indique cependant pas le niveau de conceptualisation mis en œuvre dans l'évaluation des bilans. En effet, l'évaluation des bilans des agroécosystèmes, eu égard à la complexité des échelles spatio-temporelles en jeu dans les processus qui régissent la dynamique des éléments minéraux dans le sol, nécessite l'utilisation d'hypothèses pour mieux représenter la réalité, extrapoler les connaissances et se faire une idée de situations qui prévalent dans d'autres contextes (Breman, 1993).

³⁰ Les bilans dans ce rapport sont donnés en N, P₂O₅ (pentoxyde de phosphore) et K₂O (oxyde de potassium) soit respectivement -16, -5 et -13 kg/ha.

Table 6-1 : Quelques études de bilans des éléments minéraux conduits en Afrique entre 1993 et 2004

Explication de la colonne Echelle (D= District, N=National, E=Exploitation , V=Village, P= Parcille)
 ++ plusieurs localités sont concernées

Auteur	année	Minéraux	Latitude	Longitude	Localité	Pays	Type Bilan	Type de culture	Méthode	Echelle
Smaling et al. (1993)	1993	N,P,K	0°45'S	34°50'E	Kisii	Kenya	Globam	Polyculture	Stoorvogel	D
Stoorvogel et al. (1993)	1993	N,P,K			-				Stoorvogel	N
Hartemink (1994)	1994	N,P,K	-5.07	39.1	Bamba Estate	Tanzanie	Global	Sisal	Stoorvogel	E
Krogh, 1997	1997	N,P,K	14.37	-0.35	Bidi	Burkina Faso	Global	Polyculture	Stoorvogel	V
Elias et al,(1998)	1998	N,P	6.92	37.53	Kindo Koisha	Tanzanie	Global		Stoorvogel	P,E
Baijukya et al. (1998)	1998	N,P,K	-1.33	31.81	Bukoba	Tanzanie	Global	Banane	Stoorvogel	E
Defoer et al (1998)	1998	N,P,K	11.49	-5.83	Noyeradougou	Mali	Partiel	Polyculture	Stoorvogel	E
Harris (1998)	1998	N,P,K,Mg,Ca	12.66	8.69	Tumbau	Nigeria	Global	Polyculture	Stoorvogel	E
Folmer et al. (1998)	1998	N,P,K				Mozambique			Stoorvogel	N
Wortmann et Kaizzi, 1998	1998	N,P	1°05'N, 34°05'E		Palissa ++	Ouganda	Global	Polyculture	Stoorvogel	P,E
Hieraux (1998)	1998	N,P	13.57	2.15	Banizoumbou	Niger	Partiel	Mil,Elevage		V
Rovere (2000)	2000	N,P,K	13.57	2.15	Banizoumbou	Niger	Partiel	Mil,Elevage	Bio-économ	V
De Jager et al. (2001)	2001	N,P,K	1.52	37.27	Machakos	Kenya	Globam	Polyculture	NUTMON	E
Kante (2001)	2001	N,P,K	12.28	-5.34	Noyeradougou	Mali	Partiel	Mil,Coton,Elevage	Stoorvogel	V
Busque (2002)	2002	N,P,K	13.57	2.15	Banizoumbou	Niger	Partiel	Mil,Elevage	NUTMON	E,V
Bekunda and Manzi (2003)	2003	N,P,K	-1.42	29.95	Rubuya	Ouganda	Partial	Polyculture	Stoorvogel	E,D
Manlay et al. (2004a)	2004	N,P	12.74	-15.08	Sare Yorobana	Sénégal	Partiel	Polyculture		P,E
Sheldrick and Lingard (2004)	2004	N,P,K			-				Stoorvogel	N
Schletch (2004)	2004	N,P	14.25	3.45	Tchikal	Niger	Partiel	Mil,Elevage		V
Esilaba et al. (2005)	2005	N,P,K	0.46	33.48	Buyumba	Ouganda	Partiel	Polyculture	Stoorvogel	E
Gachimbi, Keulen et al. , 2005	2005	N,P,K	1.52	37.27	Machakos	Kenya	Farm	Polyculture	NUTMON	P,E
Ramisch, (2005)	2005	N,P,K	12.32	-4.81	Lanfiéla	Mali	Global	Mil,Coton,Elevage	Stoorvogel	V
Tittonell et al. (2006)	2006	N	(0°12'; 34°48'E		Shinyalu ++	Kenya	Global	mais	Dynamique	P
Zingore et al. (2007)	2007	N,P	-17.65	31.78	Murewa	Zimbabwe	Global	Polyculture	Stoorvogel	P,E
Haileslassie et al. (2007)	2007	N,P,K	9.3	38.98	Dega	Ethiopie	Global	Polyculture	Stoorvogel	P,E
Kanté (2007)	2007	N,P,K	11.49	-5.83	Noyeradougou	Mali	Global	Mil,Coton,Elevage	Stoorvogel	V
Lesschen et al (2007)	2007	N,P,K			-	Burkina Faso	Global	Polyculture	Stoorvogel	N
Kanmegne, Smaling et al. , 2007	2007	N,P,K	2°-3°N	10°10'-10°7'	Asseng et +	Cameroun	Gobal	Polyculture	NUTMON	P,E
Abegaz, Keulen et al. , 2007	2007	N,P,K	13°52'53"	39°42'05"	Thegane	Ethiopie	Global	Polyculture	NUTMON	P,E
Kathuku, Kimani et al. , 2007	2007	N,P,K	1.52	37.27	Kirinyaga	Kenya	Farm	Polyculture	NUTMON	P,E
Van Beek, Onduro et al , 2009	2009	NPK	0°20-0°50	37°16" - 3	Munyaka	Kenya	Global	Polyculture	NUTMON	E
Rufino, Tittonell et al. , 2009	2009	N	13°45', 39	17°51'S, 3	Teghane	Ethiopie	Partiel	Elevage	NUTMON +	P,E

+ ou ++ = plusieurs localités et dans la colonne méthode, plusieurs modèles

Cette forme de représentation simplifiée de la réalité s'effectue à travers la modélisation d'un système. Selon Balaghi (2000), un système est une structure composée d'éléments clés, qui interagissent entre eux avec des limites fixées. Teh (2006) distingue quatre grands types de modèles à savoir le modèle iconique (illustrations, diagrammes), le modèle conceptuel ou verbal (en langage naturel), les modèles physiques (simulateurs) et les modèles mathématiques ou algorithmiques. Ces derniers décrivent le système à partir d'équations, pour l'estimation, la prévision et le contrôle du système. Selon France et Thornley (1984), les modèles mathématiques peuvent à leur tour être décrits en fonction des trois groupes suivants:

- ✓ Les modèles empiriques qui restent descriptifs et sont le reflet des données utilisées à un niveau organisationnel donné (Schlecht et Hiernaux, 2004). Ces modèles s'opposent aux modèles mécanistes qui visent à comprendre le comportement d'un système à un niveau donné avec une hiérarchisation des processus.
- ✓ Les modèles statiques qui sont caractérisés par l'absence de la dimension temporelle. Ces modèles s'opposent aux modèles dynamiques fonctionnant souvent sur base d'équations différentielles par rapport au temps (Hoch, Pradel *et al.*, 2004).
- ✓ Les modèles déterministes qui permettent de faire des prévisions sans distribution de probabilités. Ces modèles s'opposent aux modèles stochastiques qui ont en entrée les distributions statistiques de certains paramètres pour la prévision et son erreur.

L'une des premières tentatives partielles de classification des modèles de bilans d'éléments nutritifs en ASS a été réalisée par Hiernaux et Schlecht (2003). Trois grands types de modèles sont définis, les modèles statiques, les modèles de programmation linéaire et les modèles décisionnels avec une analyse des forces et faiblesses de chacun d'eux (Table 6.2). Dans plusieurs synthèses sur les bilans en ASS (Roy, Misra *et al.*, 2003), les échelles de type géographique ont été les plus utilisées pour caractériser les études de bilans. Un inventaire des méthodes d'élaboration des bilans à travers les publications (Cobo, Dercon *et al.*, 2010) montre une large utilisation de la méthode de Stoorvogel et Smaling (1990b).

Table 6-2: Forces et faiblesses de certaines méthodologies d'évaluation des flux et bilans minéraux

Forces	Faiblesses
Statique	
Très bonne structure de données Simulation de certains flux Evaluation des flux et des bilans Evaluation des indicateurs économiques	Absence de prise en compte de la gestion communautaire ; Les simulations ne sont pas interactives ; Pas de simulation des processus majeurs ; Absence d'évaluation d'impact.
Modèle bio-économique par programmation linéaire	
Intégration des composantes biologiques et socio-économiques ; Relation entre les différentes composantes de l'exploitation par des fonctions ; Générateurs de coefficients ; Fonction de maximisation; Test des technologies sous différents scénarios et différents critères	Absence de prise en compte de la gestion communautaire ; Simulation très générale des processus biologiques ; Simulation statique ; Problèmes d'internalisation des relations existantes entre les exploitants ; Décision de gestion non internalisée.
Modèle décisionnel	
Intégration des composantes biologiques et socio-économiques ; Intégration des échelles exploitation et régionale Modèle dynamique ; Prend en compte les décisions de gestion ;	Limite liée au nombre d'exploitations ; Calibration nécessaire des nombreuses fonctions ; La gestion est limitée à l'exploitation ; Non prise en compte des contrats de partage, de gardiennage ; Non prise en compte des arrangements institutionnels ;

Source : Hiernaux et Schlecht (2003)

6.1.3 Limites des approches des bilans en ASS

La méthode de Stoervogel est essentiellement basée sur la détermination plus ou moins précise des flux de gestion et une évaluation des flux environnementaux par des fonctions de transfert. Les problèmes relatifs aux échelles spatio-temporelles, l'imprécision du calcul de certains flux, l'absence de validation ont été les griefs essentiels portés à cette méthode (Buerkert et Hiernaux, 1998 ; Scoones et Toulmin, 1998 ; Ferge et Magid, 2004 ; Schlecht et Hiernaux, 2004 ; Cobo, Dercon *et al.*, 2010). En dépit de ces critiques, très peu de propositions pratiques ont été faites pour améliorer ladite méthode actuellement toujours utilisée (Vitousek, Naylor *et al.*, 2009).

Un des points faibles souvent relevé dans l'évaluation des bilans dans les agroécosystèmes en ASS est le transfert de fertilité assuré par l'élevage dans les agroécosystèmes culture-élevage. Dans ces systèmes, l'utilisation des pâturages en toute saison et des champs à la fin des

récoltes opère un transfert de matières organiques et minérales dans l'espace villageois (champs, lieux de parage, jachères, etc.). Cette gestion communautaire des ressources naturelles n'est pas prise en compte dans les systèmes basés sur l'exploitation agricole. Les pâturages communautaires sont des zones accessibles à tous les éleveurs quelle que soit leur origine, au cours d'une période donnée (Bonfiglioli, 1990; Thébaud et Batterbury, 2001). Les périodes d'accès aux zones de cultures sont parfois légiférées (Niamir-Fuller, 1999; Guengant et Banoin, 2003).

Suite à la publication des travaux relatifs au bilan minéral des pays de l'ASS commandités par la FAO (Stoorvogel et Smaling, 1990b), plusieurs recherches sur la gestion de l'élevage et plus particulièrement le transfert de fertilité entre les zones de pâturage et les zones de culture ont été conduites. Ces travaux ont permis de poser clairement la problématique liée à la prise en compte de l'élevage mobile dans l'évaluation de la durabilité des systèmes culture-élevage à travers les bilans de la matière organique et des éléments nutritifs (Powell, Fernandez-Rivera *et al.*, 1996). Le rôle de l'élevage a été souvent perçu comme une source de déjections animales au sein de l'exploitation pour les parcelles cultivées. La question de la mobilité a été longtemps omise. Dans certains cas, il était estimé que l'apport du bétail était égal à ce qu'il consommait (Stoorvogel et Smaling, 1990a). A partir des années 1990, plusieurs recherches dont celles conduites par l'ILRI (Powell et Williams, 1995a; Turner, 1995c; Ikpe et Powell, 2002) ont permis de mieux intégrer le rôle de l'élevage dans le cycle des éléments nutritifs en mettant en évidence le lien entre les sols, les cultures et l'élevage comme un élément vital pour assurer la productivité durable des systèmes culture-élevage. Un des éléments importants est le rôle que jouent les pâturages extensifs dans ce recyclage. Ces différentes recherches sur le rôle de l'élevage dans la fertilité des espaces villageois ont ouvert la voie à une bonne compréhension des interactions entre troupeaux, espace et ressources (Turner, 1995c). Elles ont aussi permis l'amélioration du calcul des flux et des bilans (fourragers et d'éléments minéraux) à l'échelle du terroir pour mieux appréhender cette dynamique spatiale (Ickowick, 1995 ; Ickowicz, Usengumuremyi *et al.*, 1997 ; Manlay, 2000 ; Schlecht, Hiernaux *et al.*, 2004). L'articulation des différents plans de gestion des ressources, à savoir les ressources fourragères au niveau des communautés villageoises, donc de l'espace villageois, et des champs gérés par l'exploitation a souvent limité ces approches. Les résultantes de ces approches se caractérisent soit par bilans par systèmes paysagers à l'échelle du village ou du terroir (Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.*, 1997 ; Manlay, Ickowicz *et al.*, 2004 ; Schlecht,

Hiernaux *et al.*, 2004) ou à l'échelle de l'exploitation agricole (Kante, 2001 ;La Rovere, 2001).

L'évolution du modèle de Stoorvogel, en dépit des critiques, a permis la conception d'un outil de calcul des bilans basé sur le concept de l'exploitation agricole, NUTMON (Smaling, Louise *et al.*, 1996; De Jager, Nandwa *et al.*, 1998b). Cet outil, dans ses versions successives, intègre la question de la mobilité de l'élevage dans l'exploitation agricole en prenant en compte la pâture hors exploitation, de jour et de nuit, et pour les espèces principales de ruminants (Van den Bosch, De Jager *et al.*, 1998). Ce modèle dit « simple » développé et intégré dans NUTMON (Vlaming et al, 2001) est rarement évoqué dans les études de bilan à l'exception de Rufino *et al.* (2009) pour le calcul de l'ingestion et de l'excrétion en Tigray (Ethiopie). Un des aspects importants de l'outil NUTMON est la structure de base de données utilisée pour la gestion des informations des exploitations agricoles et des coefficients techniques dans les règles de l'art (Smaling et Fresco, 1993). A l'ensemble de ces atouts, s'ajoute la possibilité de communication avec d'autres systèmes à l'image des exemples cités dans le manuel de NUTMON avec le logiciel SPSS™ pour les analyses (Vlaming, Van den Bosch *et al.*, 2001) ou les systèmes d'information géographique. NUTMON permet d'évaluer les bilans globaux et partiels de l'exploitation aux échelles des unités de l'exploitation. Même si les équations et le concept sont très utilisés, NUTMON est cependant resté un outil très peu usité en dehors des projets de ses concepteurs. Dans cet outil très critiqué sur son volet élevage, la question du transfert de fertilité dans les systèmes culture-élevage a été néanmoins prise en compte dans le calcul des bilans à travers l'utilisation des résidus et les apports de déjections animales par la fumure. Dans les études conduites dans les pays du Sahel où la gestion des ressources communautaires règle le transfert de fertilité, les approches divergent. Kanté (2001) évalue le bilan de N et P dans les zones cotonnières du Mali dans une zone d'agro-pasteurs et d'éleveurs sédentaires avec l'existence de pâturage communautaire et la pratique de la transhumance. Les bilans partiels sont évalués par culture, par classe d'exploitation. La gestion de la fumure organique, la vaine pâture et la gestion des résidus sont considérées. Cette étude n'inclut pas les jachères et autres terres non cultivées dans le bilan des exploitations. Ramisch (2005) évalue le bilan des champs dans trois systèmes agro-pastoraux cotonniers du sud Mali. A la différence de l'étude de Kanté (2001), cette étude fait la distinction des quantités de fourrage prélevées par les animaux de l'exploitation et celles

prélevées par les animaux du propriétaire. De même, la fumure déposée par parage et par pâture est prise en compte. Cependant l'étude s'intéresse uniquement aux terres cultivées et ne prend pas en compte les autres terres gérées par les exploitations. Krogh (1997) au Burkina Faso évalue le bilan des éléments nutritifs à l'échelle des champs et dans un village agro-pastoral du Nord du Burkina Faso. La fumure est estimée à partir des données de Stoorvogel. Le bilan du village est calculé avec une internalisation de la production agricole. Harris (1998) évalue le bilan des exploitations agricoles au Nord du Nigéria et utilise la méthode Stoorvogel. Une des caractéristiques de ces travaux sur les bilans au Sahel est l'utilisation de la méthode Stoorvogel (1993) avec l'accent sur les terres des cultures sans la prise en compte de la spatialité de l'ingestion et de l'excrétion. On note néanmoins les tendances positives dans la prise en compte de l'effet de la pâture externe dans le calcul des bilans pour le passage de l'échelle de la parcelle à l'échelle village ou terroir. Ruffino et al (2009) dans l'étude des performances des systèmes mixtes en Ethiopie introduit le calcul neuronique dans l'étude des bilans et prend en compte la gestion communautaire des pâturages à travers l'intégration de deux modèles, NUTMON et LIVSIM respectivement pour une zone ne disposant pas de données détaillées sur l'élevage, et sur une zone dont les données sont suffisantes pour le calcul de l'ingestion et l'excrétion du bétail.

Dans la zone d'étude du Fakara, plusieurs travaux précurseurs à la présente étude ont permis d'asseoir les bases nécessaires pour le calcul des bilans à l'échelle des terroirs avec la prise en compte de la mobilité du cheptel. Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.* (1997) évaluent le bilan minéral des trois terroirs du Fakara, par saison et par occupation des sols. Le rapport étroit entre les bilans et la pression agricole sur les terres, de même que le rôle de la gestion des troupeaux est mis en évidence. La Rovere (2001), par une approche bioéconomique, établit des bilans minéraux par exploitation agricole à partir de coefficients générés de la base de donnée ILRI. Sur les mêmes sites, Busqué (2002) utilise en partie NUTMON et un modèle de simulation de l'ingestion et de l'excrétion pour le calcul des bilans minéraux à l'échelle des exploitations agricoles du Fakara. Schlecht, Hiernaux *et al.* (2004) sur la base des bilans d'ingestion et d'excrétion des différentes localités du Fakara, de Tchiko et Chikal, mettent en évidence les différences liées à l'intensité de culture, à la gestion des parcours et aux pratiques de parage. Les travaux sur la modélisation spatiale de l'activité du bétail dans les terroirs du Fakara et de Ticko (Turner et Hiernaux, 2002; Turner, Hiernaux *et al.*, 2005 ; Schlecht,

Hiernaux *et al.*, 2006) ont mis en place les bases de la spatialisation et la quantification des flux organiques et minéraux en relation avec l'élevage dans les agroécosystèmes culture-élevage.

Dans les approches de bilan, l'introduction de la spatialisation des systèmes a été réalisée à travers les premiers bilans de Stoorvogel et Smaling (1990b) par le choix d'utiliser une classification de type agroécologique basée sur le climat et la disponibilité en eau d'irrigation. Ainsi, le continent africain a été subdivisé en classes dites 'eau/terres', elles-mêmes subdivisées en classes d'utilisation des terres selon la définition de la FAO (1976). Les mécanismes responsables des flux N, P, K à l'intérieur et à l'extérieur du sol ont été identifiés dans chaque classe d'utilisation des terres. Le schéma d'agrégation des flux comprend la culture, l'utilisation des terres, la classe eau/terre et le pays. Les bilans ont été cartographiés par pays. Dans la plupart des études ayant suivi cette méthode, les champs des exploitations ont été utilisés comme élément de base. Le passage à une couverture géographique plus étendue a nécessité la prise en compte de plusieurs unités spatiales qui sont renseignées par plusieurs attributs relatifs au fonctionnement du système. L'unité géographique permet ainsi la restitution des résultats des flux et permet par la suite des analyses spatiales plus complexes (Stoorvogel, 1995). L'évaluation des pertes d'éléments nutritifs a été réalisée à l'aide des systèmes d'information géographique et de la télédétection par Soe Win Myint (1997) en Thaïlande sur la base de l'équation USLE, des images LANDSAT. Folmer, Geurts *et al.* (1998) sur la base de données plus détaillées sur la pluviosité et l'érosion, reproduisent la méthode des systèmes d'utilisation des terres à l'échelle nationale avec plus de précision pour évaluer les bilans d'éléments nutritifs au Mozambique. L'utilisation de modèles spatialisés des géographes ou de "modèles spatialement explicites" des écologues (Viron et Chery, 2005) à partir d'une spatialisation des différents flux et d'une carte d'occupation des sols a été réalisée par Lesschen, Stoorvogel *et al.* (2007) dans une étude de cas sur le Burkina Faso à une résolution de 1 km. L'utilisation faite du modèle spatial dans ces études permet de mieux représenter les variations spatiales à l'intérieur des différentes échelles géographiques. De même, l'agrégation des données permet de réduire certaines erreurs dues à l'effet de lissage, inhérentes au calcul des bilans (Lesschen, Stoorvogel *et al.*, 2007). Les modèles spatiaux utilisés dans ces études restent cependant statiques et ne prennent pas en compte la dimension temporelle ainsi que les interactions entre les unités définies comme la dynamique du cheptel quand un maillage de la densité du cheptel est utilisé pour en déduire l'ingestion et l'excrétion.

De même, le passage d'une échelle à une autre, par exemple du pixel à l'unité d'utilisation des terres combine plusieurs processus qui se déroulent à des échelles spatiales différentes. Les résultantes issues de telles agrégations sont complexes car les phénomènes qui se passent dans une échelle macro ne sont pas la somme de ceux de l'échelle micro (Voiron et Chery, 2005).

Ce chapitre, fait suite aux précédents qui ont permis de montrer la dynamique spatio-temporelle des ressources gérées par les communautés, le bétail les ressources végétales, et l'évaluation du bilan de l'ingestion et de l'excrétion par NUTPAST. **Il a pour objectif d'évaluer les bilans partiels des éléments minéraux N, P, K à l'échelle des terres de l'exploitation agricole dans les trois terroirs du Fakara par spatialisation des flux liés au bétail par l'outil NUTPAST et des flux liés aux cultures par NUTMON.**

Le calcul des flux et des bilans partiels est réalisé dans un premier temps à l'aide de NUTMON avec comme données d'entrée les résultats obtenus dans les trois chapitres précédents. Les flux obtenus avec NUTMON sont ajustés par les flux évalués avec NUTPAST grâce à l'approche de modélisation suivie pour la dynamique spatio-temporelle de la végétation que celle des troupeaux traitée dans les chapitres précédents. La démarche est d'abord décrite pour une exploitation, et ensuite pour l'ensemble des exploitations. Une analyse des résultats de l'ensemble des exploitations est conduite après le calcul des bilans partiels ajustés. Les bilans partiels des terres de chaque exploitation sont agrégés à différentes échelles, l'exploitation, les types d'occupation de sols et le niveau terroir. Cette spatialisation à cette échelle des bilans partiels de N, P, K est une des résultantes du maintien de la capacité analytique de l'outil NUTPAST avec l'ensemble des facteurs liés à l'exploitation et au terroir mis en jeu dans cette approche.

6.2 Méthodologie

6.2.1 NUTMON, une approche, un concept et un outil de gestion

Le concept de NUTMON à travers la définition d'un système, celui de l'exploitation agricole, basé sur des compartiments que sont le ménage, les activités de production végétale, les activités d'élevage, les activités relatives à la gestion de la matière organique, a été retenu pour cette étude. Parmi les méthodologies et outils développés dans les programmes d'amélioration de la fertilité des sols, l'approche de Stoorvogel et Smaling, (1990) a donné naissance à NUTMON ou **N**Utrient **M**ONitoring (De Jager, Nandwa *et al.*, 1998a). NUTMON est une approche intégrée et multidisciplinaire de gestion de la fertilité des sols qui est mise en œuvre à travers une recherche participative. L'application de la méthode NUTMON comprend un recensement et un suivi des flux à l'échelle de l'exploitation agricole. L'objectif principal de NUTMON est l'évaluation des flux et bilans des éléments nutritifs, azote, phosphore et potassium au niveau de l'exploitation agricole. La méthodologie et le concept de NUTMON ont fait l'objet de plusieurs publications scientifiques (De Jager, Nandwa *et al.*, 1998a ; Smaling et Fresco, 1993 ; Vlaming, Van den Bosch *et al.*, 2001).

Le concept de NUTMON est basé sur un modèle qui est une simplification du fonctionnement de l'exploitation agricole. Ce concept prend en compte les flux les plus importants et néglige les flux secondaires à cause de la complexité de leur évaluation à l'échelle de l'exploitation agricole. L'exploitation agricole dans le système NUTMON comprend quatre composantes principales :

1. les terres contigües de l'exploitation agricole
2. les réservoirs en éléments nutritifs tels que les cultures, le bétail, les fosses fumières, les sols, le climat et les marchés
3. les flux d'éléments nutritifs
4. les flux financiers (récoltes, engrains minéraux, main d'œuvre).

Dans le concept NUTMON, les limites de l'exploitation agricole sont ses frontières physiques (Vlaming, Van den Bosch *et al.*, 2001). La limite supérieure du système est constituée par l'interface sol-atmosphère ou plante-atmosphère. La limite inférieure est la profondeur au-delà de laquelle les éléments nutritifs lessivés sont supposés être perdus par le système. L'exploitation agricole proprement dite est composée de trois sous-systèmes reliés entre eux: le ménage, les activités agro-pastorales et les activités économiques du ménage en dehors de

l'exploitation. Les sols de l'exploitation et leurs caractéristiques sont une composante essentielle du système, de même que le climat (à travers la pluviosité), et les marchés. L'exploitation agricole est subdivisée suivant les réservoirs d'éléments minéraux (Figure 6-2) en unités de division de l'exploitation (UDE), unités primaires de production (UPP), unités secondaire de production (USP) et unités de redistribution (UR). Dans la terminologie anglophone, les UDE sont les FSU (Farming system Unit), les UPP sont les PPU (Primary production Unit), les USP sont les SPU (Secondary Primary Unit), les UR sont les RU (Redistribution Unit).

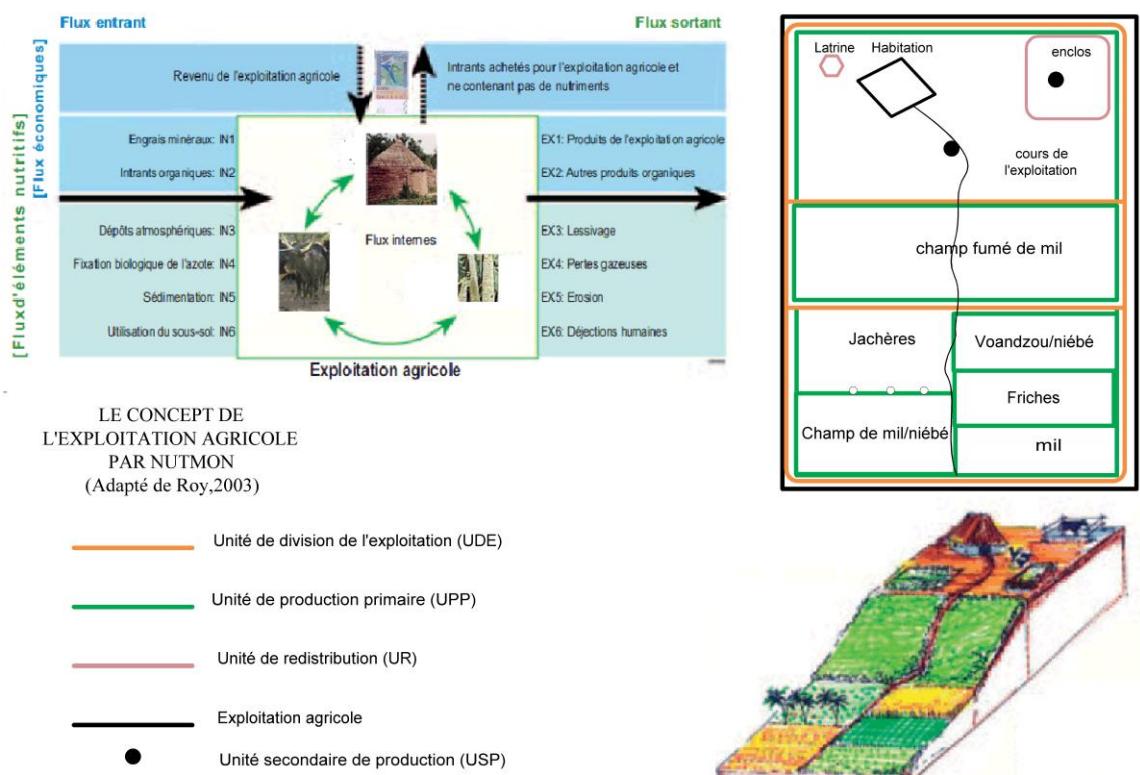


Figure 6-2 : Concept de l'exploitation dans NUTMON (source=Vlaming, Van den Bosch et al., 2001)

Une UDE est une zone contiguë de l'exploitation avec un seul type de sol, des caractéristiques de pente identiques, un régime hydrique et un régime foncier similaires. Une exploitation agricole peut avoir plusieurs UDE. A titre d'exemple, dans les régions sahéliennes, certaines terres de l'exploitation peuvent être situées dans la vallée et d'autres sur des plateaux. Les limites des UDE sont visibles sur le terrain à cause des différences de pente et des zones d'écoulement.

L'UPP représente une ou plusieurs activités de production végétale de l'exploitation qui se caractérisent par leur cycle de production dans le temps. Cette production végétale peut être celle d'une culture, d'une jachère, d'une friche, d'une terre incultivable. Les productions de l'UPP sont destinées à l'alimentation humaine et/ou animale. Ce sont les récoltes de grains et les résidus de cultures, la production de fourrage naturel, la production ligneuse des parcs agro-forestiers. Les cultures mixtes dans un champ constituent une seule UPP si les cycles de cultures se superposent plus d'un mois (Vlaming, Van den Bosch *et al.*, 2001). L'unité primaire de production (UPP) est une subdivision de l'UDE. L'UDE peut avoir plusieurs UPP. L'UPP se caractérise donc par ses propriétés physiques en tant qu'élément d'une UDE et sa production végétale.

Les USP regroupent l'ensemble des animaux élevés dans l'exploitation. Une USP se caractérise par des animaux de la même espèce et sous la même conduite. L'USP est composée de catégories d'animaux d'une même espèce qui se différencient par leur classe d'âge, le sexe, et l'état physiologique pour les reproducteurs. Pour les femelles adultes, la distinction est faite entre les lactantes et les non lactantes.

Les unités de redistribution (UR) sont des zones de l'exploitation où les éléments nutritifs sont recueillis ou stockés, et redistribués dans les autres composantes de l'exploitation. L'UR peut être située dans une UPP. Ce sont les abris des animaux, les lieux de repos nocturne des animaux, les zones de parage, les fosses à compost et les latrines.

Les autres réservoirs d'éléments nutritifs rattachés à l'exploitation sont les unités de stockage (UST), les habitants de l'exploitation (HE) et le monde extérieur (EXT). Les UST sont constitués des greniers, des unités de stockage de foin et des résidus de récolte. Le monde extérieur à l'exploitation peut être une source ou une destination des flux de l'exploitation. Il comprend notamment les marchés et les pâturages hors de l'exploitation.

Dans la mise en œuvre du concept de NUTMON, les informations quantitatives sur les exploitations sont collectées lors de deux phases : la phase diagnostic et la phase de développement. La phase diagnostic s'applique aux échelles de gestion de terres, des cultures et de l'élevage. Elle a pour objectif de dresser l'état de l'exploitation en termes de fertilité des

sols et de quantifier les flux entre les différents composants du système (les sols, les cultures et le bétail). La phase de développement s'applique aux échelles de l'exploitation et de la région. Elle a pour objectif de mettre en œuvre les recommandations issues de l'analyse de la situation de l'exploitation en termes de bilan des différentes unités du système. Ces recommandations peuvent porter sur l'application de technologies innovantes d'utilisation rationnelle des réserves et des flux d'éléments nutritifs capables d'améliorer la productivité et les performances de l'exploitation agricole.

Le système NUTMON comprend un logiciel (boîte à outils) qui comporte quatre modules et deux bases de données :

- ✓ les questionnaires sur l'environnement biophysique et socio-économique de l'exploitation agricole ainsi que sa gestion interne
- ✓ un module de saisie des questionnaires
- ✓ un module de traitement des données non spécifiques
- ✓ un module de calcul des flux et bilans en éléments nutritifs. Ce module permet également le calcul d'indicateurs économiques qui ne font pas l'objet de notre étude.

Les deux bases de données servent à la gestion de l'ensemble des informations :

- ✓ La base de données des informations non spécifiques à l'exploitation contient la teneur en éléments nutritifs des différents produits agricoles, les besoins journaliers des animaux par espèce et par classe d'âge.
- ✓ La base de données des informations spécifiques aux exploitations agricoles.

L'ensemble du système est géré par ACCESS version 2003 ou version 2007³¹ pour la partie base de données et le calcul des flux et bilans des éléments minéraux. NUTMON a connu plusieurs évolutions et la dernière version (version 3.6) utilisée dans le cadre de cette étude est mise en ligne gratuitement par l'équipe de gestion de NUTMON et du projet Monqi (Vlaming, 2006).

³¹ C'est dans cette version que nous avons développé les bases de données sans une migration des bases de données de la version 2003 à la version 2007 à cause de la compatibilité en certains points des différentes versions

6.2.2 L'évaluation, la quantification des flux et bilans partiels dans NUTMON

NUTMON est basé sur l'évaluation de cinq flux entrants et six flux sortants. Ce sont les flux de produits et les flux d'éléments nutritifs (Table 6-3). Les flux existants dans l'exploitation sont regroupés en flux entrants, flux internes et flux sortants. Chaque flux est numéroté de 1 à 6. Certains flux de même nature, avec des sources différentes portent en plus des lettres, la lettre a ou b. L'inventaire des flux existants de type 1,2 dans le système étudié donne 3 flux entrants, 10 flux internes et 6 flux sortants (Annexe 6.3).

Table 6-3 : Les intrants et extrants dans le calcul de NUTMON

Flux Entrants	Définition des flux entrants	Flux sortants	Définition des flux sortants
IN1	Les apports d'engrais minéraux dans les cultures et d'aliments minéraux aux animaux. Ces apports sont presque inexistant dans le système étudié	OUT1	Les produits récoltés de l'exploitation
IN2a	Les apports d'engrais organiques dans les champs et d'aliments organiques au bétail	OUT2a	Les résidus de cultures et les déjections animales exportées et stockées
IN2b	Les apports de déjections animales issues de la pâture externe à l'exploitation	OUT2b	Les déjections animales en dehors de l'exploitation
IN3	Les dépôts atmosphériques	OUT3a	Le lessivage à partir du sol
IN4a	La fixation symbiotique de l'azote	OUT3b	Le lessivage à partir des UR
IN4b	La fixation non symbiotique de l'azote	OUT4a	Les pertes gazeuses du sol
IN5	Les apports par irrigation et par sédimentation	OUT4b	Les pertes gazeuses des UR
		OUT5	L'érosion
		OUT6	Les déjections humaines

Les flux sont calculés à partir de données provenant des questionnaires, des fonctions de transfert ou d'hypothèses. La quantification des flux de type 1 et 2 (IN1, IN2a, IN2b, OUT1, OUT2a, OUT2b) se rapportant aux flux entrants, aux exportations et aux produits de l'exploitation, s'effectue à partir de la teneur en éléments nutritifs des différents produits. Les flux relatifs à l'élevage sont calculés à partir d'un modèle programmé dans NUTMON (Annexe 6.1). Ce modèle NUTMON prend en compte la dynamique du cheptel dans les pâturages de l'exploitation et hors de l'exploitation, et la dynamique temporelle des effectifs du cheptel. Les flux de type 3 et 4 sont évalués avec des fonctions de transfert de type linéaire qui utilisent comme variable explicative la pluviosité annuelle (IN3, IN4b, OUT3a), la teneur

en argile et la pluviosité annuelle (OUT4a). Le flux de type 5 utilise l'équation universelle de pertes des sols (OUT5). Les flux IN4a, OUT3b et OUT4b proviennent respectivement des productions agricoles de type légumineuse, des pertes gazeuses par lessivage, des éléments nutritifs dans les UR. Les exportations ou réutilisations liées aux déjections humaines (OUT6) sont calculées sur la base de la composition des ménages et des coefficients attribués à chaque classe d'âge. Les autres flux calculés sont liés aux déchets ménagers, à l'utilisation de l'eau, aux pertes par feu s'il ya lieu.

6.2.2.1 Evaluation des flux des produits importés : engrais et fumure organique

Les produits importés dans l'exploitation sont les engrais, les aliments du bétail, et les déjections animales. Le terme largement utilisé en lieu et place de déjections animales est le fumier³². Les produits exportés des sols de l'exploitation sont les récoltes, les résidus de récoltes ou toute production animale et végétale des terres de l'exploitation. Le contenu des engrais en éléments nutritifs est généralement donné dans leur formule. Les formules des engrais X-Y-Z ont été converties en X kilogrammes d'azote élémentaire, Y kilogrammes d'oxyde de phosphore et Z kilogrammes d'oxyde de potassium pour 100 kg d'engrais. Les conversions retenues pour le phosphore et le potassium sont de P= P2O5/2.291 et K=K2O/1.2046 (Vlaming, Van den Bosch *et al.*, 2001).

Les flux liés aux applications d'engrais, aux déchets ménagers dans les champs ou aux déjections humaines sont issus de la conversion des quantités appliquées par la teneur en éléments minéraux des différents produits suivant les formules suivantes reprises dans Vlaming, Van den Bosch *et al.* (2001) :

$$Flow_t = \sum_x wd\ Prod_{x,t} * frProd_x. \quad (1)$$

wd Prod_{x,t} représentant la quantité de matière sèche du produit x au mois t (unité = kg.MS), et *frProd_x* la teneur en élément nutritif (N, P, ou K) dans le produit x (unité = $\frac{kg}{kg}$) à l'état sec.

Les différents flux de produits à l'exception de ceux cités dans l'annexe 6.3 sont évalués à partir de la formule (1). Les quantités de produits récoltés et leurs résidus servent à évaluer les flux d'éléments nutritifs liés aux productions agricoles (mil, sorgho, maïs, voandzou, niébé,

³² Le fumier selon Atallah, (1993) 'est un terme général désignant les déjections animales dont la qualité est largement déterminée par la teneur en eau.

oseille). Un indice de récolte des éléments nutritifs (définition du NHI_{cp} et Annexe 6.4) est défini pour les céréales. Ces flux internes sont destinés à la consommation, à la commercialisation et une partie est stockée. L'exportation d'éléments nutritifs par une culture donnée à partir d'une unité primaire de production, au cours d'une période donnée est calculée par la formule (2).

$$Uptake_{p,t} = \sum_{cp} (OUT1Crop Prod_{cp,p,t} / NHI_{cp}) \text{ (unité = kg)} \quad (2)$$

avec $OUT1Crop Prod_{cp,p,t}$ la teneur en éléments nutritifs des produits récoltés de la culture cp de l'unité UPP, au cours du mois t en kg ;

et NHI_{cp} en kg/ha représente l'indice de récolte de l'élément nutritif N de la culture cp. L'indice de récolte est égal au rapport des quantités de produits récoltés à la matière sèche aérienne produite à maturité, exprimé en kg/ha ; les graines, les épis avec grains sont les produits récoltés.

Dans le cas où seul le grain est pris en compte comme produit récolté, les résidus de récolte sont considérés pour le calcul des exportations selon la formule (3)

$$Uptake_{p,t} = \sum_{cp} (OUT1Crop Prod_{cp,p,t} * (frOUT1CropProd_{cp}) + \left(\frac{1}{HI_{cp}} \right) - 1) * frOUT2CropRes_{cp} \quad (3)$$

$OUT1Crop Prod_{cp,p,t}$ la quantité de produits récoltés en grains de la culture cp, dans l'UPP p au mois t exprimé en kg ;

$frOUT1CropProd_{cp}$, la teneur en éléments nutritifs des produits récoltés en kg/kg ;

$frOUT2CropRes_{cp}$ la teneur en éléments nutritifs des résidus de la culture cp en kg/kg ;

HI_{cp} L'indice de récolte est égal au rapport du rendement grain à la matière sèche aérienne produite à maturité exprimée en kg/ha .

Les exportations sont exprimées avec la formule (4) dans le cas où seules les informations sur les résidus existent et où les productions ne sont pas données en grains mais en produits récoltés,

$$Uptake_{p,t} = \sum (WdOUT1Crop Prod_{cp,p,t} * frOUT1CropProd_{cp}) + (WdOUT2Crop Res_{cp,p,t} * frOUT2CropRes_{cp}) \quad (4)$$

$WdOUT2Crop Res_{cp,p,t}$ Les quantités de résidus de la culture cp de l'UPP p dans le mois t en kg

$WdOUT1Crop Prod_{cp,p,t}$ Les quantités de produits récoltés de la culture cp au temps t en kg

$frOUT1CropProd_{cp}$ la teneur en éléments nutritifs des produits récoltés de la culture cp en kg/kg

$frOUT2CropRes_{cp}$ la teneur en éléments nutritifs des résidus de la culture cp en kg/kg ;

Les rendements des différentes productions végétales sont exprimés en kg de matière fraîche. Les informations sur les masses végétales du chapitre 3 exprimées en kg de matière sèche ont été converties en matière fraîche sur la base de coefficients (Annexe 6.4 et 6.5). Les rendements des cultures qui n'ont pas fait l'objet de mesures au chapitre 3, à savoir les grains de sorgho, haricot, pois de terre, maïs ont été estimés à partir des statistiques de la base de données AP3A (AP3A, 2002). Ces rendements sont respectivement pour l'année d'étude, de 500, 150, 400 et 1500 kg.MS/ha. Le rendement en feuilles d'oseille est de 250 kg.MS/ha. Les superficies de ces cultures sont néanmoins très faibles dans les exploitations du Fakara et ne dépassent guère 1 % sauf dans le cas du niébé.

6.2.2.2 Evaluation des flux liés à l'élevage dans NUTMON

L'évaluation des flux liés à l'élevage dans NUTMON est réalisée à l'aide d'un modèle (Annexe 6.1) pour la prise en compte de la pâture externe à l'exploitation et de la composition de la ration alimentaire des animaux. Ce modèle est une simplification de la réalité complexe des systèmes d'élevage mobile. Les aspects suivants sont développés dans le modèle : l'ingestion alimentaire, l'excrétion, la distribution des déjections animales dans les différentes unités de l'exploitation. L'évaluation des besoins alimentaires des animaux en fonction de l'espèce et du type d'animal (âge, sexe, état physiologique) est réalisée soit à partir des besoins en matière sèche, soit à partir des besoins énergétiques. Dans la présente étude, l'approche « matière sèche » a été retenue pour être conforme à la méthode utilisée dans le chapitre 3. La pâture et l'excrétion nocturne sont prises en compte dans NUTMON. Les prélèvements nocturnes sont évalués à 10% des prélèvements journaliers compte tenu de l'importance de cette activité dans les systèmes d'élevage dans l'Ouest du Niger (Ayantunde, Fernandez-Riviera *et al.*, 2002). Les catégories d'animaux et leur équivalence en UBT, les paramètres d'ingestion et d'excrétion proviennent des données utilisées dans les chapitres précédents. (annexe 6.6).

Dans les systèmes culture-élevage de l'Ouest Niger, la pâture s'effectue dans les UPP de l'exploitation, et/ou dans les pâturages communautaires (Turner, 1992). Dans les chapitres précédents (Chapitre 5), le lieu de pâture, de repos a été défini dans l'occupation des sols au sein de l'unité géographique. Dans le cas où les informations exactes du lieu de pâture ne sont pas disponibles au niveau de l'UPP, l'UDE a été retenue (NUTMON, Page 78). La clé de répartition du temps de pâture, de l'excrétion dans les UPP est dans ce cas, fonction de la

disponibilité, de la qualité du fourrage et de sa teneur en azote. Les prélèvements mensuels des animaux sont fonction de la durée de la pâture diurne et nocturne, évaluée sur la base des besoins des animaux et des coefficients définis par l'utilisateur. Les prélèvements sont limités par la production maximale de l'UPP. Cette production maximale est évaluée dans le modèle (Annexe 6.7) à partir du type de culture, des caractéristiques pédoclimatiques de l'UPP et de l'efficience de l'utilisation de l'eau (kg MS/m³).

L'évaluation de la quantité et de la qualité des déjections animales est faite sur la base des quantités de matière sèche consommées ou des normes d'excrétion par animal. Le modèle prévoit plusieurs options selon la nature et la qualité des données d'entrée. L'option choisie est une conversion fixe des quantités ingérées en déjections animales avec une répartition dans les UPP basée sur le temps de pâture. Une teneur moyenne en éléments nutritifs a été attribuée à l'ensemble des excréptions animales pour tenir compte de la composition multi-espèce des troupeaux et des pratiques locales de collecte des déjections animales sans une différentiation de l'espèce (Williams, Powell *et al.*, 1995, Annexe 6.8)

6.2.2.3 Evaluation des bilans partiels

Le bilan global de l'exploitation de chaque élément nutritif est établi sur la base de la différence entre les entrées (IN_i) et les sorties (OUT_i) pour tous les flux. En reprenant le schéma de Stoorvogel et Smaling (1993a), les bilans partiels établis dans NUTMON portent sur la différence entre la somme des entrées IN_1 , IN_2 et la somme des sorties OUT_1 et OUT_2 . $Bilan\ partiel\ net = \sum_{IN=1}^2(Entrée\ d'\ éléments\ nutritifs) - \sum_{OUT=1}^2(Sortie\ d'\ éléments\ nutritifs)\ (kg)$. Les cinq flux les plus importants qui sont pris en compte dans le calcul des bilans partiels sont :

- l'apport d'engrais (IN_1),
- l'apport de déjections animales par les troupeaux de l'exploitation suite à la pâture dans l'exploitation (IN_{2a}) et à la pâture externe (IN_{2b}),
- Les exportations d'éléments nutritifs par les produits récoltés, grains essentiellement (OUT_1),
- Les exportations d'éléments nutritifs par les résidus, la production herbacée des pâturages, la production de feuilles des ligneux (OUT_{2a}),
- Les exportations d'éléments nutritifs hors exploitation liées aux dépôts de déjections animales hors exploitation (OUT_{2b}).

Ces bilans partiels sont rapportés à la superficie de l'exploitation, de l'unité de production primaire ou de l'unité bétail tropical. Ils sont établis pour l'exploitation agricole, les UDE, les UPP, les USP, les UR pour les trois éléments minéraux. Dans la présente étude, les bilans partiels sont établis uniquement à l'échelle des UPP. L'UPP est l'unité de base du système et la plus petite unité spatiale du système issue de l'intersection spatiale des unités géographiques, de l'occupation des sols et des unités de gestion. L'ensemble des agrégations spatiales pour le calcul des flux partiels de l'exploitation, du terroir s'effectue à cette échelle avec une pondération par la superficie de l'UPP. Seuls les bilans partiels seront calculés sur la base des données d'enquête, de laboratoire provenant de la base de données de l'ILRI. Les flux qui rentrent dans l'évaluation de ces bilans partiels caractérisent bien les agroécosystèmes culture-élevage dans lesquels les éléments nutritifs proviennent essentiellement du transfert de fertilité entre les parcours et les cultures, avec une gestion assurée par les ménages tant pour les cultures que pour l'élevage. De même, l'ensemble des interactions qui existent entre les différents compartiments de ces agroécosystèmes sont fonction d'une part, de la gestion des activités agricoles, et d'autre part, des activités d'élevage (Ruben et Pender, 2004). Les autres flux environnementaux qui ne font pas l'objet d'évaluation dans cette étude seront discutés à la fin du chapitre.

6.2.3 Agrégation des flux calculés par exploitation agricole et des flux d'ingestion et d'excrétion

Dans le calcul des flux, NUTMON omet l'ensemble des activités d'ingestion et d'excrétion du bétail extérieur à l'exploitation. En revanche, il quantifie les déjections des animaux de l'exploitation produites dans les autres exploitations comme sortie et il ne les attribue pas comme entrée dans ces exploitations. Plusieurs auteurs ont mis en évidence cet apport essentiel de la pâture externe à l'exploitation, nécessaire aux transferts d'éléments nutritifs des parcours vers les cultures (De Leeuw, Reynolds *et al.*, 1995, Powell, Fernandez-Rivera *et al.*, 1996).

La prise en compte simplifiée (tous les résidus de récolte sont retirés de l'UPP et gérés par l'exploitation agricole ou consommés au sein du UPP en cas de confinement à l'intérieur de celui-ci - Vlaming, Van den Bosch *et al.*, 2001 – Page 25) de la partie ingérée des résidus est

une des hypothèses existantes dans NUTMON dans le cadre d'une gestion des résidus, avec l'existence éventuelle de stock. Dans la présente approche, l'hypothèse sur les résidus est que les parties non ingérées sont recyclées sur place dans le système (Manlay, 2000). Cette hypothèse sera à la base des calculs de bilans partiels.

Le bilan partiel est calculé à l'aide de NUTPAST par la prise en compte des flux calculés dans NUTMON au niveau des UPP (IN1, IN2a, OUT1) et des flux d'ingestion et d'excrétion du module de NUTPAST calculés au niveau des occupations des sols par unité géographique dans un terroir donné.:

$$\text{Bilan partiel ajusté} = \text{IN}_1 + \text{IN}_{2a} + \text{IN}_{2b} - \text{OUT}_1 - \text{OUT}_{2a} - \text{OUT}_{2c} \text{ (unité en kg).}$$

IN2b : les apports de déjections lors de la pâture, du repos dans les UPP (source= NUTPAST)

OUT2a : L'ingestion totale dans les UPP (source: NUTPAST)

L'articulation entre NUTMON, utilisé pour le calcul des flux liés à l'exploitation agricole, et NUTPAST, utilisé pour le bilan de l'ingestion et de l'excrétion lié aux activités d'élevage, est réalisée à travers l'établissement des statistiques zonales des flux sur les entités issues de la superposition des unités géographiques et des cartes d'occupation des sols. Sur chaque zone, les quantités de matière sèche ingérées et excrétées par unité de surface ont été calculées. A ces zones sont attribuées les statistiques provenant des UPP dans NUTMON. La cartographie de chaque flux par attribution des valeurs des différents flux aux UPP permet, par intégration spatiale des différentes entités, de calculer et d'établir la carte du bilan partiel des éléments minéraux à l'échelle des UPP. Le passage à des échelles supérieures et fonctionnelles dans les systèmes culture-élevage sur le plan géographique (terroirs, unités d'occupation des sols ou unités géomorphologiques) se fait par agrégation spatiale. Le bilan partiel de l'ensemble des UPP d'une exploitation est la moyenne pondérée des UPP de cette exploitation par la superficie de chaque UPP. Ce bilan partiel, appelé par défaut dans notre étude, le bilan partiel de l'exploitation est différent de celui calculé dans NUTMON. Le bilan partiel d'une exploitation dans NUTMON est la différence des entrées et sorties en direction de l'extérieur (pâturages externes, marchés, etc.). Il ne prend pas en compte les flux internes. En revanche, les flux entre unités de l'exploitation sont pris en compte dans le bilan des UPP.

6.2.4 Adaptation des données des terroirs à la base de données de NUTMON

L'étude de cas d'une exploitation du Fakara a été choisie pour illustrer cette adaptation. Elle permet de présenter l'ensemble des potentialités de NUTMON à l'exception de la partie économique, et ses limites dans la prise en compte des aspects ayant trait à la mobilité pastorale. Cette étude de cas met en pratique l'approche utilisée par NUTPAST pour calculer les bilans partiels des exploitations en tenant compte des calculs préliminaires effectués dans NUTMON. Les bases de données nécessaires au fonctionnement de NUTMON, au nombre de deux, comprennent les données relatives à l'exploitation et les paramètres nécessaires au calcul des flux et bilans. Le contenu des différentes tables est décrit entièrement dans le manuel de NUTMON (Van den Bosch, De Jager *et al.*, 1998). L'accent sera mis ici sur la constitution des différentes unités de l'exploitation. Cette adaptation ou conceptualisation de notre système pour être conforme au concept de NUTMON a nécessité plusieurs simplifications et hypothèses de base qui sont les suivantes :

- L'exploitation agricole est composée de son troupeau géré, des terres gérées quel que soit leur statut de propriété, et de l'ensemble des personnes qui y habitent et qui prennent leur repas dans la famille
- L'ensemble des terres appartenant à l'exploitation est composé de plusieurs champs cultivés ou non, bien distincts qui sont regroupés selon la nomenclature des cartes d'occupation des sols utilisées. Elles sont déterminées sur la base des enquêtes menées par l'ILRI et cartographiées;
- La plus petite unité d'étude du système est le champ cultivé ou non dont le propriétaire est connu et identifié dans la base de données des exploitations.

6.2.4.1 Caractéristiques de l'exploitation exemple

L'exploitation choisie a pour référence dans la base de données du Fakara, KG95³³. Elle fait partie des exploitations du terroir de Kodey. Elle gère des champs et du bétail. Elle fait aussi partie des gestionnaires dans la dénomination retenue dans NUTPAST. Le ménage habite la

³³ La nomenclature des exploitations de la base de donnée de l'ILRI : 1^{ère} lettre est B, T ou K en fonction des terroirs respectifs Banizoumbou, Tchigo Tegui, Kodey, la seconde lettre dans le cas des gestionnaires est G et dans le cas des non gestionnaires est le code du village sauf G. Un numéro d'ordre est donné à chaque exploitation;

localité de Dandiré dont les coordonnées sont $2^{\circ}52'18.94''$ E de longitude et $13^{\circ}23'30.23''$ N de latitude (Figure 6-3). La pluviosité moyenne de la localité de Dandiré est de 568 mm avec une température minima de l'ordre de 22° et une température maxima de l'ordre de 38° (Figure 6-4). Dans la base de données de NUTMON, seules les données mensuelles de pluviosité sont enregistrées. Plusieurs stations météorologiques peuvent être enregistrées. Chaque exploitation agricole est liée à une station climatologique.

Composition du ménage de KG95

Les données sur le ménage servent à évaluer les quantités de déchets ménagers et les déjections humaines dans les latrines ou dans les autres unités de l'exploitation. Le ménage de KG95 est composé de 8 personnes qui constituent la force de travail de l'exploitation (annexe 6.9). A l'exception d'une personne qui passe 1/3 de son temps dans d'autres familles ou à l'étranger, le reste de la famille est présent toute l'année. Le nombre d'actifs pour les activités agricoles est de 2.65 et le nombre d'unités de consommation est de 5.71 soit un rapport de 2.15. Chaque actif de l'exploitation contribue à l'alimentation de 2 personnes en moyenne.

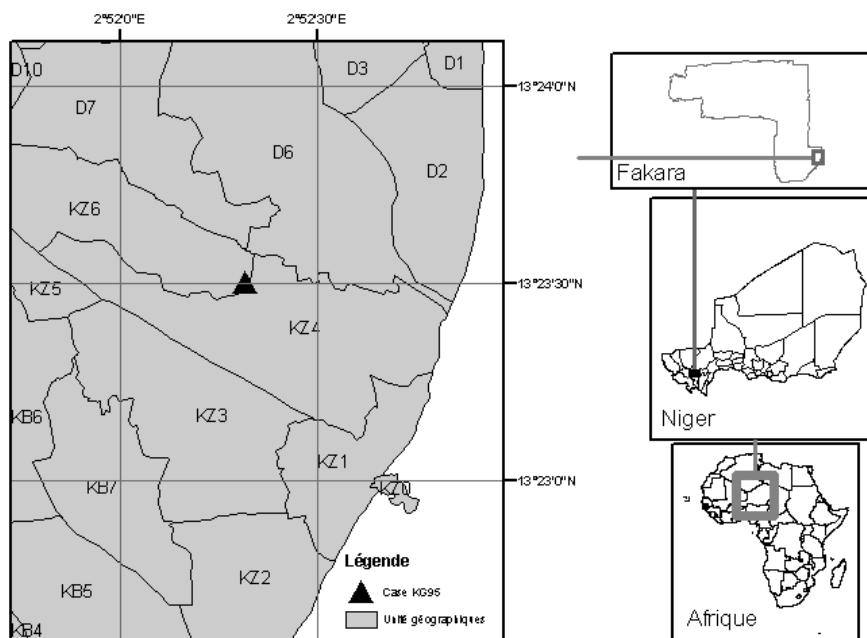


Figure 6-3 : Situation géographique du campement de KG95

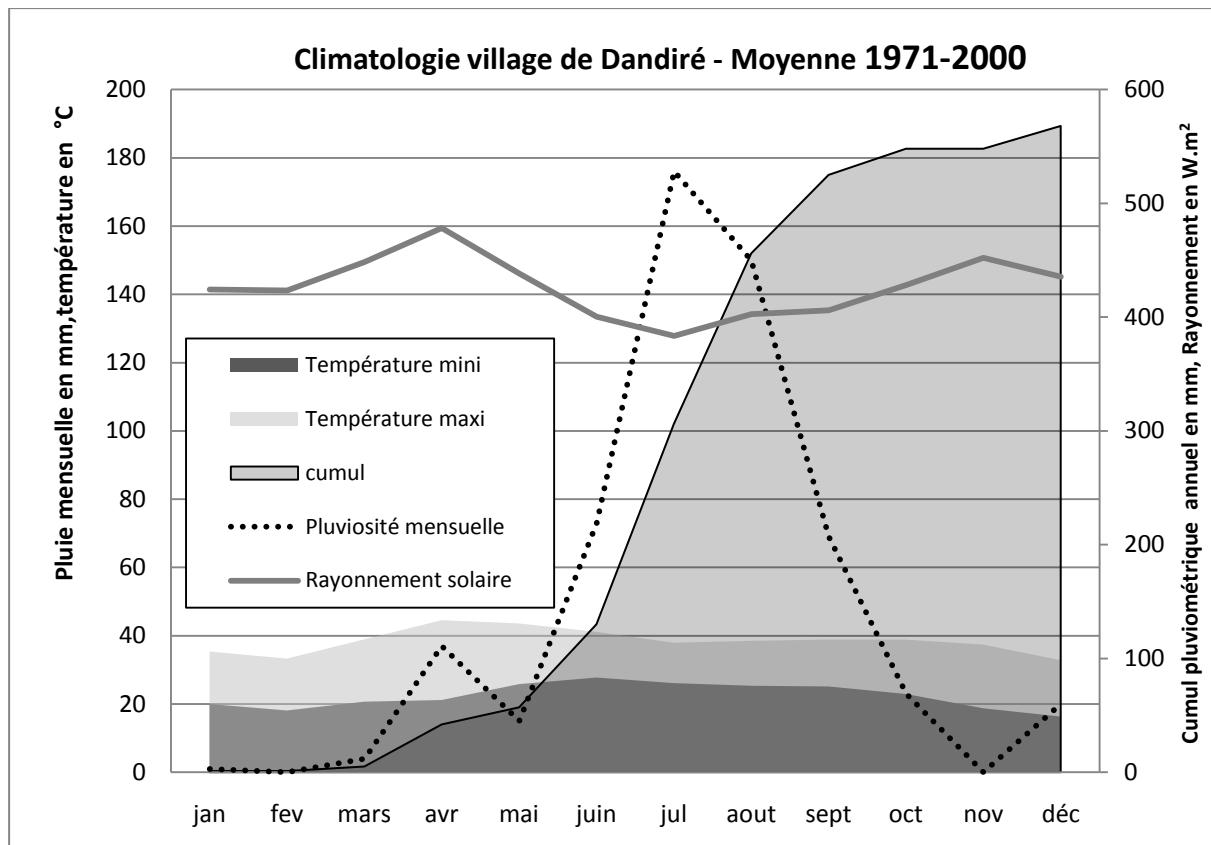


Figure 6-4 : Données climatiques de Dandiré (AGRHYMET et AP3A, 2002)

6.2.4.2 Caractéristiques des sols de l'exploitation

Les propriétés physico-chimiques des sols n'interviennent pas dans le calcul des bilans partiels retenus dans la présente étude. Ces paramètres sont utilisés dans l'évaluation des flux environnementaux. Ces paramètres sont utilisés pour le calcul des stocks d'éléments nutritifs en vue de comparer les bilans partiels à ce stock. La carte des sols disponibles sur le Fakara (Hiernaux, 1996) présentée au chapitre 2 permet d'attribuer aux sols du ménage le type Lixisol arenic. Les intervalles de paramètres physico-chimiques des sols restent très variables pour le même type de sol (Hiernaux, 1996). La structure de NUTMON exige une seule valeur par variable de sol pour une UDE. Les travaux menés sur les sols du Fakara par Weynant (2005) et Olivier (2005) font apparaître de fortes incertitudes quant aux différences dans les propriétés physico-chimiques des sols du Fakara. A partir de ces considérations, la carte des sols de la FAO a été utilisée pour extraire les propriétés des sols en dépit des limites inhérentes aux transpositions d'échelle. Cette alternative permet d'utiliser les mêmes propriétés de sol que celles utilisées dans l'étude de référence sur les bilans des éléments

minéraux en Afrique (Stoorvogel, Smaling *et al.*, 1993b). La table attributaire des sols de la FAO (1991) permet d'identifier un seul type de sol pour le Fakara (Annexe 6.10, Annexe 6.11, Figure 6-5). L'unité de sol correspondant est de type arénosol luvique. Ces types de sol représentent environ 3% de la superficie du territoire et plus de 15% de ses superficies cultivées (FAO, 2000a). Leur texture est sablo-limoneuse avec en moyenne 76 à 79% de sable et une teneur en matière organique qui ne dépasse guère 2% en surface. Ce sont des sols légèrement acides avec des pH entre 4.5 et 6. Leur capacité d'échange cationique (CEC) est faible, de l'ordre de 1 à 1.38 cmol.kg⁻¹. Les teneurs en argile sont inférieures à 7% et dépassent rarement 3.5% dans les horizons de surface. Ces sols ne sont pas adaptés à la fertilisation minérale de par leur faible teneur en matière organique et leur faible capacité de rétention en eau (FAO, 2000a). Les caractéristiques physico-chimiques n'interviennent pas dans le calcul des bilans partiels. Elles sont utiles dans l'évaluation des flux environnementaux et le calcul du stock d'éléments minéraux.

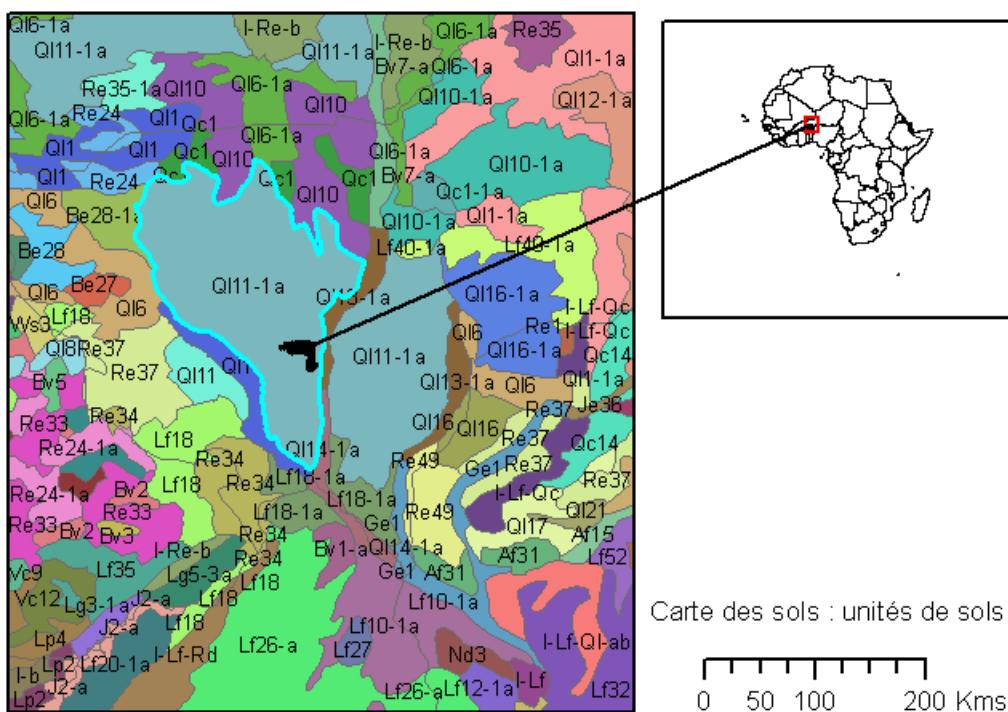


Figure 6-5 : Unités de sols de l'Ouest –Niger issues de la carte des sols de la FAO (1991)

6.2.4.3 Détermination des UDE

L'UDE est une subdivision de l'exploitation agricole en zones homogènes tant sur le plan des propriétés des sols que de la morphologie du terrain. Dans les plans géographiques de l'étude, elle est issue de l'intersection de deux entités : les unités géographiques et le parcellaire des exploitations. Le plan d'information représenté par les unités géographiques, répond de par sa définition, à des entités homogènes sur le plan du type de sol, de la pente, du régime hydrique et de la tenure foncière. Les parties de terre appartenant à une exploitation et qui sont localisées dans la même unité géographique appartiennent à la même UDE. Les terres appartenant à l'exploitation KG95 sont situées dans trois unités géographiques (Figure 6-6). Les deux UDE se répartissent dans les unités géographiques D6, KZ4 et NM3. L'entité se trouvant dans D6 et KZ4 a une superficie de 3.9 ha et celle de NM3, une superficie de 3.1 ha soit 7.0 ha. L'exploitation KG95 a donc 3 UDE situées dans l'unité géographique D6, KZ4 et NM3 (Figure 6-7).

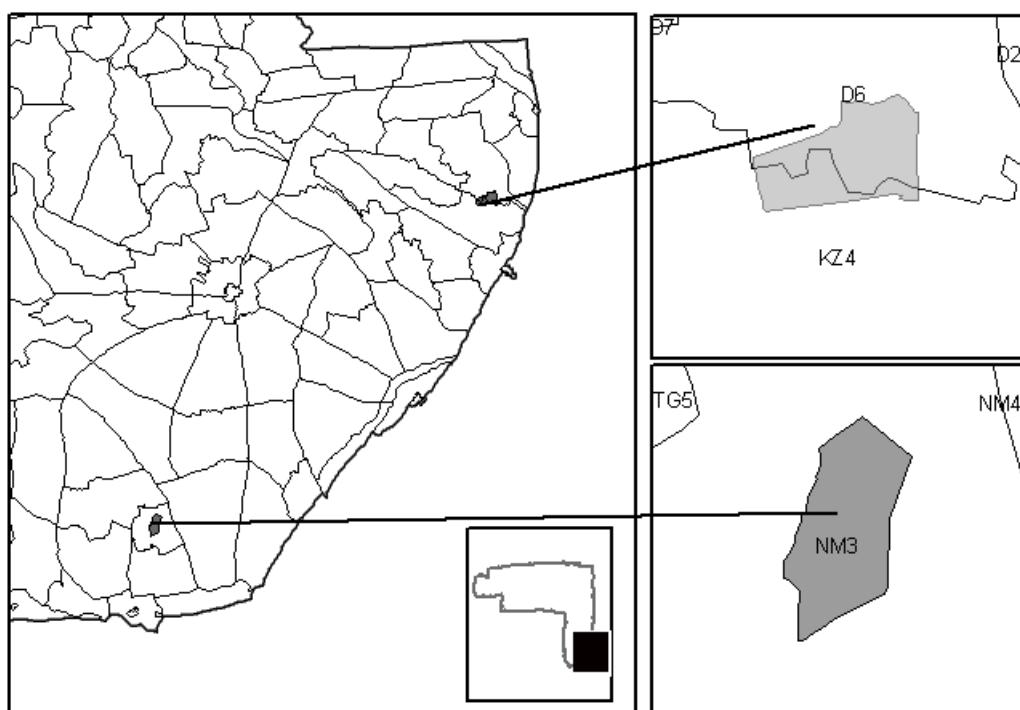


Figure 6-6 : Terres de l'exploitation KG95 dans les unités géographiques

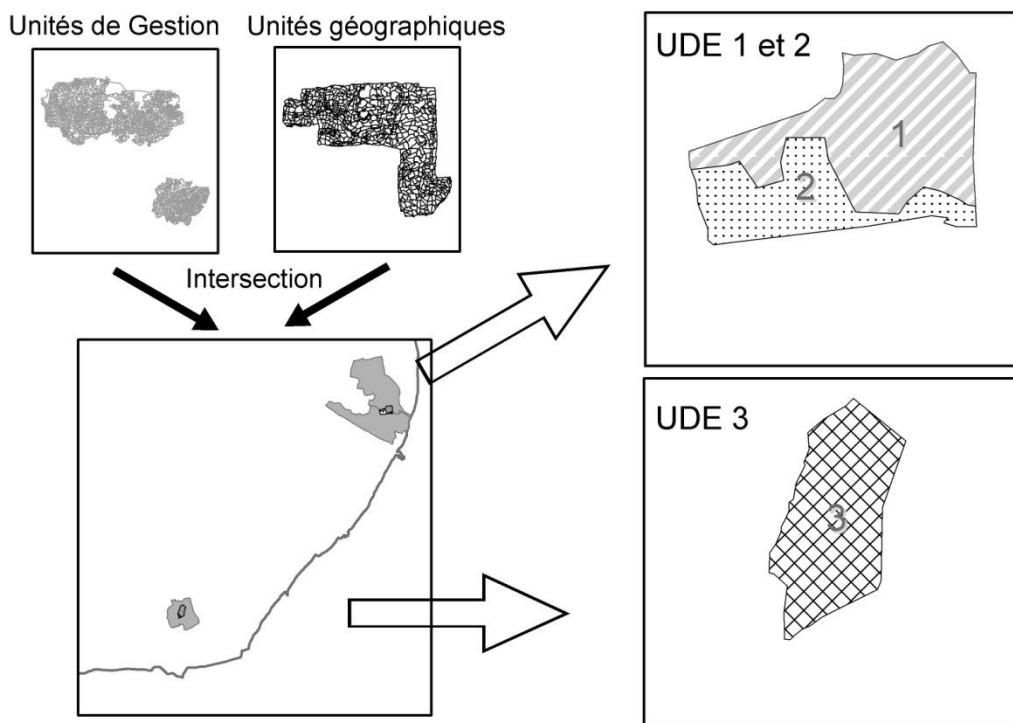


Figure 6-7 : Les UDE de KG95

6.2.4.4 Détermination des UPP de KG95 et attribution des cultures

Les UPP sont les parcelles individuelles cultivées ou non de l'exploitation (Table 6-4). L'UPP est la plus petite entité de l'exploitation agricole. Son statut provient de la carte d'occupation des sols par intersection spatiale avec la carte des UDE. Dans le cas de l'exploitation KG95, l'intersection des trois UDE avec la carte d'occupation des sols donne 5 UPP dont 3 terres cultivées avec fumure et 2 friches (Figure 6-8). Dans certains cas, l'UPP peut appartenir à plusieurs UDE. Dans l'exemple décrit, l'UPP n'est pas subdivisée en plusieurs UDE. Les différentes cultures ont été attribuées aux UPP sur la base des informations de l'inventaire des champs de l'exploitation. Une distinction est faite entre les cultures fumées ou non. En l'absence de culture sur la parcelle, l'UPP peut être une friche, jachère ou incultivable. Les cultures présentes dans les UPP sont le mil, l'arachide, le niébé. Les cultures peuvent être pures ou mixtes. Dans le système NUTMON, le nombre de cultures est limité à 4 sur une seule UPP sur douze mois. Chaque UPP a une durée de présence de douze mois dans le système selon le calendrier agro-pastoral. A l'exception des UPP représentant des sols nus sans végétation, les productions végétales existantes sur l'UPP sont les cultures, les mauvaises herbes dans les champs et les ligneux. Dans les UPP non cultivées (jachères, friches, sols

incultivables), les productions végétales retenues sont les herbacées et les ligneux (Table 6-5). L'UPP N°5 n'étant pas cultivée par KG95, n'est pas prise en compte dans le calendrier cultural. Le cycle de présence de chaque UPP est de 12 mois. La disponibilité des produits des champs cultivés aussi bien pour l'alimentation animale qu'humaine est effective à partir de la récolte (mois d'octobre). La disponibilité des productions végétales des zones non cultivées est permanente toute l'année.

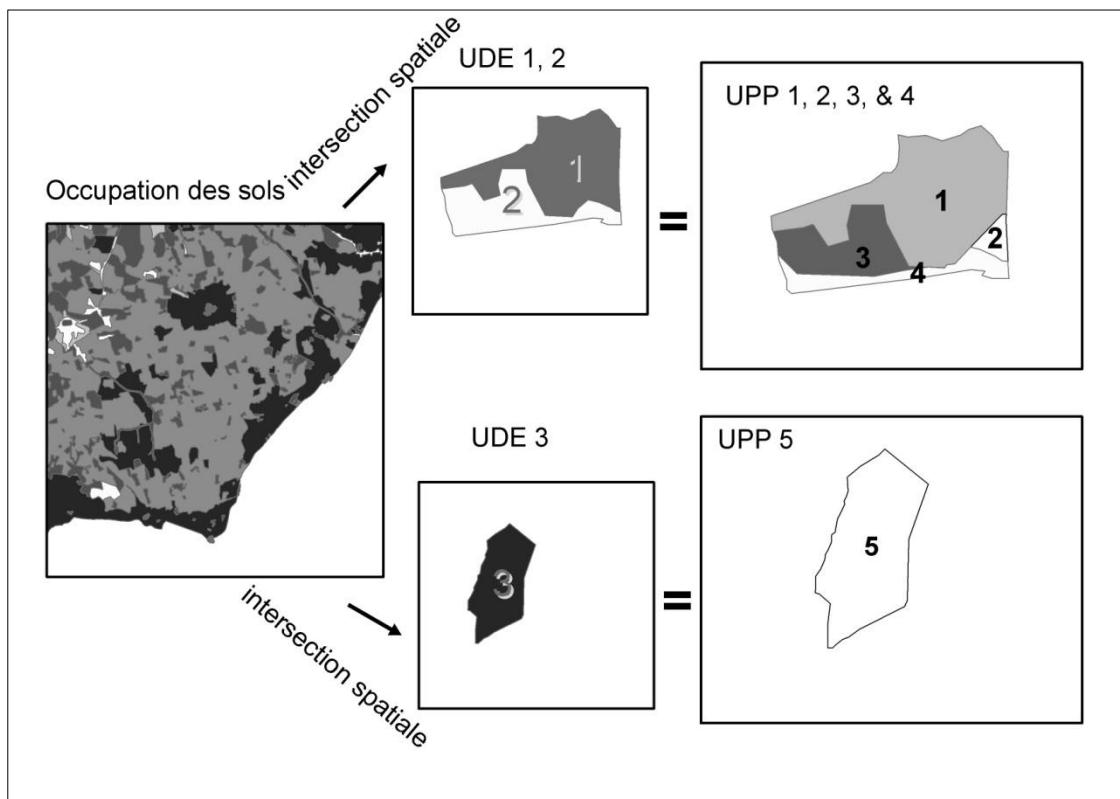


Figure 6-8 : Les UPP de l'exploitation KG95³⁴

6.2.4.5 Détermination des USP

Les USP correspondent aux troupeaux d'animaux domestiques appartenant à l'exploitation familiale. L'exploitation KG95 dispose d'un troupeau bovin, ovin et caprin. Chaque troupeau par espèce est une USP. KG95 a un effectif moyen annuel de 29 têtes de bovins, 21.6 têtes de caprins et 3.5 têtes d'ovins.

³⁴ Pour la référence aux documents de NUTMON, l'UPP est identique au Primary Production Unit (PPU), l'UDE au Farm Section Unit (FSU) et l'USP au Secondary Production unit (SPU)

Table 6-4 : Les unités de production primaires

N° UPP	Description	Culture		Superficie (hectare)	N° UDE	% UDE
		1ère	2ème			
UPP 1	parcelle de UDE 1, champ fumé D6	Mil	Niébé	2.5	2	100%
UPP 2	parcelle de UDE 1 friche D6	Pâturage	Néant	0.13	2	100%
UPP 3	parcelle de UDE 2, Champ fumé KZ4	Mil	Niébé	0.88	2	100%
UPP 4	parcelle de UDE 2, friche KZ4	Pâturage	Néant	0.46	2	100%
UPP 5	parcelle de UDE 3, champ fumé NM3	Néant	Néant	3.11	3	100%

Table 6-5 : Production des différentes UPP

UPP	UG	OC	Type de production	kg.MS/ha	Superficie (ha) UPP	%MS	kg.MF	
UPP1	D6	Champ fumé	Mauvaises herbes	184	2.5	0.5	908.4	
			Fanes de niébé	1500	2.5	0.9	4114.1	
			Feuilles ligneux	31.97	2.5	0.4	197.3	
			Feuilles du mil	648	2.5	0.91	1757.8	
			Gaines du mil	509	2.5	0.9	1396.1	
			Grains de mil	737	2.5	0.89	2044.1	
			Tiges de mil	1931	2.5	0.93	5125.4	
			Graines de niébé	150	2.5	0.89	416.0	
UPP2		Friches	Herbacées	898	0.1	0.95	129.6	
			Feuilles ligneux	417.65	0.1	0.4	143.2	
UPP3	KZ4	Champ fumé	Mauvaises herbes	158	0.9	0.5	278.1	
			Feuilles des arbres	79.92	0.9	0.4	175.8	
			Feuilles du mil	416	0.9	0.91	402.3	
			Gaines du mil	329	0.9	0.9	321.7	
			Grains de mil	428	0.9	0.89	423.2	
			Tiges de mil	1197	0.9	0.93	1132.6	
UPP4		friches	Herbacées	898	0.5	0.95	435.7	
			Feuilles ligneux	284.65	0.5	0.4	328.0	

%MS : Pour cent de matière sèche, kg. MF: kilogramme de matière fraîche, UG: Unité géographique, OC: Occupation des sols

Le suivi des USP est effectué par type d'animal. Le type d'animal correspond, pour chaque espèce, à des catégories de classe d'âge et de sexe. Pour chaque espèce, les catégories retenues sont celles décrites dans le chapitre 4 à savoir les animaux non sevrés, les jeunes mâles et jeunes femelles, les mâles adules, les femelles adultes lactantes ou non. Le suivi est

mensuel pour les troupeaux dans NUTMON. Le recensement du cheptel utilisé dans cette étude a été réalisé environ tous les 21 jours. L'adaptation du suivi de 21 jours aux exigences mensuelles des bases de données de NUTMON a été réalisée en considérant chaque jour d'enquête comme un passage mensuel. La moyenne des effectifs est prise en compte dans le cas de plusieurs passages au cours du même mois. Seuls sont pris en compte les passages où l'effectif n'est pas nul. Le nombre d'animaux en début et fin de période est renseigné pour chaque période et pour chaque type d'animal. Les sorties et entrées du cheptel à savoir les naissances, les achats, les ventes, les mortalités, les transferts, les transhumances sont renseignées pour l'évaluation des flux économiques.

6.2.4.6 Détermination des Unités de redistribution (UR)

Les UR sont les lieux de repos et de parage des animaux au cours du suivi. L'UR est localisée dans une UPP ou une UDE. Cette localisation de l'UR a une implication dans la répartition des déjections animales. Moins elle est précise, plus la surface de redistribution sera grande. Les lieux de repos nocturne de l'exploitation prise en exemple sont au nombre de deux et sont localisés dans les UDE. Les latrines sont aussi considérées comme des UR.

6.2.4.7 Simulation de la pâture

La pâture, le repos diurne et nocturne sont pris en compte dans cette simulation. Le nombre de nuits et de jours est quantifié pour chaque activité. Les informations utilisées pour la reconstitution de ces données proviennent des itinéraires suivis par le bétail (Annexe 6.12). Ces itinéraires sont constitués par les occupations des sols dans les unités géographiques. L'information utilisée est le nombre de jours et de nuits passés par les différents troupeaux dans les unités. La pâture a lieu dans une UPP. Dans les cas où l'UPP n'est pas connue avec précision, l'UDE a été considérée dans tous les cas. En effet, dans les terres d'une exploitation, plusieurs parcelles de même nature (cultivées ou non) peuvent se retrouver dans une unité géographique et la distinction sur la parcelle visitée n'a pas été faite. L'UDE est alors considérée comme un lieu de pâture et de repos dans ce cas. Les journées de pâture à l'extérieur des unités de l'exploitation sont localisées dans l'unité EXT dans l'approche NUTMON. Il en est de même pour la pâture nocturne. La durée moyenne de la pâture journalière (marche, abreuvement, rumination et pâture) retenue est de 10 heures et celle de la pâture nocturne de 5 heures pour la conversion des durées de pâture en nombre de jours et de

nuits (cf. chapitre 5) enregistrées en minutes. La transhumance, non prise en compte dans le calcul des flux liés à l'ingestion et l'excrétion dans les occupations de sols par NUTPAST, est considérée dans l'approche NUTMON au même titre que les déplacements hors de l'exploitation. En effet, les animaux en transhumance hors du terroir n'influent pas directement sur les ressources naturelles gérées dans le terroir surtout en termes d'ingestion et d'excrétion.

La simulation des déplacements des troupeaux de KG95 (Annexe 6.12) fait ressortir au cours des 12 mois étudiés, que le troupeau bovin passe respectivement 33% et 36% du temps de pâture diurne et nocturne dans ses exploitations. L'évaluation des flux réalisée par NUTPAST dans les chapitres précédents prend en compte l'ensemble des informations sur les unités traversées (Figure 6-9). Elle omet cependant les journées de transhumance qui représentent 23% de la pâture diurne.³⁵ Les journées et les nuits de pâture qui se déroulent hors de l'exploitation sont considérés dans une seule unité (simulation réalisée avec l'approche NUTMON (Figure 6-10). Cette généralisation porte sur 67% du temps de pâture diurne et 64% du temps de la pâture nocturne. La généralisation dans l'approche NUTMON de la pâture externe est de 66% pour les troupeaux caprins qui pâturent avec les bovins. Les ovins pâturent uniquement dans les UPP de l'exploitation KG95. Il n'y a pas de pâturage nocturne chez les petits ruminants. Les lieux de repos sont connus avec précision dans l'approche NUTPAST à l'intérieur et à l'extérieur des terres de l'exploitation en dehors des périodes de transhumance. Dans l'approche NUTMON, les lieux de repos dans l'exploitation et les lieux de parage sont considérés comme des UR.

³⁵ Le non prise en compte de la transhumance n'a pas d'impact sur les bilans des UPP.

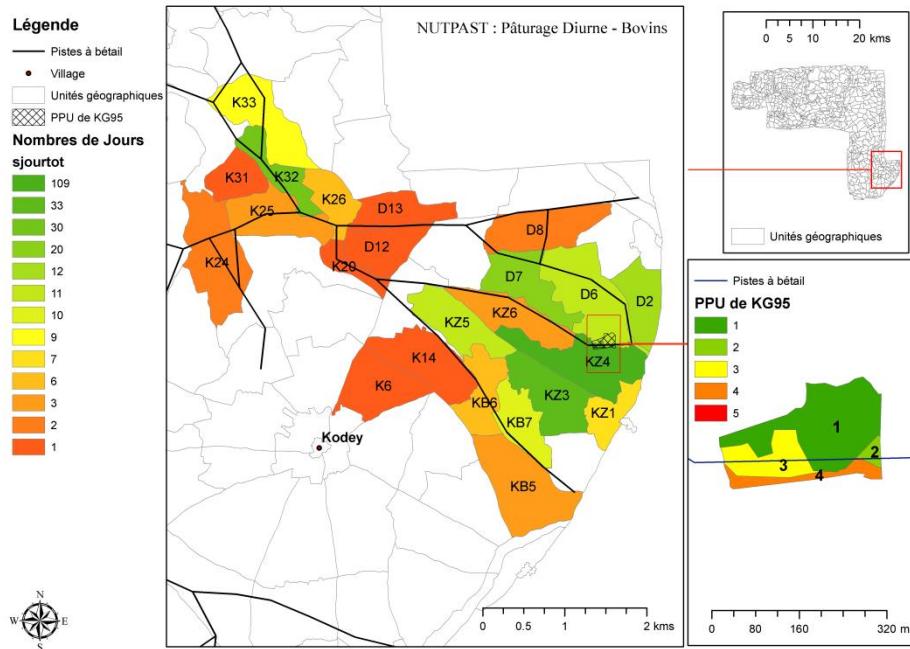


Figure 6-9 : Zone de parcours des troupeaux de KG95 – Situation NUTPAST

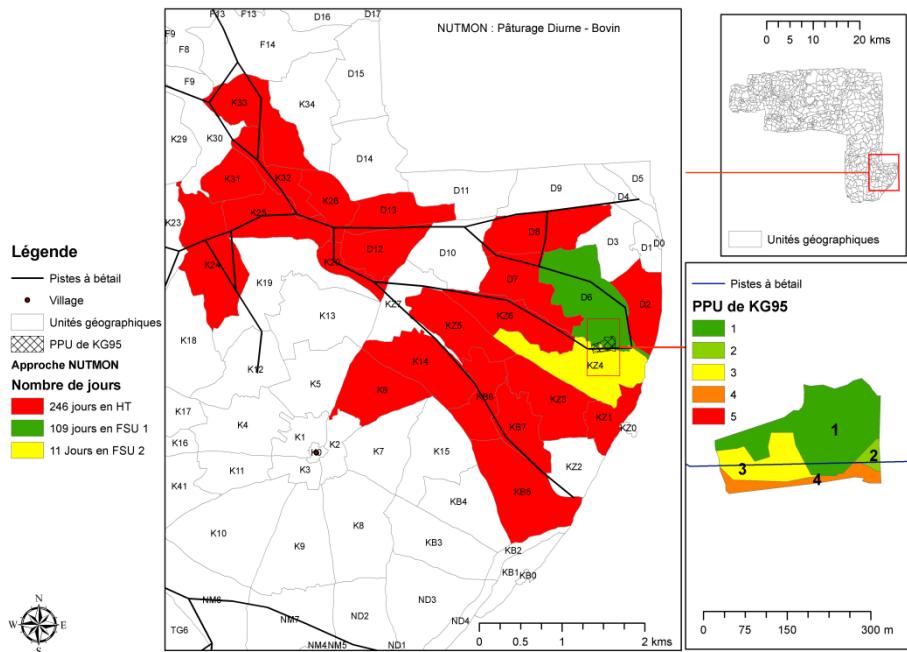


Figure 6-10 : Zone de parcours des troupeaux de KG95 – Situation NUTMON

Les figures 6-9 et 6-10 représentent les unités géographiques traversées au cours d'une année par le troupeau de KG 95. Le nombre de jours passé exactement par UG est pris en compte dans NUTPAST pour le calcul des quantités de fourrage ingérées et de déjections animales. Dans le cas NUTMON, ces itinéraires ne sont pas pris en compte et seul est pris en compte le détail des durées dans les parcelles de l'exploitation.

6.2.5 Analyse statistique

Les études de bilan conduites en ASS ont montré qu'il existe une forte relation entre les caractéristiques des exploitations et les bilans étant donné les différences de gestion de la fertilité des sols (Baijukya et Steenhuijsen Piters, 1998; Tittonell, Vanlauwe *et al.*, 2005; Zingore, Murwira *et al.*, 2007), l'importance du bétail (Elias, Morse *et al.*, 1998) et la disponibilité de la main d'œuvre agricole et pastorale (Turner et Hiernaux, 2008). L'une des modalités d'analyse des données a donc été les classes d'exploitations établies par l'ILRI. Les autres modalités de comparaison sont le terroir, Banizoumbou , Tchigo Tegui et Kodey, les modalités relatives à l'occupation des sols, culture non fumée , culture fumée , jachère , friche , sol incultivable, zone habitable. Les modalités relatives au type d'exploitation sont, gestionnaire et non gestionnaire . Les modalités relatives aux classes d'exploitation sont au nombre de 5, camp pauvre , camp riche , villageois pauvre, villageois riche, villageois gestionnaire. Ces classes d'exploitation créées à l'origine par le programme ILRI sont basées sur une typologie socio-économique (La Rovere, Hiernaux *et al.*, 2002) selon les critères liés à l'importance des terres, du bétail et le type d'habitat (campement ou village). Les caractéristiques statistiques des différentes classes sont les suivantes:

- Villageois gestionnaires, habitat village et troupeau > 5 UBT
- Villageois riches, habitat village et troupeau < 1.5 UBT, terres cultivables > 2.5 ha / adulte
- Villageois pauvres, habitat village et troupeau < 1.5 UBT, terres cultivables < 2.5 ha /adulte
- Campements riches (CR), Habitat campements et troupeau > 5 UBT, terres cultivables > 2.5 ha / adulte
- Campements pauvres (CP), habitat campement et troupeau > 1.5 UBT et terre < 2.5 ha / adulte

Les bilans partiels de NUTPAST ont été évalués par UPP et par exploitation agricole. Les bilans partiels obtenus par les deux approches, NUTPAST et NUTMON ont été mis en relation par la méthode de régression linéaire simple afin de vérifier la valeur additionnelle des ajustements réalisés. Les moyennes pondérées par la superficie totale des terres ont été comparées entre elles. Une description des flux a été réalisée selon les différents types d'UPP et d'exploitation pour montrer l'importance des flux et leur origine.

Des comparaisons statistiques ont été réalisées entre les différentes catégories afin de mettre en relief l'hétérogénéité entre elles (UPP, exploitation et terroir). **L'existence de fortes corrélations entre les bilans partiels des différents éléments nutritifs a permis de limiter la plupart des analyses statistiques au bilan partiel de l'azote.** Pour les comparaisons des moyennes, les conditions d'égalité des variances ont été testées de manière systématique (Dagnelie, 2007b) afin de faire le choix entre les méthodes paramétriques et non paramétriques. En égard à la nature statistique de la distribution des données de bilan partiel dans les exploitations, avec plusieurs données extrêmes et non normales, les comparaisons des distributions du bilan partiel en fonction des variables qualitatives (terroir, exploitation, occupation des sols) ont été réalisées par le test de Wilcoxon / Kruskal-Wallis³⁶. Ce test appelé aussi test de la somme des rangs a été réalisé par la procédure non paramétrique (PROC NPAR1WAY, SAS, 2004b). Ces tests sont basés sur une approximation de la statistique de Khi- carré (χ^2). L'analyse des données et les codes utilisés ont été générés à partir du logiciel SAS/STAT software, Version 9.1 du système SAS³⁷

³⁶ Pour la comparaison de deux populations, le test de Wilcoxon est approprié et pour tout nombre de population, le test de Kruskal-Wallis est approprié.

³⁷ (Copyright (c) 2002-2003 SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. SAS and all other SAS Institute Inc. product or service names are registered trademarks or trademarks of SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

6.3 Résultats : flux et bilans partiels des UPP et de l'exploitation

Les résultats obtenus avec l'exploitation KG95 sont présentés à titre d'illustration des deux approches, celle de NUTMON et de NUTPAST. Les résultats de l'ensemble des exploitations issus des agrégations de flux et bilans des unités primaires à l'aide du système d'information géographique sont présentés par la suite.

6.3.1 Les flux et bilans de l'exploitation KG95 par l'approche NUTMON

Les bilans partiels de KG95 (Table 6-6) pour chaque UPP sont tous négatifs pour les 3 éléments nutritifs, azote, phosphore et potassium avec des déficits respectifs moyens de -74, -6.2 et -30.4 kg/ha. Ces déficits sont essentiellement liés aux fortes exportations de résidus de culture et aux faibles apports d'amendements organiques. Les apports d'azote dans les UPP sont effectués exclusivement dans les champs fumés avec des valeurs atteignant 8 kg /ha pour l'UPP1 et 2.9 kg/ha pour l'UPP2. Le rapport complet de l'exploitation KG95 selon l'approche NUTMON est présenté en annexe 6.13. Les flux issus des productions végétales proviennent des résidus de récoltes et des graines de mil ou de niébé. Ils représentent respectivement 16.1 et 2.6 tonnes de matière sèche. La quantité restituée par les animaux dans les parcelles de l'exploitation est de 2.2 tonnes de matière sèche. Pendant la pâture externe, le bétail a bénéficié de 17.5 tonnes de matière sèche. Il a restitué 10.2 tonnes de matière sèche dans les zones qu'il a parcourues. Le taux de recyclage global de la matière sèche par le bétail est de 37%. *Ce recyclage est en faveur des terres extérieures à l'exploitation au détriment des parcelles de l'exploitation.* Les sources d'alimentation du bétail, représentées par le pâturage externe et la production des UPP, varient suivant les saisons avec un plus grand apport de la pâture externe en hivernage et en fin de saison sèche (Figure 6-11). Dans la pâture externe simulée dans l'approche NUTMON, la distinction n'est pas faite entre l'accès aux résidus des autres champs et le pâturage naturel.

Les bilans partiels établis sur la base des apports de déjections animales et de la production végétale dans les UPP sont négatifs. Pour les cultures ayant reçu de la fumure animale, le bilan partiel de l'azote est de -93.1 et -67.5 kg/ha. Les bilans des autres éléments nutritifs sont aussi négatifs. *Ces bilans partiels des cultures fumées sont influencés par les quantités de produits récoltés sans une réelle compensation des pertes par des apports organiques.* Cette tendance des bilans dans l'approche NUTMON est aussi liée à la non prise en compte des

apports des autres exploitations dans celui de KG95 pendant l'exploitation des pâturages communautaires. Les résidus non consommés par le bétail sont considérés comme perdus.

Table 6-6: Flux et bilans partiels N, P et K calculés par NUTMON pour KG95

Bilan d'azote des UPP								
Flux	IN1	IN2	IN2b	OUT1	OUT2a	OUT2b	Bilan partiel	
unités	kg	kg	kg	Kg	Kg	kg	kg	kg/ha
UPP1	0	8	6.8	49.4	187.2	7.9	-229.7	-93.1
UPP2	0	0	0	0	4.5	0	-4.5	-32.9
UPP3	0	2.9	16.2	7.3	37.2	33.9	-59.4	-67.5
UPP4	0	0	7.8	0	13.1	42.4	-47.7	-103.6
Bilan de phosphore des UPP								
Flux	IN1	IN2	IN2b	OUT1	OUT2a	OUT2b	Bilan partiel	
unités	kg	kg	kg	Kg	Kg	kg	kg	kg/ha
UPP1	0	3	1	12.5	14.2	0.6	-23.4	-9.5
UPP2	0	0	0	0	0.4	0	-0.4	-2.7
UPP3	0	1.1	2.3	2.3	2.8	2.6	-4.4	-5
UPP4	0	0	1.1	0	1.1	3.6	-3.5	-7.7
Bilan de potassium des UPP								
Flux	IN1	IN2	IN2b	OUT1	OUT2	OUT2b	Bilan partiel	
unités	kg	kg	kg	Kg	kg	kg	kg	kg/ha
UPP1	0	6.7	2.2	18.4	122.1	5.2	-136.7	-55.4
UPP2	0	0	0	0	1.4	0	-1.4	-10.3
UPP3	0	2.4	4.8	2.1	23.1	22.4	-40.4	-45.9
UPP4	0	0	2.3	0	4.6	2.3	-4.6	-10

Les bilans des éléments minéraux dans les 2 friches apparaissent aussi très négatifs. Les bilans partiels calculés par NUTMON pour les UDE sont issus de l'agrégation des différents UPP et apparaissent également très négatifs, -90.7 et -78.1 kg/ha respectivement pour l'UDE1 et l'UDE2. La notion de bilan à l'échelle de l'exploitation n'est pas une agrégation des bilans des UDE ou des UPP. Dans l'approche NUTMON, le bilan de l'exploitation ne tient pas compte des flux internes, mais des flux entrants et des flux sortants de l'exploitation. Dans le cas traité ici, les entrées évaluées sont représentées seulement par la pâture externe. Les sorties liées à des ventes de produits récoltés ou aux ventes de bétail n'ont pas été évaluées.

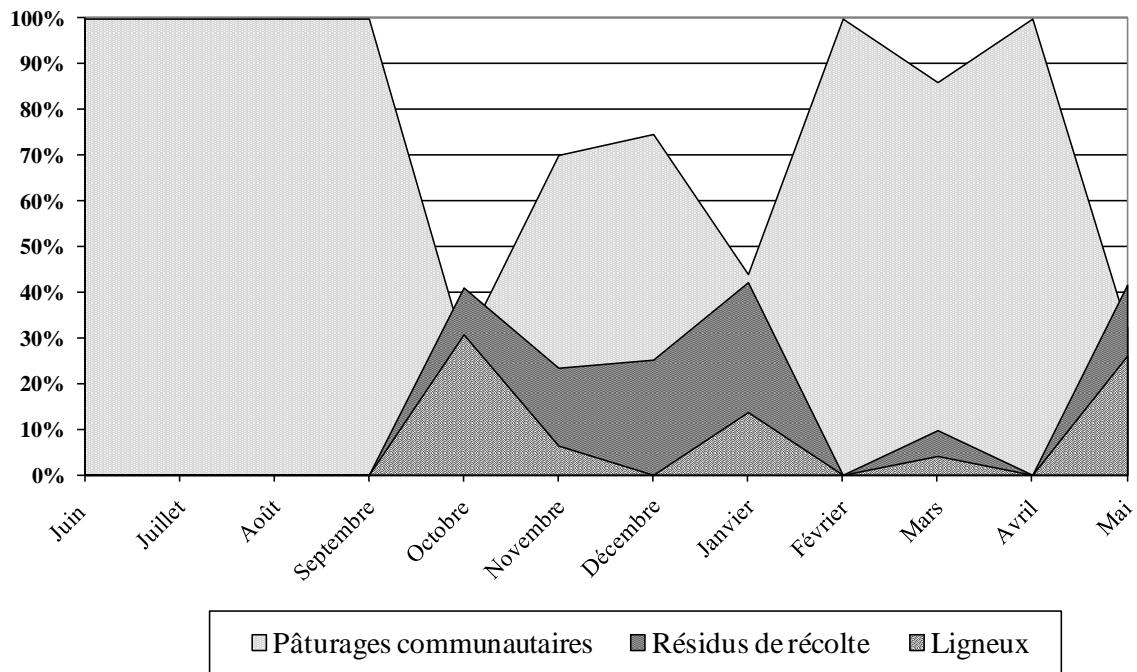


Figure 6-11: disponibilités des masses végétales par type de parcours et selon la période

Les différents flux et bilans partiels calculés à ce stade restent incomplets car l'impact de la pâture dans l'exploitation des animaux n'appartenant pas à l'exploitation n'a pas été pris en compte. Le recyclage issu de cette pâture ne donne pas un bilan nul et est fonction de la durée de pâture et de la disponibilité de ressources alimentaires végétales (chapitre 5). De même, la variation de la composition de la ration alimentaire à l'extérieur de l'exploitation est aussi omise.

6.3.2 Les flux et bilans de l'exploitation KG95 par l'approche NUTPAST

Les ingestions et excréptions par unité de surface dans les occupations des sols et dans l'unité géographique, calculés par NUTPAST sont réattribuées à l'aide du SIG aux entités UPP de KG95 pour l'évaluation de leur bilan. Les flux évalués par NUTPAST (chapitre 5) prennent en compte la mobilité de tous les troupeaux suivis du Fakara, les prélevements de fourrage (OUT2a) et l'excrétion (IN2b) dans les UPP de l'exploitation. L'ajustement de ces flux (Tableau 6.7) entraîne des variations importantes de l'ordre de 67% à 93% pour l'azote par exemple avec des bilans positifs de phosphore pour l'UPP2 et de potassium pour l'UPP2 et l'UPP4. Le bilan de l'azote reste cependant toujours négatif pour cette exploitation. Les exportations de résidus de KG95 sont de l'ordre de 30%. Les gestionnaires utilisent le plus

souvent ces résidus pour les vaches laitières ou les animaux qui restent dans les concessions après le départ en transhumance. L'utilisation par ces animaux très peu nombreux (1 à 2 vaches) de ces résidus ne modifie que de façon négligeable, le bilan partiel ajusté par NUTPAST.

Table 6-7 : Flux et bilans partiels N, P et K de KG95 corrigés par NUTPAST

Bilan partiel d'azote des UPP (NUTPAST)						
Flux	IN1	IN2a	IN2b	OUT1	OUT2a	Bilan partiel
unités	kg	kg	kg	kg	kg	kg/ha
UPP1	0	8	4.95	49.4	3.62	-16.2
UPP2	0	0	2.93	0	3.45	-3.8
UPP3	0	2.9	2.46	7.3	2.31	-4.8
UPP4	0	0	8.12	0	23.94	-34.3

Bilan partiel de phosphore des UPP (NUTPAST)						
Flux	IN1	IN2a	IN2b	OUT1	OUT2	Bilan partiel
unités	kg	kg	kg	kg	kg	kg/ha
UPP1	0	3	0.79	12.5	0.27	-3.6
UPP2	0	0	0.47	0	0.26	1.5
UPP3	0	1.1	0.39	2.3	0.17	-1.1
UPP4	0	0	1.29	0	1.83	-1.2

Bilan partie de potassium des UPP (NUTPAST)						
Flux	IN1	IN2a	IN2b	OUT1	OUT2a	Bilan partiel
unités	kg	kg	kg	kg	kg	kg/ha
UPP1	0	6.7	4.14	18.4	5.63	-5.3
UPP2	0	0	2.45	0	0.45	14.6
UPP3	0	2.4	2.06	2.1	3.46	-1.3
UPP4	0	0	6.79	0	2.32	9.7

6.3.3 Analyse des flux et bilans partiels de l'ensemble des exploitations suivies

6.3.3.1 Les caractéristiques des exploitations étudiées

Les flux et bilans partiels ont été évalués dans l'approche NUTMON sur 469 exploitations soit 95% de l'échantillon d'exploitations suivies. Celles qui ont été exclues de l'évaluation présentaient des inconsistances liées à des données incomplètes dans l'évolution des troupeaux. La répartition des exploitations dans les trois terroirs est respectivement de 40%, 36% et 24% pour Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey. La population totale concernée est de 4415 habitants avec 39%, 38% et 23% pour Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey (Table 6-8). Les superficies cultivées dans les trois terroirs représentent 43% des terres appartenant aux exploitations avec une norme de 5.3 ha /adulte actif. Le bétail détenu dans les exploitations représente 1863 UBT avec en moyenne 1.8 UBT/ adulte actif. La distribution du bétail est fonction de la conduite de l'élevage et de l'importance du cheptel (Table 6-9). Le nombre d'UBT par exploitation gestionnaire est de 10.8 ± 0.8 . Il est de 1.3 ± 0.3 dans les exploitations non gestionnaires. En revanche, les terres appartenant aux non gestionnaires sont supérieures à celles des gestionnaires (Annexe 6.14).

Table 6-8 : Importance de la population et des terres dans les exploitations étudiées

Terroir	Classe	Nombre de familles	Population	Nombre d'actifs	Surface des terres (ha)	Surface cultivée (ha)	UBT Total
Banizoumbou	Gestionnaire	34	353	112.1	753.5	263.3	346.3
	Non Gestionnaire	154	1363	330.4	5200.6	1514.4	156.1
Tchigo Tegui	Gestionnaire	43	405	111.6	545.9	303.9	487.4
	Non Gestionnaire	125	1288	208.1	3843	1669.1	199
Kodey	Gestionnaire	55	538	144.7	568.8	457.8	588.8
	Non Gestionnaire	58	468	100.8	1647.5	1133.3	85.1
Total des 3 terroirs		469	4415	1007.8	12559.4	5341.8	1862.6

Table 6-9 : Caractéristiques moyennes des exploitations étudiées

Terroir	Gestionnaire			Non gestionnaire		
	Nbre d'habitants	Surface cultivée (ha)	UBT moyen	Nbre d'habitants	Surface cultivée (ha)	UBT moyen
Banizoumbou	10.4 \pm 1.1	7.7 \pm 1.3	10.2 \pm 1.5	8.9 \pm 0.3	9.8 \pm 0.6	1 \pm 0.4
Tchigo Tegui	9.4 \pm 0.8	7.1 \pm 0.9	11.3 \pm 1.6	10.3 \pm 0.6	13.4 \pm 1.1	1.6 \pm 0.5
Kodey	9.8 \pm 0.5	8.3 \pm 0.7	10.7 \pm 1.3	8.1 \pm 0.5	19.5 \pm 1.7	1.5 \pm 0.5
Ensemble	9.8 \pm 0.4	7.8 \pm 0.5	10.8 \pm 0.8	9.3 \pm 0.3	12.8 \pm 0.6	1.3 \pm 0.3

6.3.3.2 Adaptation de la mobilité globale du troupeau au concept de NUTMON

L'adaptation de la mobilité du cheptel dans le système NUTMON nécessite l'évaluation du nombre de jours et de nuits de pâture à l'extérieur (EXT) et à l'intérieur des UPP de l'exploitation. Cette évaluation a été réalisée à partir des itinéraires suivis par les troupeaux et la durée de pâture dans les unités géographiques. La pâture diurne effectuée en dehors des exploitations des gestionnaires représente, sur une année, plus de 3 journées sur 4, et la pâture nocturne plus de 2 journées sur 3 (Annexe 6.15). Ces zones pâturées par les bovins dans la journée et agrégées dans une seule unité EXT, représentent 83% des superficies totales visitées par les troupeaux dans la journée et 60% dans la nuit (Figure 6-12). La productivité végétale à l'hectare des unités pâturées est très hétérogène (chapitre 3). Pour les non gestionnaires qui n'ont pas fait l'objet de suivi au parcours comme les gestionnaires, les nombres de jours et de nuits passés dans les différentes unités sont issus des hypothèses et simplifications émises pour leur déplacement (Chapitre 5). Dans ces hypothèses, les terres de l'exploitation sont utilisées par les troupeaux des non-gestionnaires pendant l'hivernage et pendant la récolte pour éviter les dégâts sur les champs voisins. Le pâturage communautaire est utilisé en saison sèche. En hivernage, les animaux sont surtout au piquet, ou surveillés pour éviter les dégâts au champ. Les non gestionnaires ne pratiquent pas la pâture nocturne (Annexe 6.16).

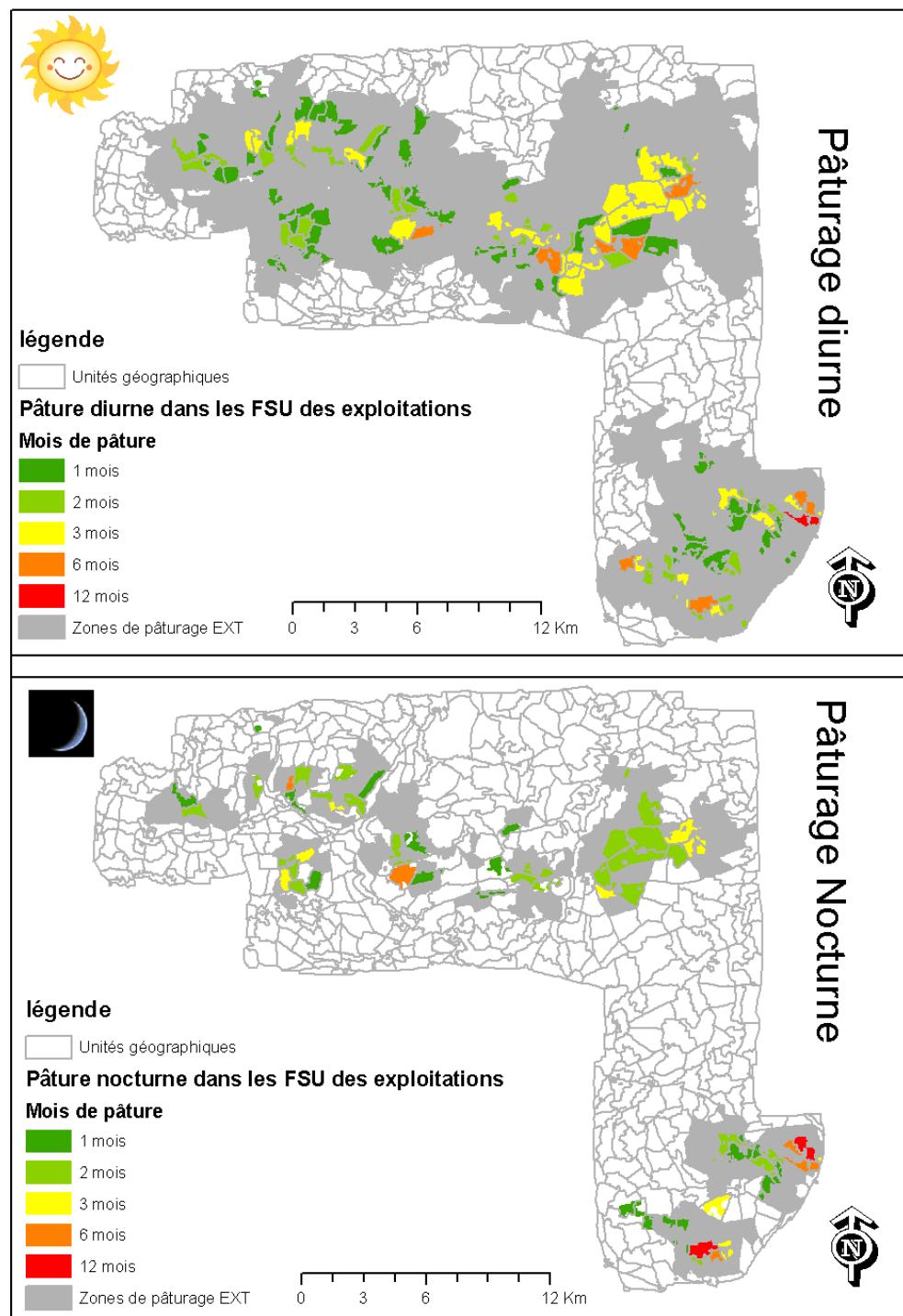


Figure 6-12: Représentation des unités du circuit de pâture nocturne et diurne

Cette carte indique la globalisation faite par NUTMON dans les déplacements des troupeaux. Seules les parties représentant les UDE ou FSU des exploitations sont prises en compte. La partie grisée est considérée comme externe (EXT) et homogène sur le plan de l'ingestion et de l'excrétion animales.

6.3.3.3 Evaluation des flux agropastoraux dans l'approche NUTMON

6.3.3.3.1 Les flux liés aux unités de production primaire et secondaire: culture et élevage

Les unités de production primaire constituent la source des productions végétales dans l'exploitation. Les flux évalués dans les UPP et retenus dans cette étude sont les flux liés aux apports d'engrais, de fumure et aux exportations d'éléments nutritifs par les productions végétales. Les flux liés aux unités de production secondaire, c'est-à-dire les troupeaux d'élevage, considérés ici sont l'ingestion et l'excrétion fécale. Les apports d'engrais relevés sont des engrains minéraux³⁸ (l'urée 46-0-0, le Di-ammonium phosphate (D.A.P – 18-46-0), l'engrais 15/15/15 et le fumier. Les quantités d'engrais minéral rapportées aux superficies totales concernées sont respectivement pour l'urée, le DAP et le 15/15/15 de 47.1 ± 54.7 , 144.6 ± 52.9 et 140.4 ± 23.1 kg/ha (Table 6-10). Les trois types d'engrais minéraux sont utilisés à Banizoumbou et à Tchigo Tegui. Les agriculteurs de Kodey utilisent davantage l'engrais 15/15/15 qui se révèle être le plus utilisé dans les trois terroirs avec un flux entrant total de 5.6 tonnes. Les déjections fécales apportées ou déposées lors de la pâture sont en moyenne de 843.0 ± 67.3 kg.MS/ha. Cette moyenne masque des différences entre les déjections fécales apportées par le propriétaire du champ et celles déposées lors de la pâture sur les mêmes UPP. Pour les UPP ayant la typologie champ fumé, les doses moyennes des apports par l'exploitant (parcage et apport manuel) et les dépôts par pâture sont respectivement de 1214.0 ± 81.7 kg.MS/ha et 47.9 ± 4.2 kg.MS/ha. Dans les autres parcelles cultivées, les dépôts de déjections animales sont en moyenne de 14.7 ± 1.1 kg/ha³⁹.

³⁸ Ces engrais sont vulgarisés au NIGER avec l'appui de la FAO dans le cadre du projet promotion de l'utilisation des intrants agricoles pour les organisations des producteurs. Les doses recommandées par ce programme sont respectivement de 2 g de DAP et 6 g de 15-15-15 par poquet pour la culture du mil.

³⁹ Cf. Chapitre 3.3 pour les dépôts lors de la pâture évalués au niveau spatial qui sont supérieurs à ceux calculés par NUTMON

Table 6-10: Dose moyenne de fumure minérale et organique

Terroir	Type culture	Urée	DAP	15/15/15	Fumure
Banizoumbou	Cultures	. .	. .	. .	18.8 ± 2.7
	Cultures fumées	94 ± 90.6	97.7 ± 81.2	140 ± 23.8	1600.3 ± 241.9
Tchigo Tegui	Cultures	. .	. .	. .	33.0 ± 4.7
	Cultures fumées	3.6 .	168 ± 79.8	220 ± 46.8	3725.4 ± 266.0
Kodey	Cultures	. .	. .	. .	47.0 ± 7.1
	Cultures fumées	. .	. .	12.1 ± 0.0	1897.1 ± 300.6
Ensemble (unité=kg/ha)		47 ± 54.7	145 ± 52.9	140 ± 23.1	843.0 ± 67.3

Table 6-11: Quantité d'azote par hectare par terroir, par type de culture et par type d'engrais

Terroir	Type culture	Urée	DAP	15/15/15	Fumure
Banizoumbou	Cultures	. .	. .	. .	0.4 ± 0.1
	Cultures fumées	39.6 ± 38.0	17.6 ± 14.6	21 ± 3.6	25.4 ± 3.8
Tchigo Tegui	Cultures	. .	. .	. .	0.7 ± 0.1
	Cultures fumées	1.5 .	30.3 ± 14.4	32.9 ± 7.0	58.9 ± 4.2
Kodey	Cultures	. .	. .	. .	1.0 ± 0.1
	Cultures fumées	. .	. .	1.8 ± 0.0	30.2 ± 4.7
Ensemble		19.8 ± 23.0	26 ± 9.5	21.1 ± 3.5	13.5 ± 1.1

Unité : Kg/ha

Table 6-12: Quantité de phosphore par hectare par terroir, par type de culture et par type d'engrais

Terroir	Type culture	DAP	15/15/15	Fumure
Banizoumbou	Cultures	. .	. .	0.1 ± 0.0
	Cultures fumées	20.5 ± 17.0	9.1 ± 1.5	9.2 ± 1.4
Tchigo Tegui	Cultures	. .	. .	0.1 ± 0.0
	Cultures fumées	35.3 ± 16.8	14.3 ± 3.0	21.3 ± 1.6
Kodey	Cultures	. .	. .	0.1 ± 0.0
	Cultures fumées	. .	0.8 ± 0.0	10.5 ± 1.8
Ensemble		30.4 ± 11.1	9.1 ± 1.5	4.7 ± 0.4

Unité : Kg/ha

Table 6-13: Quantité de potassium par hectare apporté par terroir, par type de culture et par type d'engrais

Terroir	Type culture	15/15/15	Fumure
Banizoumbou	Cultures	. .	0.1 ± 0.0
	Cultures fumées	17.5 ± 3.0	20.7 ± 3.2
Tchigo Tegui	Cultures	. .	0.2 ± 0.0
	Cultures fumées	27.4 ± 5.9	48.1 ± 3.5
Kodey	Cultures	. .	0.2 ± 0.0
	Cultures fumées	1.5 ± 0.0	23.6 ± 4.0
Ensemble		17.5 ± 2.9	10.6 ± 0.9

Unité : Kg/ha

Les apports d'engrais minéraux dans les champs, même en quantité faible, apportent plus d'éléments minéraux par unité de surface que la pâture et le dépôt manuel (Table 6-11, Table 6-12, Table 6-13). Cet apport est toujours couplé à l'utilisation de déjections animales. Les superficies concernées restent faibles. Dans les champs fumés, l'apport de déjections animales par la pâture ne représente que 4% du total. Le parage dans les champs et l'apport manuel représentent 96% des apports de déjections fécales. Sur l'ensemble des UPP cultivées, l'apport de déjections fécales par la pâture représente seulement 7%. En considérant toutes les UPP, les déjections fécales apportées par la pâture représentent 11% du total des déjections déposées sur les UPP par toutes les voies. Dans la répartition de ces déjections, les champs fumés reçoivent la plus grande partie, de l'ordre de 37% et les champs non fumés et jachères reçoivent respectivement 23% et 29% (Figure 6-13)

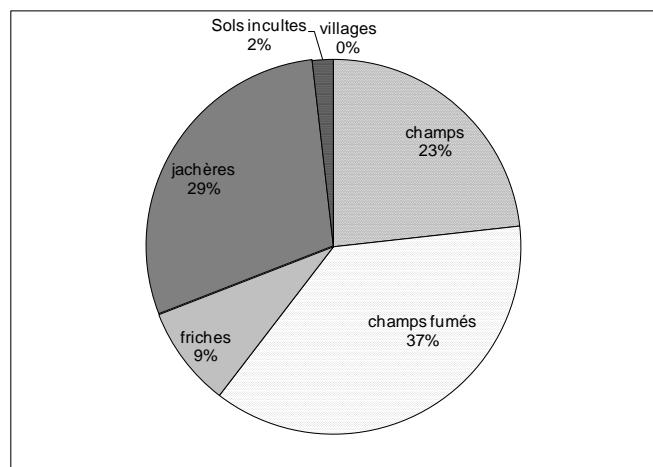


Figure 6-13 : Répartition des déjections animales apportées par la pâture dans les catégories d'UPP

Les exportations de matières organiques des UPP sont essentiellement les grains destinés à la consommation humaine qui représentent 12%, et les résidus de récolte, herbacées et feuilles

des ligneux destinés à la consommation animale qui représentent 88%. Cette proportion varie suivant les terroirs et est respectivement de 85%, 87% et 90% pour Kodey, Tchigo Tegui et Banizoumbou. Les exportations des éléments minéraux, azote, phosphore et potassium des cultures (fumées ou non fumées) représentent respectivement 51.7%, 60.2% et 71.1% des exportations totales. Dans les zones de pâtures permanentes, les exportations d'éléments nutritifs sont réparties entre les jachères, les friches et les zones incultivables avec une part importante réalisée par les jachères (Figure 6-14).

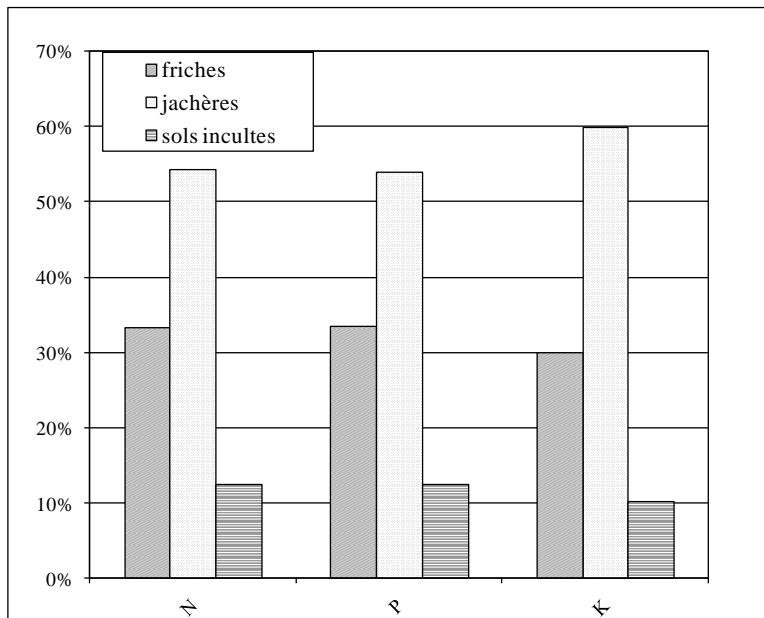


Figure 6-14: Niveau en % des exportations d'azote, de phosphore et de potassium des friches, jachères et sols incultivables pour l'ensemble des zones pâturées en toute saison

Les productions végétales des UPP assurent une partie de l'alimentation humaine et animale. Les quantités de matière sèche destinées aux bovins représentent 42%, et celles destinées aux petits ruminants représentent 58% du total de la part réservée aux animaux. Les exportations en éléments minéraux provenant des UPP vont en direction des animaux à raison de 87% pour l'azote, 70% pour le phosphore et 88% pour le potassium. Les autres flux entrants pour l'alimentation des animaux dans l'approche NUTMON proviennent de l'extérieur sans une spécification de l'UPP d'origine. Cette ressource communautaire, évaluée dans l'approche NUTMON, ne dépasse pas le seuil de 14% pour les matières organiques et les minéraux. Elle permet d'équilibrer la part des flux de matières organiques en direction des bovins et des petits ruminants avec des niveaux respectifs de 49% et 51% pour la matière sèche, 47% et 53% pour l'azote, 47% et 52% pour le phosphore, et 51% et 49% pour le potassium.

6.3.4 Les bilans partiels par terroir, occupation des sols et type d'exploitation – NUTMON

Les flux d'éléments nutritifs utilisés dans l'évaluation des bilans partiels sont : l'apport d'engrais minéral, l'apport de déjections fécales animales dans les cultures par parage ou lors de la pâture des résidus, les exportations d'éléments nutritifs par les cultures (partie récoltée et résidus) et les déjections animales déposées à l'extérieur de l'exploitation. Une différence est faite entre les déjections animales consécutives à une pâture externe ou une pâture au sein de l'exploitation. L'agrégation des trois flux entrants et sortants des UPP permet d'obtenir la contribution de chaque flux. La quantification des flux dans l'ensemble des UPP des exploitations indique la part importante des résidus de récolte aussi bien dans l'ingestion alimentaire que dans les exportations (Figure 6-15). Les déjections animales importées sont des dépôts réalisés suite à une pâture journalière ou nocturne à l'extérieur de l'exploitation. Elles sont considérées comme des apports externes de déjections animales. La différence entre les flux d'azote liés aux déjections animales importées et exportées donne un bilan nul à Banizoumbou, et un déséquilibre en faveur des pâturages externes à Tchigo Tegui et Kodey. Ce déséquilibre est de l'ordre de -0.5 et -0.8 kg/ha respectivement. Ce bilan est nul pour le phosphore dans les trois terroirs. Dans le cas du potassium, le déséquilibre est en faveur des déjections réalisées à l'extérieur avec des valeurs respectives de -0.14, -0.53 et de -0.93 kg/ha pour Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey (Annexe 6.17, Annexe 6.18).

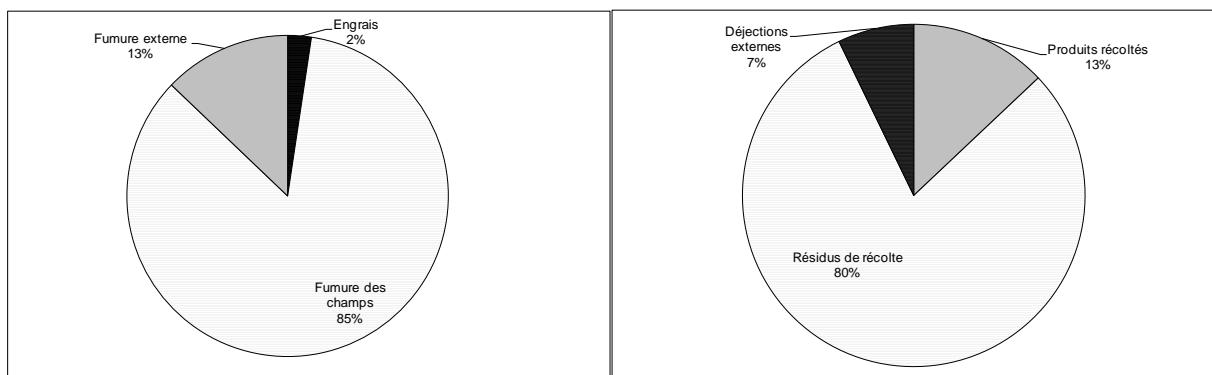


Figure 6-15 : Importance des flux d'azote entrants et exportés hors des exploitations

La structure des flux partiels utilisés dans l'évaluation des bilans partiels par terroir, par occupation des sols montre la prédominance des flux entrants liés à l'apport de fumier dans le champ (IN2) et des exportations liées aux résidus (Figure 6-16). Les flux IN2 et OUT2, pour l'azote par exemple, représentent respectivement 86% des flux entrants et 73% des flux

sortants des UPP. Cette tendance ne concerne que les cultures fumées où IN1 et IN2 existent. Pour les autres types d'occupation des sols, jachères, friches, sols incultivables, seul IN2b existe. Les flux liés aux exportations d'éléments minéraux, OUT1, OUT2 et OUT2b existent pour les cultures fumées ou non avec une différence marquée dans les exportations liées aux quantités de déjections hors système qui sont respectivement de 16% et 4%. Les exportations par les productions végétales pâturables représentent un peu plus de 90% pour les autres types d'occupation du sol où OUT2 et OUT2b sont existants.

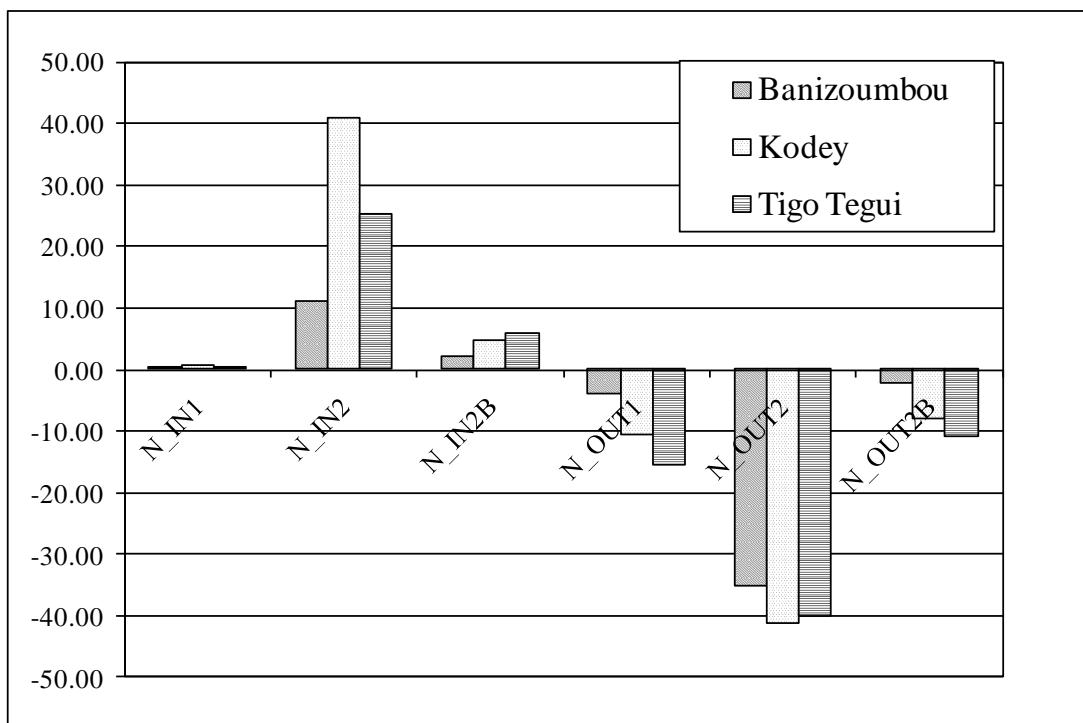


Figure 6-16: Flux partiels d'azote par terroir (unité: kg/ha)

Les bilans partiels globaux des trois terroirs sont négatifs pour l'azote et le phosphore et légèrement positifs pour le potassium (Table 6-14). Le bilan partiel de l'azote, du phosphore et du potassium pour les 469 exploitations, calculé par NUTMON, est respectivement de -8.1, 0.3 et -1.9 kg/ha. La comparaison des bilans des trois terroirs a été réalisée par le test non paramétrique de Wilcoxon /Kruskal-Wallis. Elle indique une différence significative ($p < 0.001$) au niveau de l'azote et du phosphore et une différence non significative ($p > 0.05$) au niveau du potassium. Dans les occupations de sols, seules les cultures fumées ont des bilans positifs avec des bilans d'azote moyens de 10.6 ± 2.3 kg/ha (Table 6-15). Elles sont les seules à recevoir les flux de type IN1 et IN2.

Table 6-14 : Bilan partiel des éléments nutritifs par terroir selon NUTMON

Terroir	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
Banizoumbou	-9.7 ± 0.6	-0.4 ± 0.1	-2.7 ± 0.3
Tchigo Tegui	-5.9 ± 0.9	1.2 ± 0.3	-0.4 ± 0.6
Kodey	-8.1 ± 1.1	0.4 ± 0.3	-3 ± 0.7
Ensemble	-8.1 ± 0.5	0.3 ± 0.1	-1.9 ± 0.3
test de Wilcoxon - Terroirs	19.4 ***	22.5***	2.5 (NS)

Unité : kg/ha

Table 6-15: Bilan partiel des éléments nutritifs par type d'occupation des sols selon NUTMON

Type d'occupation	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
Cultures	-11.7 ± 0.6 ^{b c}	-1.4 ± 0.1 ^{b c}	-6.9 ± 0.4 ^c
Cultures fumées	10.6 ± 2.3 ^a	9.5 ± 0.8 ^a	13.1 ± 1.8 ^a
Friches	-15.5 ± 1.3 ^c	-1.2 ± 0.1 ^{b c}	-3.5 ± 0.3 ^{b c}
jachères	-7.5 ± 0.4 ^b	-0.6 ± 0.0 ^b	-2.1 ± 0.1 ^b
Sols incultes	-29.7 ± 2.9 ^d	-2.4 ± 0.2 ^c	-6.1 ± 0.6 ^c

Les moyennes avec les lettres identiques dans une même colonne ne sont pas significativement différentes

Les bilans partiels par type d'exploitation, gestionnaire et non gestionnaire (Annexe 6.19) ont été établis sur la base de la moyenne des bilans des UPP appartenant à ces exploitations, pondérés par les superficies. Le bilan d'azote est de $-8.8 \pm 1.5 \text{ kg.ha}^{-1}$ pour les gestionnaires et de $-8.0 \pm 0.5 \text{ kg.ha}^{-1}$ pour les non gestionnaires. La comparaison non paramétrique des moyennes indique des différences non significatives entre les deux types d'exploitation pour l'azote et le potassium ($F=0.28$, $\text{ddl}=1$, $p = 0.6$ pour l'azote et $F=0.95$, $\text{ddl}=1$ et $p=0.3$) et une différence significative pour le phosphore ($F=23.8$, $\text{ddl}=1$, $p < 0001$).

6.3.5 Les bilans partiels par terroir, occupation des sols et type d'exploitation – NUTPAST

Les bilans de NUTPAST ont été calculés sur 2948 UPP appartenant à 461 exploitations. L'analyse de la distribution statistique des bilans partiels des trois éléments minéraux permet de rejeter l'hypothèse de normalité ($p < 0.05$ pour les 3 éléments minéraux - test de Shapiro-Wilk). Ces données présentent des valeurs très concentrées autour de 0 avec des extrêmes élevés. Le bilan partiel moyen de NUTPAST des macro-éléments N, P, et K pour les trois terroirs est respectivement de 0.3 ± 0.4 , 1.2 ± 0.1 et 0.9 ± 0.3 . Ce bilan reste légèrement positif pour les trois éléments minéraux (Table 6-16). Des différences importantes existent entre le bilan obtenu par l'approche NUTPAST et celui obtenu par l'approche de NUTMON. La comparaison des terroirs par la méthode non paramétrique, eu égard à l'inégalité des variances, indique des différences hautement significatives entre les trois terroirs pour N et P et non significative pour K. Les résultats de cette comparaison sont similaires à ceux observés sur les bilans obtenus dans l'approche NUTMON. Les bilans moyens d'azote par terroir apparaissent seulement positifs pour Tchigo Tegui, à cause surtout de l'apport du parage dans ce terroir supérieur à celui des deux autres. En effet, le parage et l'apport manuel dans ce terroir apporte 6.6 kg/ha de N. Cette quantité est de 4.4 kg/ha à Kodey et de 1.9 kg/ha à Banizoumbou.

Table 6-16 : Bilan partiel des éléments nutritifs par terroir - NUTPAST

Terroir	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
Banizoumbou	-1.1 ± 0.4	0.5 ± 0.1	-0.5 ± 0.3
Tchigo Tegui	3 ± 0.8	2.2 ± 0.3	3.1 ± 0.7
Kodey	-0.6 ± 0.9	1.2 ± 0.3	0.4 ± 0.8
Ensemble	0.3 ± 0.4	1.2 ± 0.1	0.9 ± 0.3
test de Wilcoxon: χ^2	16.2 ***	21.3***	1.2 (NS)

L'exportation de résidus par transfert hors des champs par les exploitations pour le stockage aux fins d'alimentation des vaches laitières, des animaux à engraisser ou la construction est en moyenne de $13.3\% \pm 0.3\%$. Une grande proportion de ces résidus est consommée par le bétail et est comptabilisée dans le bilan d'ingestion et d'excrétion pour les animaux restés dans les concessions. La différence entre l'ingestion et les masses produites dans les cultures, les pâturages est considérée comme étant recyclé dans le système.

L'agrégation des bilans partiels par occupation des sols fait apparaître la singularité des UPP ayant reçu de la fumure et des engrains minéraux par rapport aux autres types d'occupation des sols. Les bilans moyens de N, P, K respectifs sont de 25.8 ± 2.4 , 10.8 ± 0.9 , 21.9 ± 2.0 kg/ha (Table 6-17). La distribution des données en quantiles 25%, 50% et 75% montre une très forte concentration des données autour de la médiane à l'exception des cultures fumées (Table 6-18). Les cultures sans fumure ressortent comme les zones ayant le bilan partiel le plus négatif des différentes occupations de sols. Le bilan partiel du potassium n'est pas significativement différent dans les couples cultures-sols incultivables, friches-jachères, friches-sols incultivables et jachères-sols incultivables.

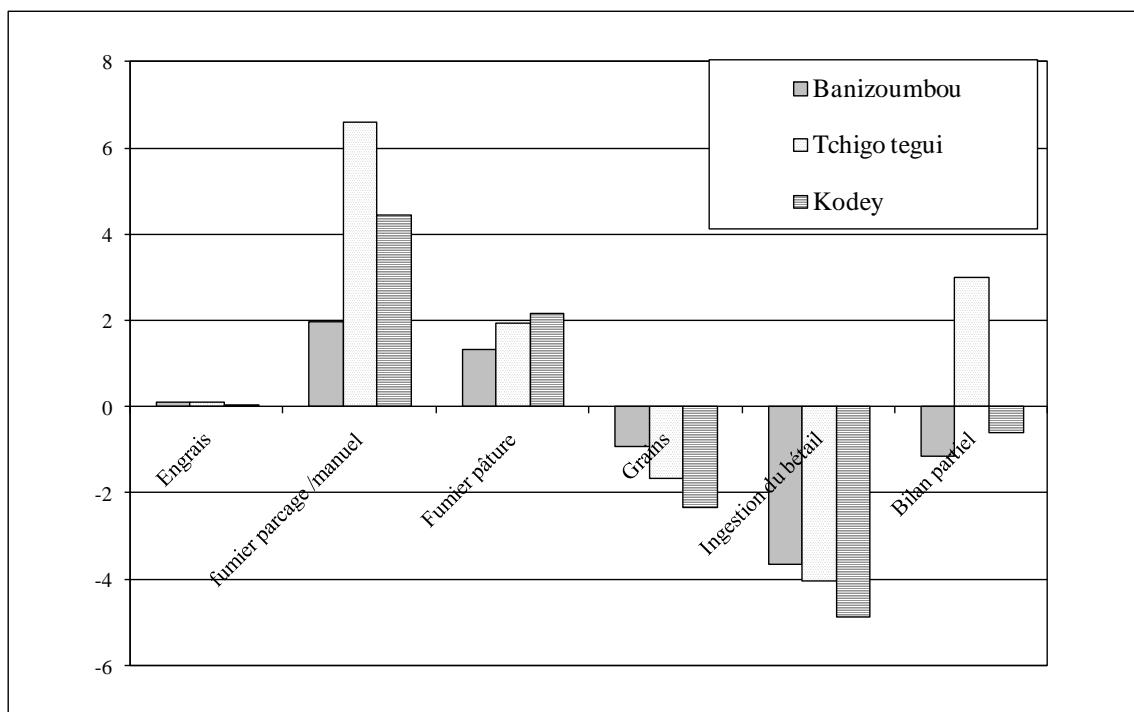


Figure 6-17 : Flux et bilans moyens de N, P, K des 3 terroirs

Table 6-17 : Bilan de N, P, K dans les occupations de sols autres que cultures fumées par NUTPAST

Occupation de sol	N	P	K
cultures	-4.2 ± 0.1 b	-0.6 ± 0.1 b	-3.8 ± 0.1 c
cultures fumées	25.8 ± 2.4 a	10.8 ± 0.9 a	21.9 ± 2.0 a
friches	-1.7 ± 0.2 b	0 ± 0.1 b	-0.6 ± 0.1 b
jachères	-3.4 ± 0.1 b	-0.1 ± 0.1 b	-1.6 ± 0.1 b
sols incultivables	-2.8 ± 0.4 b	-0.1 ± 0.1 b	-1.2 ± 0.2 b c
moyenne UPP	0.3 ± 0.4	1.2 ± 0.1	0.9 ± 0.3

Les moyennes avec les lettres identiques dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha=0.05$

Table 6-18: Quantiles des bilans partiels N, P, K par occupation des sols

Bilan partiel	N (kg/ha)			P (kg/ha)			K (kg/ha)		
	P25	P50	P75	P25	P50	P75	P25	P50	P75
cultures	-8.2	-4	-2.2	-1.2	-0.7	-0.4	-6.1	-3.2	-1.6
cultures fumées	-6.8	-1.1	28.5	-1.1	0.6	12.3	-4.3	-0.4	25.2
friches	-3	-1.4	-0.5	-0.1	-0.1	0	-1.2	-0.4	0
jachères	-4.8	-2.6	-1	-0.2	-0.1	0	-2.7	-1.3	-0.3
zones incultivables	-4.7	-1.7	-0.8	-0.2	-0.1	0	-1.9	-0.6	-0.1
ensemble UPP	-5.9	-2.7	-1	-0.6	-0.2	0	-3.5	-1.5	-0.3

Le rapport entre les bilans partiels établis dans les deux approches est moins élevé dans les cultures fumées et les jachères en comparaison avec les autres occupations des sols. Le rapport entre le bilan partiel de NUTPAST et de NUTMON est de 0.5 dans les cultures avec fumure et de 1.9 dans les jachères. Ce rapport reste élevé dans les friches et les sols incultivables (rapport de 7) et dans les cultures (2.4). NUTMON a tendance à surestimer les prélèvements effectués par le bétail dans ces occupations de sols et ne prend pas en compte les dépôts des déjections opérées lors de la pâture des autres animaux que ceux de l'exploitation. Les deux bilans partiels ont été mis en relation par la corrélation de Pearson (Dagnelie, 2007b) pour quantifier la relation existante (Table 6-19). Des relations linéaires positives et significatives ($p < 0.05$) existent entre les bilans partiels des cultures et des cultures avec fumure. Les coefficients de corrélation restent élevés dans les cultures fumées et les cultures avec respectivement 0.96 et 0.62 pour ce qui est de l'azote.

Table 6-19 : Coefficient de corrélation entre les bilans partiels NUTMON et NUTPAST dans les UPP

Type occupation	N n et Np	Pn et Pp	Kn et Kp	Nombre de PPU	superficie (ha)	superficie (%)
Cultures	0.62***	0.81***	0.42 **	901	3584	30.4%
Cultures fumées	0.96***	0.99***	0.97 ***	402	1525	13.0%
Jachères	0.07*	- 0.03 (ns)	0.35 ***	1046	4948	42.0%
Friches	0.12 *	0.05 (ns)	0.06 *	448	1464	12.4%
sols incultes	0.14 (ns)	0.14 (ns)	0.14 **	149	262	2.2%

Nn représente le bilan d'azote de NUTMON et Np représente le bilan d'azote de NUTPAST

Les bilans partiels par exploitation calculés dans cette étude diffèrent des bilans partiels par exploitation de NUTMON⁴⁰. Les bilans calculés à ce stade sont des moyennes pondérées par la superficie du bilan des UPP. Les bilans partiels par exploitation analysés suivant les deux critères, gestionnaire et non gestionnaire, montrent que les gestionnaires ont des bilans partiels supérieurs à ceux des non gestionnaires à cause du parage opéré dans les champs. Ces bilans partiels se révèlent positifs dans les trois terroirs avec des valeurs de N proches de 0 dans le terroir de Kodey et inférieures à celles des deux autres terroirs (Table 6-20). Les résultats du modèle linéaire généralisé mettent en évidence cette différence dans les deux classes d'exploitation avec une contribution plus grande des gestionnaires dans le modèle (coefficients : 3.54 et $p < 0.0001$). De même, les gestionnaires de Tchigo Tegui ont les bilans partiels les plus élevés. Dans ce terroir, 30% des superficies des UPP des gestionnaires soit 1075 ha ont des bilans positifs. Dans les deux autres terroirs, Banizoumbou et Kodey, le pourcentage de superficie avec un bilan positif chez les gestionnaires est respectivement de 11% et 24%. Dans l'ensemble des trois terroirs, les superficies avec un bilan positif ne dépassent guère 9%.

Table 6-20: Bilan partiel par type d'exploitation et par terroir (unité=kg/ha)

Type d'exploitation	Terroir	N	P	K
gestionnaire	Banizoumbou	1.9 \pm 1.4	1.9 \pm 0.5	2.3 \pm 1.2
	Tchigo Tegui	13.7 \pm 2.3	6.3 \pm 0.9	11.8 \pm 2.0
	Kodey	0.0 \pm 1.8	1.9 \pm 0.6	0.6 \pm 1.4
Non gestionnaire	Banizoumbou	-2.1 \pm 0.3	0 \pm 0.1	-1.4 \pm 0.2
	Tchigo Tegui	-1.0 \pm 0.6	0.6 \pm 0.2	-0.1 \pm 0.5
	Kodey	-0.9 \pm 1.1	0.8 \pm 0.4	0.3 \pm 0.9
Ensemble UPP		0.3 \pm 0.4	1.2 \pm 0.1	0.9 \pm 0.3

Les classes d'exploitation prédéfinies par l'ILRI au nombre de cinq et ont été déterminées sur la base de l'habitat (campement ou village) et de la richesse fondée sur l'effectif du cheptel et la superficie des champs (Table 6-21). Pour rappel, les cinq classes sont : campement riche, campement pauvre, village riche, village pauvre et village gestionnaire. Une analyse discriminante pas à pas (SAS, 2004c)⁴¹ des caractéristiques des exploitations permet

⁴⁰ Le bilan de NUTMON par exploitation est calculé sur la base des échanges avec l'extérieur;

⁴¹ L'analyse discriminante pas à pas permet de sélectionner les variables quantitatives pertinentes pour une analyse discriminante complète basée sur une classification existante.

d'identifier le poids des quatre facteurs importants déterminant ces classes, qui est de 43% pour le bétail, 21% pour l'importance de la fumure dans les champs, 11% pour l'importance des terres cultivées et 5% pour le nombre d'habitants⁴² (Table 6-22).

Table 6-21: Statistiques descriptives des classes d'exploitations ILRI

Habitat	Classement	UBT	% cultures fumées	Nbre d'habitants	Superficie cultivée (ha)
Camp	pauvre	8.8 ± 0.8	44.5 ± 3.7	10.1 ± 0.6	7.5 ± 0.7
	Riche	14.6 ± 1.6	52.1 ± 5.0	9.4 ± 0.6	8.3 ± 0.9
Village	Gestionnaire	10.4 ± 2.8	16.7 ± 4.2	15.9 ± 2.4	21.8 ± 4.4
	Pauvre	0.6 ± 0.1	9.5 ± 1.1	8.9 ± 0.3	12.0 ± 0.6
	riche	0.5 ± 0.1	10.2 ± 1.8	7.8 ± 0.5	12.7 ± 1.2
Ensemble		4.0 ± 0.4	20.7 ± 1.3	9.4 ± 0.3	11.5 ± 0.5

Table 6-22: Résultats de l'analyse discriminante pas à pas

Variables	R ² Partielle	Valeur de F	p > F	Degré de Signification
UBT Total	0.43	85.0	<.0001	***
Superficie des cultures fumées (% du total des terres cultivées)	0.21	29.5	<.0001	***
Superficie cultivée	0.11	14.6	<.0001	***
Nombre d'habitants	0.05	5.8	0.0002	**

*** hautement significatif ** très significatif

Les coefficients obtenus dans le modèle linéaire généralisé indiquent les tendances positives induites par les campements pauvres et riches et les villageois gestionnaires pour l'azote. Les coefficients obtenus pour les deux autres minéraux ne sont pas significatifs. Pour l'azote et le phosphore, les coefficients des terroirs sont tous significatifs avec des tendances négatives plus marquées à Kodey qu'à Banizoumbou. La répartition des superficies dont le bilan est positif en proportion des terres appartenant à chaque classe, indique en effet que 32% et 21% des superficies des campements riches et pauvres ont un bilan positif. Cette proportion est de 5% et 6% pour les villageois pauvres et riches. Cette tendance ressort bien dans la cartographie du bilan partiel d'azote (Figure 6-18) ou les emplacements de campements ont des bilans positifs. Les comparaisons des bilans partiels selon le critère de la topographie combinée à l'occupation des sols ont mis en évidence des différentes significatives dans les

⁴² Les pourcentages représentent le coefficient de détermination partiel de l'analyse discriminante.

bilans des cultures fumées qui sont dans les vallées par rapport aux autres situées sur les plateaux, les replats et les talus. Cette différence est essentiellement liée à la situation des UPP dans les vallées qui sont essentiellement à Kodey et font face à des pressions élevées de cheptel en saison sèche.

Table 6-23: Résultats du modèle linéaire généralisé sur l'effet terroir et classe exploitation

Variables	Coefficient	Erreur standard	χ^2 de Wald	probabilité
Azote				
Ordonnée à l'origine	-2.7	1.0	7.1	0.008
Banizoumbou	-1.3	0.3	25.2	<.0001
Kodey	-2.8	1.2	5.3	0.021
Campement pauvre	2.2	1.0	4.7	0.031
Campement riche	3.1	1.0	8.8	0.003
Villageois gestionnaire	2.0	1.0	3.8	0.051
Villageois pauvre	-18.9	10,391.5	-	0.999
Déviance	1.8	0.0		
Phosphore				
Ordonnée à l'origine	-3.6	2.5	2.1	0.151
Banizoumbou	-1.4	0.3	26.3	<.0001
Kodey	-2.1	0.6	12.8	0.000
Campement pauvre	3.2	2.5	1.6	0.201
Campement riche	4.0	2.5	2.5	0.112
Villageois gestionnaire	2.9	2.5	1.3	0.251
Villageois pauvre	-19.0	10,372	-	0.999
Déviance	1.9	0.0		
Potassium				
Ordonnée à l'origine	-3.4	2.1	2.6	0.105
Banizoumbou	-1.4	0.3	22.1	<.0001
Kodey	-3.7	3.2	1.3	0.248
Campement pauvre	2.9	2.1	1.9	0.174
Campement riche	3.7	2.1	3.1	0.079
Villageois gestionnaire	2.7	2.1	1.6	0.206
Villageois pauvre	-19.1	11,704.7	-	0.999
Déviance	1.9	0.0		

Note de tableau: Les coefficients du modèle linéaire généralisé, l'erreur standard, la statistique de χ^2 de Wald et les probabilités de signification sont présentés pour 2 terroirs, pour 4 types d'exploitation. Le troisième terroir qui est Tchigo Tegui, et la 5^{ème} classe d'exploitation, les villageois riches sont utilisés comme référence dans le modèle.

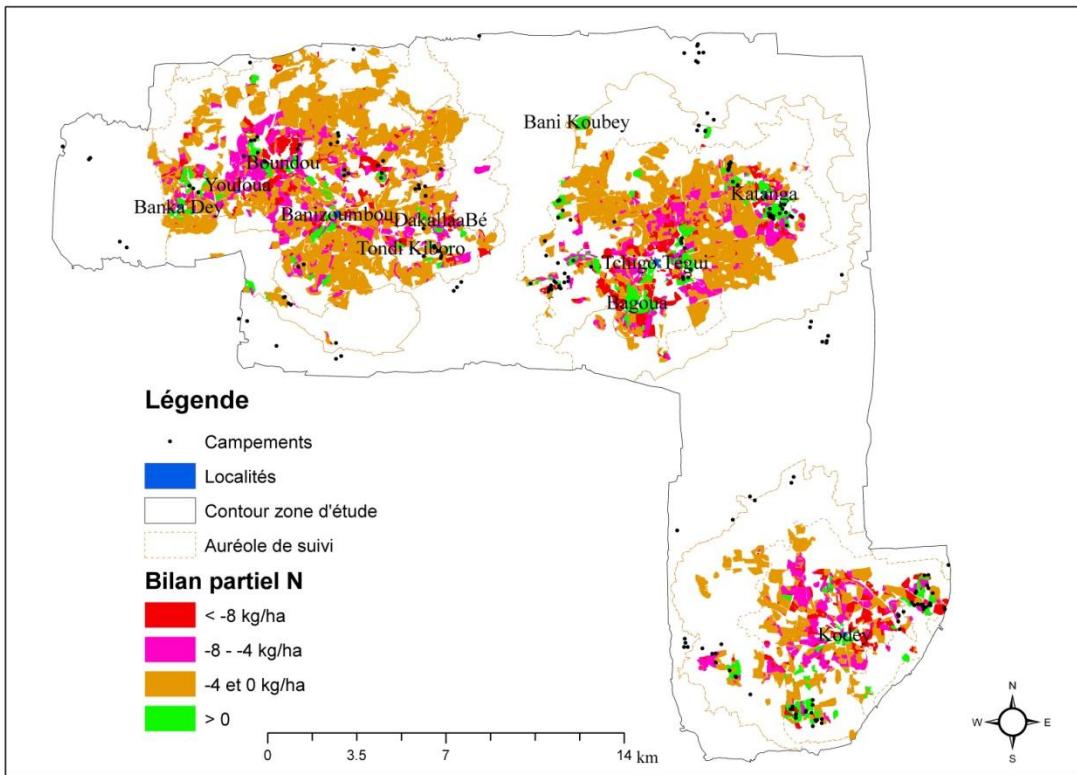


Figure 6-18 : Bilan partiel de N spatialisé des unités de production primaire – NUTPAST

Les UPP représentent les terres de 461 exploitations. Cette carte fait bien ressortir la position des campements et leur valeur en N élevé par rapport aux autres UPP.

6.4 Discussion

L'impact de la gestion des cultures et des pâaturages sur l'épuisement des sols

Dans leurs travaux sur la problématique liée aux bilans d'éléments nutritifs en ASS , une des recommandations de Schlecht et Hiernaux, (2004) porte sur l'accent à mettre dans l'amélioration des flux individuels ou des flux thématiques. L'évaluation des bilans partiels des terres cultivées ou non des exploitations agricoles dans trois terroirs du Fakara situés dans l'ouest Niger s'inscrit dans cette perspective. La démarche suivie peut être considérée comme l'évaluation des bilans partiels d'un sous-système de l'exploitation (Bosch, 1998). Ces bilans partiels sont essentiellement basés sur les flux liés aux activités agro-pastorales de l'exploitation qui sont gérés par les ménages et/ou la communauté. Les récents développements de l'étude des bilans dans les systèmes mixtes culture-élevage prônent cette approche des bilans partiels approfondis à cause de l'importance des flux liés à la gestion dans ces systèmes (Zingore, Murwira *et al.*, 2007; Tittonell, Zingore *et al.*, 2007;Tittonell, van Wijk *et al.*, 2009 ;Rufino, Tittonell *et al.*, 2009).

L'approche NUTMON a été utilisée pour évaluer les flux liés aux apports d'engrais, aux exportations par les cultures dans les unités de production primaire correspondant aux terres des exploitations agricoles. Les flux liés à l'élevage ont été évalués par NUTPAST par modélisation spatiale de l'ingestion et de l'excrétion. L'espace considéré pour ces flux d'élevage est le territoire des trois terroirs. L'ensemble des troupeaux d'élevage pâturant dans ces espaces ont été pris en compte. Toutes les terres cultivées et non cultivées ont été également considérées dans cette approche. Pour la partie NUTMON, seules les exploitations disposant de terre (quel que soit le type d'accès) ont été considérées. Certaines terres situées essentiellement sur les plateaux et qui ne sont pas cultivées appartiennent à la communauté et sont sous la gestion du terroir. Sur ces terres, l'ingestion et l'excrétion ont été évaluées dans NUTPAST par la même approche que celle utilisée dans les terres gérées par les exploitations.

Cette étude a permis de montrer que le modèle sur l'élevage de l'approche NUTMON qui effectue une généralisation de la pâture hors exploitation, entraîne une perte d'information considérable pour les systèmes étudiés. Ce modèle ne permet pas de prendre en compte tous

les flux liés à l'ingestion et à l'excrétion du bétail à l'échelle des unités de production primaire. Les éléments omis dans NUTMON portent essentiellement sur :

- (i) les quantités ingérées au sein des terres d'une exploitation par des animaux provenant d'une autre exploitation,
- (ii) (ii) les quantités excrétées par des animaux externes pâturent au sein de l'exploitation,
- (iii) (iii) les déjections déposées par les animaux de l'exploitation au sein des autres exploitations, les déjections déposées par des animaux extérieurs à l'exploitation au sein de l'exploitation considérée.

La complexité de l'évaluation des flux liés au pâturage extensif en ASS et l'agrégation des flux des parcelles au niveau de l'exploitation ont été mises en avant par Stoorvogel et Smaling, (1998) étant donné les interactions entre les champs en termes de flux d'éléments nutritifs. L'approche développée dans cette recherche avec l'outil NUTPAST et par l'utilisation de NUTMON, a permis de préciser que les superficies pâturées par les troupeaux et n'appartenant pas au gestionnaire du troupeau représentent 83% des superficies totales visitées le jour, et 60% la nuit. Cette caractéristique spatio-temporelle de l'utilisation des pâturages communautaires, quantifiée, a été très peu prise en compte dans l'évaluation des bilans partiels en mettant en parallèle les superficies gérées par le propriétaire du bétail et les superficies réellement utilisées. La mobilité de l'élevage des ruminants domestiques reste une caractéristique fondamentale des systèmes d'élevage sahéliens aussi bien au sud qu'au nord du Sahel (Thebaud, 1999; Boutrais, 2007). Elle fait partie des mécanismes d'adaptation des populations rurales aux conditions environnementales (Niamir-Fuller, 1998; Schareika, 2003). Dans les pays sahéliens, cette mobilité et surtout l'accès aux parcours est régi par des textes nationaux et permet le libre accès aux pâturages en toutes saisons avec quelques restrictions en cas d'aménagement (Thébaud et Batterbury, 2001) en dépit des conflits qu'ils engendrent. De même, l'accès aux zones de cultures reste libre après les récoltes. Toutes ces considérations justifient de considérer la mobilité dans l'évaluation des flux organiques et minéraux, aux échelles de l'exploitation et du terroir.

Les bilans partiels évalués dans cette étude sont supérieurs à ceux obtenus par l'approche NUTMON dans un intervalle moyen de 20% à 76% suivant les exploitations étudiées. Sur le

plan méthodologique, un des éléments les plus importants est la prise en compte de l'impact de la mobilité des troupeaux à l'échelle du terroir et plus particulièrement l'ingestion et l'excrétion des animaux étrangers dans les terres d'une exploitation. Sur le plan du fonctionnement systémique, une des particularités du système sahélien marqué par la mobilité, est le transfert de fertilité des zones de parcours vers les zones cultivées (Landais et Lhoste, 1993; Powell, Fernandez-Rivera *et al.*, 1995). La modélisation spatiale des flux liés à l'élevage a permis de prendre en compte l'impact de ce type de déplacement dans chaque unité du système qui représente les terres de parcours et les terres cultivées en termes d'ingestion et d'excrétion. En dépit de la prise en compte de la variation saisonnière de la biomasse, des quantités ingérées et excrétées, de l'évaluation de la dynamique des troupeaux, les résultats finaux obtenus ont été volontairement limités au cycle annuel. Le cycle de fonctionnement de NUTPAST comme celui de NUTMON est mensuel. Les bilans partiels annuels restent plus adaptés à l'analyse du système agro-pastoral sahélien à cause du cycle de production végétale pour autant que la dynamique saisonnière soit intégrée dans l'ingestion, l'excrétion voire les fluctuations des effectifs du cheptel. Cette variabilité des effectifs ainsi que leur impact sur l'ingestion et l'excrétion sont également prévus dans le modèle élevage de NUTMON, de même que le parage nocturne.

Les bilans partiels obtenus dans les UPP sont marqués par une très grande variabilité. Cette variabilité est liée à plusieurs facteurs dont le système de gestion des terres et du bétail constitue un des éléments importants. De Leeuw, Reynolds *et al.*, (1995) évoquent par exemple le déséquilibre dans le transfert des déjections animales dans les systèmes où les animaux sont confiés et qu'il existe une appropriation unilatérale des déjections animales. Cette variabilité est en partie liée à la gestion des exploitations. Les apports d'engrais chimiques et la fumure par l'apport de déjections animales dans les champs sont pratiqués respectivement par 2.4% et 60.5% des exploitations. La pratique de la fumure dans le Fakara s'effectue par un apport manuel ou par parage nocturne sur les parcelles cultivées et les jachères. Le parage permet une meilleure concentration des éléments nutritifs dans les sols mais aussi une meilleure répartition sur la surface des parcelles (Powell, Fernandez-Rivera *et al.*, 1996). Dans les exploitations étudiées, et sur les parcelles des exploitations qui pratiquent le parage, les quantités de fumure (toute origine confondue) atteignent 3122.9 ± 207.2 kg/ha soit 49.1 ± 3.3 kgN/ha. Le parage et l'apport manuel à eux seuls amènent 46.1 ± 3.2 kgN/ha

soit 2933.3 ± 206.1 kgMS/ha. Sur les cultures non fumées, les quantités de déjections animales sont en moyenne de 110 ± 7.7 kg/ha et les quantités d'azote de 1.7 ± 0.1 kg/ha. Les maxima enregistrés pour les déjections issues du parage ont été de 10 tMS/ha. Des quantités équivalentes au Niger dans la région de Chikal ont été rapportées par Gandah, Bouma *et al.*(2003), de l'ordre de 3 à 14 t.MS/ha. Dans une région proche du Fakara, Achard et Banoin (2003b) ont suivi 5 exploitations et ont effectué une description complète de la technique de parage dans l'Ouest Niger. Les quantités qu'ils ont relevées étaient de l'ordre de 15 t/ha/an pour les bovins et 8 t/an pour les petits ruminants. Les quantités relevées dans ces régions sont similaires à celles du Fakara avec de fortes variabilités entre les exploitations qui pratiquent cette technique de fumure des champs. De même, les pratiques en matière de parage sont similaires et seules 1/5 des parcelles sont concernées annuellement (Achard et Banoin, 2003b). Dans l'échantillon étudié, les superficies concernées par le parage peuvent être estimées à 45% des champs fumés soit 6% des terres des 461 exploitations correspondant à environ 700 ha qui reçoivent annuellement en moyenne 2933 kgMS/ha de déjections animales. L'apport de la fumure améliore considérablement les rendements agricoles (Pieri, 1989) avec des arrière-effets pendant 4 à 5 ans (Gandah, Bouma *et al.*, 2003) dus à la lenteur de la minéralisation. Cet arrière-effet peut être très variable et dépend de la disponibilité du bétail et des pratiques de parage (Freschet, Masse *et al.*, 2008). Au-delà de 3 tMS/ha de déjections animales appliquées, des pertes considérables d'EN de l'ordre de 1/10 par lessivage peuvent intervenir à des profondeurs de sols de 1.5 à 2 m (Brouwer et Powell, 1998). Des pertes d'azote par volatilisation interviennent aussi dans ce cas, mais n'empêchent pas une amélioration des caractéristiques du sol telles que le contenu en N, en P et une augmentation du pH (Williams, Powell *et al.*, 1995; Powell, Ikpe *et al.*, 1998; Powell, Pearson *et al.*, 2004). Ces recommandations mises en regard avec les bilans des exploitations pratiquant le parage montrent que pour équilibrer le bilan partiel de l'azote dans ces conditions, un apport de 1500 kgMS/ha de déjections animales constitue un seuil minimal. En effet, la plupart des exploitations qui pratiquent le parage ont un bilan partiel positif d'azote. Ce bilan est surtout en rapport avec les quantités de fumure utilisées ($R^2 = 0.92$, une pente de 2.10^{-2} et une ordonnée à l'origine de -23 kg/ha). Une telle éventualité nécessite la disponibilité d'environ 4 UBT par jour et par hectare pendant 365 jours pour un parage nocturne. Dans l'intervalle des rendements observés (400 et 1300 kgMS en grain de mil), et en considérant un indice de récolte maxima de 0.22 (Van Duivenbooden, 1996), une estimation du nombre d'UBT

nécessaire avec une exportation de 50% des résidus serait de l'ordre de 9 à 19 UBT supérieur aux 4 UBT nécessaires pour avoir un bilan partiel équilibré ou positif. Un tel niveau permet d'éviter l'épuisement des sols et d'assurer une production de mil d'un hectare, étant entendu que toutes les conditions d'alimentation du bétail notamment l'accès aux jachères et aux autres parcours, sont satisfaites. Ces normes ne s'écartent pas trop de celles de William, Powell *et al.*, (1993) qui tablent sur 9 bovins ou 42 petits ruminants pour produire 370 kg.MS de grain et une exportation de 50 et 10% respectivement des feuilles et des tiges à Ouallam. Dans l'hypothèse d'une satisfaction des besoins alimentaires de l'ordre de 229 kg/habitant (PNUD, 2004b), le nombre de têtes de bétail nécessaire pour assurer la durabilité est de l'ordre de 3 UBT/ha dans ces conditions. L'importance des superficies fumées, de l'ordre de 35% des terres cultivées, et la faible disponibilité du bétail, de l'ordre de 0.43 UBT/habitant, ne permettent pas d'assurer ce seuil moyen de consommation.

Les cultures qui ne reçoivent pas de fumure par parage ou par apport manuel ont les bilans partiels les plus négatifs. Ces terres qui ont des rendements très bas sont caractéristiques des régions du Sahel où l'agriculture de subsistance est dominante. Les apports de matière organique sont constitués essentiellement des résidus de culture non appétés, des résidus racinaires et des apports environnementaux d'éléments minéraux (pluie, poussière). Dans ces systèmes, dès l'ouverture des champs, les résidus de cultures sont laissés en grande partie aux animaux qui restituent sur place 48% de l'azote et 85% du phosphore consommés (Buerkert et Hiernaux, 1998) dans les champs et les parcs de nuit. Une partie des résidus, très négligeable, estimée en moyenne entre 2 et 3.5% est utilisée pour l'énergie de cuisine et comme matériaux de construction (Baidu-Forson, 1994 ; Bationo, Kihara *et al.*, 2007). Dans les zones du Sahel où cette redistribution des restitutions et l'utilisation domestique des résidus sont importantes, un déficit de matière organique du sol peut subvenir (Bationo, Lombo *et al.*, 1998). L'absence de couvert végétal qui en résulte en surface expose ces terres aux différents types d'érosion, éolienne et hydrique, en faveur des jachères et des retenues d'eau (Bielders, Rajot *et al.*, 2004). En dépit de certains apports d'éléments nutritifs environnementaux, les bilans partiels de ces terres restent négatifs sans apport de déjections animales. Les estimations réalisées dans le chapitre 5 montrent que les exportations de résidus sont faibles dans les terroirs étudiés.

Plusieurs études ont montré l'importance des jachères dans la durabilité des systèmes culture-élevage (Bosma, Bos *et al.*, 1999; Akpo, Masse *et al.*, 2002; Achard et Banoin, 2003b). Le bilan partiel des jachères dépend essentiellement de la gestion du bétail dans l'approche NUTPAST. Les bilans obtenus sont légèrement supérieurs aux bilans des zones cultivées en dépit des pressions de bétail élevées toute l'année. En considérant les apports environnementaux, les apports liés à la fixation de l'azote et les prélèvements de bois, le bilan des jachères s'équilibre dans l'hypothèse que les pertes de matière organique (résidus de récolte essentiellement) sont faibles en surface. Le système jachères/culture du Fakara se caractérise par une proportion de superficies cultivées de 50.7% et une proportion de jachères par rapport aux terres cultivables de 49.3% dont l'âge varie entre 3.4 ± 1.2 ans à 10.8 ± 5.5 ans (Hiernaux, Ayantunde *et al.*, 2009) . Une grande variabilité entre les exploitations des trois terroirs existe au niveau de la disponibilité des jachères si l'on considère les terres appartenant à chaque exploitation. Sur l'échantillon étudié, le rapport entre les superficies des jachères et les terres totales varie de 0.5 ± 0.02 pour Banizoumbou à 0.19 ± 0.02 pour Kodey avec une moyenne de l'ensemble des exploitations de l'ordre de 38% (JAC1). Le pourcentage en jachère évalué sur les cartes d'occupation des sols et les parcellaires des exploitations est supérieur aux valeurs moyennes données par Loireau, (1998) pour l'année 1994 qui sont de l'ordre de 24% en dépit de la non considération des villages de Kodey dans l'étude citée ci-dessus. De tels écarts peuvent être liés aux pratiques agricoles d'une année à l'autre, à la qualité des images utilisées et aux méthodes de classification. La baisse de la fertilité des sols, liée à la réduction spatio-temporelle de la jachère est connue depuis plusieurs décennies (Pieri, 1989). Dans les exploitations disposant de très peu de jachères, le risque de mauvaise récupération de la fertilité des sols est plus élevé (Loireau, 1998). En considérant la jachère au niveau de l'exploitation et non sur l'ensemble du terroir, la charge pastorale atteint en saison des pluies 25 UBT/ha/an et en saison sèche 15 UBT/ha. Ces charges restent très élevées et ne permettent pas de maintenir le bétail pendant toute l'année dans les terroirs. L'apport de la pâture dans ces jachères, en particulier la contribution des éléments minéraux des déjections animales sur la production de fourrage est de l'ordre de 30% (Rufino, Rowe *et al.*, 2006). Cette insuffisance en quantité et en qualité des jachères, et la réduction de l'espace non cultivé poussent les animaux à la transhumance extraterritoriale avec de fortes variations saisonnières d'effectifs qui engendrent des manques à gagner au niveau des éléments nutritifs. Selon l'importance de la jachère dans les trois terroirs, les exploitations gestionnaires qui effectuent

la transhumance sont respectivement pour Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey de 38%, 77% et 90% (Turner, Hiernaux *et al.*, 2005). Ces différences de disponibilité de pâturage en hivernage peuvent avoir un impact dans le transfert de fertilité. Dans les travaux sur le bilan de l'ingestion fourragère et des excréptions à l'échelle des villages du Fakara et leur apport dans les cultures, Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.* (1997) montrent l'importance du bétail dans le transfert des éléments nutritifs en début d'hivernage avec un plus grand apport en termes de concentration de fumure dans le terroir de Banizoumbou où le rapport entre pâturages et terres cultivées est de 2.3 contre 0.6 à Kodey. Ce rapport (JAC2) à l'échelle des exploitations étudiées est respectivement pour Banizoumbou de 2.8 ± 0.5 , pour Tchigo Tegui, 1.3 ± 0.2 pour les jachères, et pour Kodey de 0.4 ± 0.1 .

Les bilans partiels par terroir qui sont des bilans moyens de l'ensemble des terres des exploitations indiquent des différences significatives pour l'azote et le phosphore. Les trois terroirs étudiés diffèrent essentiellement par la pression agricole mais aussi par la pression pastorale en dépit des mêmes conditions climatiques et édaphiques (Turner, Hiernaux *et al.*, 2005). Les proportions de terres cultivées en 1995 sur les trois terroirs sont respectivement de 30% à Banizoumbou, 36% Tchigo Tegui et 62% Kodey (Fernández-Rivera, Hiernaux *et al.*, 2005). Sur les 461 exploitations, l'évaluation faite à l'aide du SIG montre que ces proportions sont de 30%, 46% et 73% respectivement pour Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey⁴³. Dans les trois terroirs, l'apport du fumier par parage contribue aux bilans partiels positifs relevés sur les champs fumés. En revanche dans les champs non cultivés et dans les jachères, la pression agricole et pastorale reste très forte tant sur les résidus de cultures que sur les jachères et pâturages restants. Sur les parcelles de Kodey, les bilans partiels négatifs relevés dans les jachères restent néanmoins moins négatifs que ceux des deux autres terroirs. Ces bilans déséquilibrés à Kodey sont imputables en partie aux charges saisonnières élevées dans ce terroir. Dans les terroirs, le mode de conduite des animaux est fonction de la saison. A la fin des cultures, le bétail des Djerma qui est confié en hivernage est repris et généralement laissé en liberté. Le mode de conduite chez les Peul varie selon les saisons (Turner et Hiernaux, 2008). Certains animaux, les vaches laitières et quelques petits ruminants, restent au piquet en hivernage dans les concessions tant chez les Djerma que chez les Peul (Bodé,

⁴³ Seules les terres gérées par les exploitations ont été comptabilisées à partir du croisement de la carte d'occupation et du parcellaire.

2004). La pâture libre peut être préjudiciable à une concentration ciblée des déjections animales. De même, la pratique du piquet entraîne une baisse de l'ingestion et de l'excrétion (Ayantunde, Fernández-Rivera *et al.*, 2008). Plusieurs travaux ont mis en exergue, le rôle de la gestion du troupeau, des caractéristiques spatio-temporelles de la pâture sur les pâturages (Turner, 1995c; Powell, Fernandez-Rivera *et al.*, 1996; Coppolillo, 2000). Dans le Fakara, les travaux sur la transhumance ont montré que les troupeaux de la région de Katanga passent plus du tiers de leur temps dans le Nord Sahel (Fernández-Rivera, Hiernaux *et al.*, 2005). Certes, cette transhumance permet de résoudre les problèmes nutritionnels. Cependant, elle entraîne un manque à gagner dans la quantité de déjections animales qui permet de compenser les exportations d'EN des champs.

Les bilans partiels moyens des exploitations gestionnaires et des non gestionnaires font ressortir des bilans positifs chez les gestionnaires de bétail. Cette configuration des bilans met en relief le rôle positif du bétail dans le transfert de fertilité. Ces résultats confirment les tendances générales des bilans observés dans La Rovere (2001). En revanche dans les parcelles des non gestionnaires, les bilans sont généralement négatifs. L'importance du bétail à Kodey amène à une baisse rapide des stocks de résidus dans les champs aussi bien des gestionnaires que des non gestionnaires qui oblige les éleveurs à la pratique de la petite transhumance en saison sèche. Il n'est pas exclu que l'activité agricole utilisant beaucoup de déjections animales entraîne plus de travail notamment pour le sarclage. Il existe en hivernage, une compétition entre les activités liées au jardinage et celles du sarclage qui réduit le temps consacré à la pâture (Turner, Hiernaux *et al.*, 2005). Cette perturbation de la gestion du bétail induit un mauvais choix des zones de pâture, une baisse de la qualité des aliments consommés par le bétail qui peuvent compromettre d'une part la productivité du bétail et entraîner d'autre part une diminution de l'apport des quantités de fumures dans les champs. De plus, il n'est pas exclu que la présence des transhumants sur les zones de disponibilité des parcours à Banizoumbou augmente la pression du cheptel. L'arrivée de transhumants dans ces régions permet souvent l'établissement de contrats de fumure. Cependant, l'augmentation de la pression pastorale occasionnée n'est pas toujours bénéfique dans ces espaces, eu égard à la mauvaise connaissance des parcours saisonniers par les transhumants.

La comparaison des bilans par classe d'exploitation fait mieux ressortir le rôle positif du transfert de fertilité du bétail avec une séparation nette entre les villageois riches ou pauvres d'un côté et les gestionnaires villageois et famille des campements riches et pauvres de l'autre. Plusieurs facteurs liés à la gestion de l'exploitation et aux caractéristiques des exploitations interviennent sur le cycle des éléments nutritifs (Rufino, Tittonell *et al.*, 2007; Zingore, Murwira *et al.*, 2007). En effet, les exploitations vivant dans les campements et les villageois gestionnaires riches ont davantage de bétail. L'accès par le bétail à toutes les superficies, couplé au mode de gestion des troupeaux en saison sèche permet un plus grand accès à la fumure des champs. En revanche, le groupe des villageois, qu'ils soient riches ou pauvres, est confronté non seulement aux problèmes liés à la gestion de leur cheptel qu'ils confient généralement à des gestionnaires dans les campements, mais aussi à la faible disponibilité de la fumure. Ce type d'analyse permet de relever les différences existant entre les classes d'exploitation mais reste influencé par l'importance des terres disponibles dans les exploitations. Les conditions socio-économiques des exploitations peuvent avoir un impact important sur les volumes, les caractéristiques et la répartition des flux des éléments nutritifs (Scoones et Toulmin, 1995; Turner, 1995c ; Tittonell, Zingore *et al.*, 2007 ; Rufino, Tittonell *et al.*, 2009; Tittonell, van Wijk *et al.*, 2009).

Comparaison avec d'autres bilans dans la sous-région

Les bilans partiels ont été évalués sur l'ensemble des terres des exploitations échantillons dans les trois terroirs. Les évaluations faites aux différentes échelles ou niveaux d'agrégation représentent les statistiques agrégées des terres et non les bilans fonctionnels aux échelles considérées. Une comparaison avec d'autres bilans établis dans le même pays reste indicative vu que les trois terroirs du Fakara ne sont pas statistiquement représentatifs de toutes les régions du Niger. Cependant, leurs caractéristiques en relation avec l'équilibre naturel entre les populations, leur habitat et leurs systèmes socio-économiques sont similaires à ceux de plusieurs pays (Mohamed-Saleem, 1995) dans la bande 500 à 1000 mm correspondant aux zones semi-arides de l'ASS situées plus au sud que la zone sahélienne. L'évaluation des bilans des éléments nutritifs en Afrique de manière générale présente des tendances négatives (Vitousek, Naylor *et al.*, 2009; Cobo, Dercon *et al.*, 2010). Les bilans partiels calculés à partir des flux 1 et 2 des travaux de Stoorvogel et Smaling (1990c) pour les années 1983 et 2000

restent très négatifs dans l'ensemble. Les bilans partiels de l'azote, du phosphore et du potassium calculés en 1983 pour l'ensemble du Niger étaient respectivement de -0.05, -0.01 et -0.05 kg/ha. Le taux de croissance vers des signes plus négatifs de ces bilans partiels entre 1983 et 2000 était de 1%. La classification selon 4 modalités de bilans en 1983 a permis d'inclure le Niger dans le groupe dit modéré en termes d'épuisement de la fertilité des sols avec des bilans globaux (incluant les flux environnementaux) de N, P, K de l'ordre de -16, -2 et -11 kg/ha⁴⁴. La même évaluation conduite en 2000 a permis de relever qu'en dépit de l'augmentation de la fertilisation et de l'application de déjections animales, il n'y avait pas de changement notable dans les bilans. Le Niger a été classé dans la modalité sévère en termes d'indice de croissance de l'épuisement des sols. Les travaux de Sheldrick et Lingard (2004) qui ont porté sur les années 1988 à 1998 ont confirmé ces taux de croissance vers des valeurs plus négatives du bilan global du phosphore et du potassium et une stagnation du bilan global de l'azote. Les faibles bilans partiels obtenus dans ces premières études s'expliquent largement par les hypothèses faites quant au recyclage de la matière organique de l'élevage et plus précisément de l'apport de la pâture externe. L'approche NUTMON (Van den Bosch, De Jager *et al.*, 1998; Van den Bosch, Gitari *et al.*, 1998; Vlaming, Van den Bosch *et al.*, 2001), en abordant la problématique de l'impact de la gestion des ressources naturelles sur la fertilité des sols, a intégré la question de l'élevage dans l'exploitation agricole en développant un modèle spécifique pour l'élevage (Vlaming, Van den Bosch *et al.*, 2001) qui inclut largement les résultats de travaux des chercheurs de l'ILRI (Schlecht, 1995; Ayantunde, 1998).

Parmi les travaux conduits dans la même zone ou dans des régions similaires, les résultats obtenus par Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.*(1997) montrent pour l'azote, que le recyclage de la matière organique par le bétail apporte environ 1.2 kg/ha à Banizoumbou et Tchigo Tegui et 1.8 kg/ha à Kodey. En prenant en compte les exportations des cultures et de leurs résidus, essentiellement le mil, les bilans partiels établis à ce stade sont respectivement pour les trois terroirs de -13.8, -14 et -12.9 kg/ha pour l'azote et de -1.83 pour le phosphore. Ces bilans partiels sont inférieurs à ceux obtenus dans la présente étude car ils surestiment la charge du bétail à Kodey et ne prennent pas en compte l'hétérogénéité spatiale de la pâture et de la distribution des déjections animales entre les unités d'occupation des sols (Hiernaux,

⁴⁴ Stoorvogel et Smaling, 1990aP 81: Les valeurs de P2O5 et de K2O ont été converties selon la formule P=P2O5/2.291 et K=K2O/1.2046;

Fernandez-rivera *et al.*, 1997). Cette surestimation de la charge de bétail augmente dès lors l'ingestion du bétail et, donc la quantité d'éléments minéraux exportée. Dans les mêmes sites, par la méthode de programmation linéaire, La Rovere (2001) évalue les bilans de N et P dans le Fakara par classe de densité d'occupation des terres appelée LUDs⁴⁵, par classe d'exploitation et par aptitude des sols. L'indicateur LUD correspond à l'indicateur JAC2 utilisé dans la présente étude. Afin de comparer ces résultats à ceux de la présente étude, l'indicateur JAC2 a été classé selon les 6 classes et les moyennes des bilans de N et P ont été calculées. La comparaison des deux séries montre une tendance significative au seuil de $\alpha = 0.05$ avec des valeurs de R^2 de l'ordre de 0.33. On distingue cependant deux groupes séparés par seuil d'intensité de culture de 60%. Les coefficients de corrélation établis entre les bilans des différents types de sols dans l'étude de La Rovere (2001) sont très élevés, de l'ordre de 0.90. Ces coefficients confortent nos hypothèses quant à la non pertinence de l'évaluation des bilans partiels par type de sols compte tenu non seulement que la réponse à un effet sol est déjà incluse dans la production végétale, mais aussi vu les faibles variations de propriétés des sols dans le Fakara en dépit de l'impact de la gestion sur certains propriétés physico-chimiques. De même les corrélations existant entre les valeurs de N et de P sont de l'ordre de 0.99 dans l'étude sus citée. Les différences entre les deux études sont dues à l'absence de la prise en compte de la mobilité du cheptel dans le temps et dans l'espace et de l'échelle unitaire de travail basé sur l'exploitation au lieu de la parcelle dans les travaux de La Rovere. Les références spatio-temporelles de l'ingestion et de l'excrétion sont difficilement prises en compte dans les modèles de programmation linéaire à l'exception de quelques tentatives (Lemmens, 1999). Ainsi, comme suggéré par La Rovere (2001) :

"Although the reasons behind this are multiple, the most recurrent indicate the need to pay attention to clarify for whom (farms) and where (land and tenure units) a given conclusion is drawn";

La comparaison avec les résultats de l'étude de Busqué (2002) qui a utilisé en partie le même jeu de données, indique que les bilans partiels obtenus dans la présente étude sont plus élevés en moyenne. Les différences tiennent essentiellement aux trois éléments suivants relevés dans l'étude sus citée : (i) la faible utilisation des systèmes d'information géographique tant dans la prise en compte des superficies agricoles fumées que dans la distinction entre les jachères et

⁴⁵ La superficie des jachères rapportée à la superficie des cultures

les autres superficies non cultivées, (ii) la non prise en compte de la fumure minérale. Pour les surfaces avec fumure, l'étude sus citée ne tient pas compte des surfaces cartographiées mais des surfaces estimées. Les surfaces dites fumées ont été calculées pour chaque exploitation à partir de la quantité moyenne de fumier déposée pendant le parage sur la base des déclarations des agriculteurs. Elles représentent dans ce cas, 7% des cultures à Banizoumbou, 18% à Kodey et 4% à Tchigo Tegui. Dans la carte d'occupation des sols de 1995, les surfaces avec fumure représentent 10.4% des superficies totales cartographiées et 37.7% des surfaces cultivées. Les exploitations faisant partie de notre échantillon, eu égard à leur importance représentent un échantillon largement représentatif des exploitations occupant les terres du Fakara. Les champs fumés représentent à partir de cette évaluation par le système d'information géographique, 32.5% des terres cultivées à Banizoumbou, 29% à Tchigo Tegui et 28% à Kodey. Compte tenu de l'importance des terres dans les différents terroirs, ces champs fumés représentent 9.7% des terres totales de Banizoumbou, 13.3% des terres totales à Tchigo Tegui et 20.1 % des terres totales à Kodey. Ces statistiques sur les champs fumés sont conformes aux publications de Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.* (1997). Le recyclage de la matière organique issu de notre approche de modélisation spatiale de la mobilité du bétail à l'aide du système d'information géographique donne des résultats plus proches des données publiées que celles effectuées dans l'étude de Busqué qui reste très peu basée sur le SIG. Pour l'azote, par exemple, le recyclage moyen de la zone étudiée pour les 461 exploitations est de l'ordre de 42%. En considérant l'ensemble des zones cartographiées, le recyclage moyen des éléments minéraux est respectivement de 40%, 87% et 42% pour N, P, K. Dans les résultats de l'étude sus citée, le recyclage moyen de la zone est de 30%, 50% et 10% pour N, P, K. Cette différence est l'une des raisons du bilan partiel très négatif de cette dernière étude. En comparant les résultats du recyclage dans les différentes études et surtout celles ayant été conduites dans la même zone, nos résultats sont plus proches de l'étude de Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.*, (1997) qui donne un niveau de recyclage de 48% et 85% pour N et P. Il en est de même des excréptions lors de la pâture qui restent plus faibles dans l'étude de Busqué (2002) que dans notre étude. Les répartitions en faveur des zones de culture rapportées dans le chapitre 5 se rapprochent plus des cas relevés à Tchiko dans Schlecht, Hiernaux *et al.* (2006) où 39% des excréptions sont effectuées dans les champs, 31% dans les pâturages, 20% dans les jachères et 10% dans les zones périphériques des villages. Ces différences ou similarités en certains points avec les travaux conduits sur les mêmes jeux de

données se révèlent intéressantes comme apport dans l'évaluation des bilans sur les aspects suivants :

- L'intérêt de l'unité de base (occupation des sols, unités parcellaires)
- La prise en compte de la pâture à l'extérieur de l'exploitation et le terroir

Les travaux menés par Manlay (2000) au Sénégal prennent en compte, comme dans notre étude, la dimension de la mobilité du bétail et plusieurs autres aspects relatifs au fonctionnement de la matière organique dans les systèmes culture-élevage. Les bilans sont spatialisés à l'échelle du terroir. Les flux entrant dans le calcul des bilans sont ceux liés aux cultures, aux transferts du bétail et à la collecte du bois. Ce dernier flux n'est pas pris en compte dans notre étude. Les bilans obtenus sont tous négatifs dans cette étude. Les valeurs les plus proches de la présente étude sont celles des jachères dans les auréoles de brousse avec un bilan de -3 kg/ha sans le bois pour l'azote contre -3.45 kg/ha dans la présente étude. Les bilans de phosphore sont identiques. Du fait de l'existence de culture de rente dans cette région du Sénégal, les zones cultivées ne sont pas comparables à la zone du Fakara.

Dans le nord du Burkina Faso, dans une région frontalière du l'Ouest-Niger, Krogh (1997) a établi à travers une méthode empirique, le bilan des éléments minéraux de l'azote et du phosphore sur deux échelles, la parcelle ou le champ et le village avec des objectifs spécifiques pour chaque échelle. A l'échelle des parcelles où les bilans sont calculés pour évaluer la dégradation, trois scénarii correspondant à des seuils de combinaison des percentiles 75 et 25 des exportations et des apports d'éléments nutritifs ont été établis. Le transfert de fertilité par le bétail a été estimé sur base des coefficients de l'étude de Stoorvogel et Smaling (1990c) et un bilan global a été calculé sur base d'estimations des flux environnementaux. L'évaluation des bilans partiels sur base des flux relevés dans Krogh (1997) peut être comparée à nos résultats qui portent sur les quantiles des bilans partiels N, P, K par occupation des sols. En considérant les différents quantiles calculés, et les cultures (fumées ou non), les bilans partiels d'azote et de phosphore dans les conditions moyennes sont similaires au percentile 25. De même, les situations optimistes sont similaires au percentile 75. L'étude de Krogh conduite à l'échelle des champs sur deux types de sols, confirme notre hypothèse de l'absence d'impact du type de sols sur les bilans partiels.

En zone soudanienne au Mali, Kante (2001) a évalué le bilan partiel des exploitations par culture et par exploitation. Le mil est la culture commune entre cette zone et la région du Fakara. Les flux calculés sur cette région du Mali s'étendent jusqu'aux déchets ménagers et aux déjections animales du bétail. L'évaluation du bilan partiel dans cette zone a porté sur plusieurs flux de type 1 et 2. Les bilans partiels de l'azote varient entre -60 kg/ha et -234 kg/ha/an. Ils restent de loin plus faibles que ceux des cultures dans l'Ouest du Niger à cause des fortes exportations des résidus et de l'influence de la taille du troupeau. Dans cette région cotonnière du Mali, les exploitations possèdent beaucoup de bétail tant pour les troupeaux d'élevage que pour la traction attelée. La comparaison des bilans par type d'exploitation du Mali sud avec ceux des deux catégories d'exploitations du Fakara (Gestionnaire et Non gestionnaire) montre de faibles différences entre les exploitations de Kodey et les classes I et II de M'Peresso surtout au niveau du bilan d'azote, et entre les exploitations gestionnaires de Tchigo Tegui et celles de la classe II de Noyaradougou. Ces différentes classes d'exploitation du Fakara ont une tendance à l'intensification par une utilisation plus accrue des déjections animales, à l'image des exploitations du Sud Mali. Cependant la similitude réside essentiellement dans la pression sur les terres plus forte à M'peresso comme à Kodey et avec un cheptel important. En revanche, la disponibilité des terres offre encore du pâturage aux exploitations de Tchigo Tegui et de Noyaradougou. Ces tendances confirment les limites observées dans l'intensification des terres dans les systèmes culture-élevage dans les zones où la pression sur les terres a atteint ces limites.

Dans la même région du Mali, trois systèmes agricoles distincts ont été étudiés par Ramisch (1999) qui montre que les bilans sont surtout fonction de leur dépendance à l'égard du bétail, des engrains et de l'utilisation des terres. Dans ces régions, l'utilisation d'engrains minéral est plus prononcée dans les villages. Dans la répartition de ces zones entre les autochtones villageois, les hameaux, et les campements peuls, les bilans évalués des campements peuls sont 10 fois plus élevés que ceux des villageois surtout à proximité des localités. En effet, cette variabilité du bilan des champs proches des localités par rapport aux champs éloignés est liée à plusieurs facteurs dont l'apport des déchets ménagers, des déjections humaines. Ces bilans partiels en azote sont similaires à ceux des gestionnaires de Tchigo Tegui. Cette forte différence des bilans constatée dans l'étude sus citée est liée essentiellement à l'apport de déjections animales dans les champs, essentiellement lié à l'importance du cheptel.

Les différentes comparaisons des bilans partiels obtenus dans d'autres zones en ASS font ressortir l'importance de la prise en compte de la spatialité de l'ingestion et de l'excrétion, donc de l'élevage pour mieux cerner la variabilité des bilans à différentes échelles.

Des flux environnementaux vers le bilan global des terres : Une question d'échelle

L'approche NUTMON dans l'évaluation du bilan global des éléments minéraux dans le système considéré et ses différentes unités fait intervenir les apports et les sorties dits environnementaux. L'évaluation de ces flux ne fait pas partie des objectifs de la présente étude. Les bilans partiels à eux seuls ne permettent pas d'expliquer la durabilité des agroécosystèmes culture-élevage. Il faut donc considérer les différents flux environnementaux qui interagissent avec les flux de gestion pour assurer le fonctionnement de ces agroécosystèmes en dépit du fait qu'ils restent jusque là mal ou peu quantifiés. Il est admis dans la plupart des études de bilan qu'une mise en regard des bilans partiels avec les autres termes du bilan permet d'avoir une idée grossière des valeurs attendues d'un bilan global. Cette démarche est la plus fréquente dans l'évaluation des bilans globaux relevés en Afrique. En effet, ces flux dans l'approche NUTMON, de type 3 à 6 sont jugés comme les plus difficiles à obtenir à partir des mesures (Van den Bosch, De Jager *et al.*, 1998). Il s'agit des apports minéraux atmosphériques, de la fixation biologique de l'azote atmosphérique, des pertes minérales par érosion et ruissellement, des pertes minérales par lessivage et des pertes d'azote sous forme gazeuse. D'autres flux non atmosphériques non pris en compte dans cette étude que nous tenterons d'inclure dans cette discussion avec des estimations grossières existantes sont ceux liés aux exportations de matière organique, liés à la consommation de bois, aux déjections des autres espèces animales et aux déjections humaines.

Les valeurs de ces flux sont généralement estimées ou évaluées à partir de fonctions dites de transfert qui sont des fonctions linéaires ayant comme donnée d'entrée selon le flux, la pluviosité annuelle, les caractéristiques physico-chimiques du sol ou les quantités évaluées sur d'autres flux. En Afrique de l'Ouest, la plupart des calculs de bilan ont appliqué ces fonctions de transfert (Stoorvogel et Smaling, 1990b; Krogh, 1997; Ramisch, 1999; FAO, 2004; Kanté, Smaling *et al.*, 2007) ou rappelé les données issues de la littérature (Buerkert et Hiernaux,

1998; Manlay, 2000; Schlecht, Hiernaux *et al.*, 2004) pour arriver à une estimation très grossière du bilan global.

Les flux atmosphériques (IN3) sont liés à la pluie et à la poussière du vent. Les apports secs et humides contribuent au processus de redistribution de l'azote dans les écosystèmes terrestres (Tychon, Borgh et al., 1999). Ces flux ont fait l'objet de travaux très anciens en Afrique de l'ouest notamment au Burkina Faso (Roose, 1979; Roose et Barthés, 2001). Ces flux verticaux proviennent essentiellement des précipitations (Muoghalu et Oakhumen, 2000) et de la poussière de l'harmattan en provenance du Sahara (Rajot, Stoorvogel, Janssen *et al.*, 1997). Les valeurs moyennes de teneurs en éléments nutritifs de l'eau de pluie sont de l'ordre de 4.88 ± 2.47 , 0.63 ± 0.55 et 2.63 ± 1.10 g/ha/mm de pluie pour N, P, et K (Roy, Misra *et al.*, 2003). Ces valeurs moyennes et leur écart type, en considérant une distribution normale des données et la création d'une série de 10 000 observations par la méthode de Monte Carlo indiquent de grandes variations sur les valeurs de N, P, K avec des coefficients de variation respectifs de 50.1%, 89.14%, 42.0%. Cette forte variabilité des données tout venant sur les flux environnementaux peut entraîner d'énormes conséquences dans l'utilisation des bilans qui en sont déduits et surtout quand ils sont considérés par des instances comme l'IPPC⁴⁶ (Færgé et Magid, 2004). La quantité d'azote annuelle issue de la conversion de ces valeurs pour l'azote, provenant de l'eau de pluie dans le Fakara est de l'ordre de 2.6 kg/ha/an. Cette valeur se situe entre 4 et 8 kg/ha/an dans la zone sahélienne (Buerkert et Hiernaux, 1998). Dans le même sens, le phosphore issu de l'eau de pluie est de 0.33 kg/ha/an. Cette quantité est inférieure à celle fournie par Buerkert et Hiernaux (1998) qui est comprise entre 1.3 et 2.1 kg/ha/an. Les teneurs en azote de la poussière de l'harmattan⁴⁷ sont de l'ordre de 38.10^{-4} , 79.10^{-5} et 187.10^{-4} kg/kg de poussière pour N, P et K avec pour le Niger des dépôts moyens de poussière de l'ordre de 1640 kg/ha à 2000 kg/ha relevés en station expérimentale (Drees, Manu *et al.*, 1993, Roy, Misra *et al.*, 2003). Les apports en potassium de ces poussières sont de l'ordre de 1.1.kg/ha à Ouallam avec des variabilités interannuelles importantes (Herrmann, Bleich *et al.*, 1993). L'apport d'éléments nutritifs issu des retombées atmosphériques, vent et

⁴⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change

⁴⁷ L'harmattan, est un vent chaud, sec chargé de poussières fines dont les particules sont comprises entre 0.05 et 1 µm entre le mois de novembre et décembre. En dépit des apports de poussière, ce vent entraîne beaucoup de maladie qui sont la cause d'une mortalité importante au Sahel de l'ordre de 25 000 habitants au Niger et au Burkina Faso (Fléchet, 2008)

pluie, peut être estimé à environ 3.2 kg/ha, 0.5 kg/ha et 2.1 kg/ha pour N, P, et K sur la base de l'ensemble de ces informations. Ces valeurs sont inférieures à celles utilisées par Ramisch (1999) au Mali dans la zone cotonnière et par Krogh (1997) au Burkina Faso. Ces différences seraient liées à la proximité de l'océan (Pieri, 1989) et dans certains cas à la proximité du Sahara voire du bassin du Tchad (Stoorvogel, Van Breemen *et al.*, 1997).

Les flux liés à la fixation de l'azote atmosphérique (IN4) proviennent essentiellement de la présence des légumineuses présentes dans les cultures ou dans les zones non cultivées et des arbres fixateurs. Ces fixations biologiques s'effectuent par des micro-organismes non symbiotiques, négligeables dans les cultures pluviales (Pieri, 1989) ou par des associations symbiotiques entre les bactéries fixatrices et certaines légumineuses. Dans les zones sahéliennes, plusieurs légumineuses comme l'arachide et le niébé contribuent à la fixation symbiotique de l'azote. Les pourcentages d'accumulation de l'azote sont évalués à 50% des besoins pour l'arachide et à 55% pour les autres légumineuses (FAO, 2004). Les travaux de Bado (2002) au Burkina Faso ont permis d'évaluer la fixation de l'azote atmosphérique de l'arachide et du Niébé. L'arachide mobilise dans l'atmosphère entre 27 et 34% de ses besoins sur une période de deux ans, soit entre 8 kg/ha et 23 kg/ha. Le niébé mobilise 25 à 64% de ses besoins soit 15 kg/ha à 143 kg/ha. Pour le niébé, le pourcentage d'accumulation pris en compte dans NUTMON est de 60%. Il a été ramené à 45% pour l'évaluation des flux de IN4 pour tenir compte des travaux proches de la zone d'étude (Bado, 2002). Cette accumulation de l'azote atmosphérique dans les conditions des sols au Niger peut être inférieure à ces valeurs en raison de leur faible taux en matière organique (Hafner, Ndunguru *et al.*, 1992). De même, seule une fertilisation adéquate des légumineuses permet d'améliorer leur capacité à fixer l'azote atmosphérique (Bado, 2002). La contribution du niébé dans l'amélioration du rendement du mil reste aussi fonction de la gestion des résidus par les exploitations (McDonagh et Hillyer, 2003) . Dans le cas des légumineuses des parcours et des ligneux, Penning de Vries et Van Keulen (1982) estiment la part de l'azote obtenue par fixation entre 50% et 65%. La fixation d'azote par les ligneux ne dépasserait pas 0.1 kg/ha dans le nord du Sahel (Buerkert et Hiernaux, 1998). Dans le cas du Fakara, une des légumineuses présente surtout dans les jeunes jachères est *Zornia glochidiata* avec une contribution spécifique⁴⁸

⁴⁸ La contribution spécifique est un terme utilisé en phytosociologie pour exprimer la contribution de plusieurs espèces végétales.

moyenne de 11.4% (Hiernaux et Ayantude, 2004). Les coefficients retenus pour le calcul de la fixation symbiotique de l'azote pour les jachères est de 60%, pour les mauvaises herbes 30% et les ligneux 10%. Parmi les ligneux, *Acacia Albida* est très fréquent dans le Dallol du Fakara, au sud du terroir de Kodey, aussi bien dans les cultures que dans les jachères (Hiernaux et Ayantude, 2004 ; Hiernaux, Ayantude *et al.*, 2009). Cette espèce est souvent citée comme ayant des capacités de fixation de l'azote (Kirmse et Norton, 1984) grâce à des nodosités racinaires abritant les bactéries fixatrices d'azote (Guinko, 1997). Plusieurs travaux ont mis en évidence la nette amélioration des terres dans les parcs agroforestiers sous cette espèce (Payne, Williams *et al.*, 1998; Kho, Yacouba *et al.*, 2001, Traoré, Thiombiano *et al.*, 2007) avec des rendements de plus de 36 % à 100% plus élevés en plein champ et un niveau d'azote pouvant atteindre 200% . Toutefois, il semble que ces améliorations agronomiques soient dues à plusieurs autres facteurs liés à la perte des feuilles, aux animaux pâtarant pour ses fruits et aux oiseaux (Antoine, Ouola *et al.*, 2006). Pour la fixation non symbiotique, l'approche NUTMON estime que toutes les cultures bénéficient de cet apport. Cependant la formule proposée pour son calcul exclut les zones dont la pluviosité est inférieure à 950 mm. L'équation utilisée par Krogh (1997) au Burkina Faso pour calculer la fixation non symbiotique est une relation basée sur la pluviosité annuelle. Les quantités mobilisables sont de 0.09 kg/ha. L'application de cette formule dans la zone du Fakara, donne 0.05 kg/ha/an d'azote qui est conforme aux normes utilisées par Stoorvogel et Smaling (1990c) pour les calculs de bilan au Niger. Dans les études de bilan au Mali (Kanté, Smaling *et al.*, 2007), l'azote mobilisé par cette voie est de 4 et 5 kg/ha dans les deux villages étudiés. Cette région a une couverture végétale plus importante que le Fakara. Sur la base des superficies de niébé, de la contribution des légumineuses aussi bien dans les champs que dans les jachères, l'apport de la fixation de l'azote est évalué à 0.02 kg/ha.

Le lessivage de l'azote et du potassium (OUT 3) est une des causes de la baisse de fertilité en Afrique Sahélienne. L'étude de Smaling et Stoorvogel (1993) estime à 0.04 kg/ha les pertes d'azote et de phosphore au Niger. Les quantités d'azote et de potassium perdues par lessivage et dénitrification sont fonction des apports d'engrais et du pourcentage d'azote minéralisable dans NUTMON (Smaling, Stoorvogel *et al.*, 1993). Au Burkina Faso, Freschet, Masse *et al.* (2008)⁴⁹ trouvent que le potentiel de dénitrification est très bas dans les sols sableux. Les

⁴⁹ Voir page 177 dans Freschet, Masse *et al.*, 2008 pour le potentiel de dénitrification.

valeurs utilisées dans l'étude de Stoortvogel (1993) pour le lessivage sont inférieures à celles trouvées au Niger qui sont de l'ordre de 0.3 à 10 kgN/ha (Buerkert et Hiernaux, 1998). Des valeurs très élevées sont observées dans le cas de fumure importante. Brouwer et Powell (1998) rapportent des pertes de l'ordre de 91 kg/ha de N et 19 kg /ha de P pour une application de 13 T MS/ha de déjections animales. Cette variabilité du lessivage est fonction de la toposéquence et de la profondeur du sol considéré. Les valeurs calculées dans l'approche NUTMON donnent une bonne distribution de OUT3 selon les unités primaires de production avec une valeur moyenne de -2.29 ± 0.03 kg/ha/an. Les valeurs les plus élevées sont relevées dans les champs fumés qui ont une moyenne de -4.48 ± 0.18 kg/ha/an. Les autres occupations de sols ont en moyenne une valeur de -1.9 kg/ha/an qui est comprise dans l'intervalle relevé au Niger par Buerkert et Hiernaux (1998). Les valeurs de K sont en moyenne de 0.02 kg/ha avec des valeurs plus élevées dans les champs de l'ordre de 0.13 kg/ha. Les pertes par lessivage prises en compte dans l'estimation du bilan global sont respectivement pour N et K de -2.29 et de -0.02 kg/ha.

Les pertes d'azote sous forme gazeuses (OUT4) correspondent aux processus de dénitrification et de volatilisation liées aux déjections animales (Tychon, 1993). Dans les sols du Fakara, les émissions de NH₃ ont lieu dans les zones de parage essentiellement à cause des concentrations élevées et aussi dans les parcours au niveau des tampons d'urine. Une grande partie de l'azote urinaire déposé lors du parage se perd par lessivage ou par volatilisation (Sangaré, Bationo *et al.*, 2002). Les pertes évaluées par volatilisation de l'urine au Niger (Powell, Ikpe *et al.*, 1998) varient entre 30 à 50 % de l'azote total contenu dans ces déjections. Ces émissions dépendent de plusieurs facteurs comme la température, l'humidité, et le vent. Les normes utilisées dans NUTMON sont de 30% pour l'azote total et de 50% pour le potassium contenu dans les déjections fécales. Ces pertes sont évaluées dans NUTMON comme une fonction du contenu en argile, de la pluviosité annuelle, des apports azotés et du contenu en azote organique du sol. En considérant des pertes de l'ordre de 30%, la volatilisation dans les parcelles recevant des quantités importantes de déjections animales est évaluée à 14 kg/ha en moyenne soit 13% du total des entrées d'azote dans ces unités primaires de production. En dépit des travaux cités sur les mesures de dénitrification dans Færge et Magid (2004), plusieurs imprécisions existent sur l'évaluation de la dénitrification en ASS. De

plus, eu égard aux limites liées aux méthodes de mesure de ces pertes (Tychon, Borght *et al.*, 1999), les pertes évaluées peuvent être moins importantes dans les sols acides de l'ASS.

Les pertes par érosion (OUT5) dans l'approche NUTMON sont évaluées à l'aide de l'équation universelle de perte des terres (EUPPT en français et USLE⁵⁰ en anglais). Le modèle USLE (Wischmeier et Dwight, 1978) utilisé dans NUTMON est une fonction multiplicative de l'érosivité des pluies par la résistance du milieu (érodibilité, facteur topographique, couvert végétal et pratiques culturales, pratiques antiérosives) (Roose et Noni, 2004). Plusieurs travaux (Sonneveld et Nearing, 2002) ont montré que ce modèle USLE n'est pas très robuste car L'EUPPT prévoit uniquement l'importance des pertes de terre qui résultent des érosions en nappe sans tenir compte des autres formes d'érosion comme l'érosion en ravine ou encore l'érosion éolienne (Stone et Hilborn, 2000). Mati et Veihe, (2001) montrèrent dans leurs travaux que USLE surestime les pertes en Afrique de l'Ouest par rapport aux régions comme le Kenya. L'érosion est incontestablement un des facteurs importants de la dégradation des sols (Wischmeier et Dwight, 1978 ; Bielders, Rajot *et al.*, 2004; Visser, Sterk *et al.*, 2005). Elle est considérée comme un des facteurs essentiels de la perte des éléments nutritifs dans les sols (Collinet, Valentin *et al.*, 1980) avec des conséquences graves sur la sécurité alimentaire des populations (Stocking, 2003). En tant que processus de perte de la matière organique, l'érosion peut altérer de manière durable les agroécosystèmes (Pieri, 1989). Stangel, (1995) estime que les pertes liées à l'érosion en ASS représentent 40% du total des EN avec une très forte variabilité entre les régions. Pour les différentes zones agro-écologiques du Niger, les pertes en terres ont été évaluées par Stoorvogel et Smaling, (1990) entre 10 et 25 t/ha/an. Ces données sont acceptables à l'échelle d'une parcelle mais sont par la suite capturées dans les jachères (Bielders, Rajot *et al.*, 2002). Avec un contenu en N de 0.023%, les pertes de N, P, K suivant les quantités de terres érodées sont évaluées à respectivement -0.30, -0.02 et -0.2 kg/ha à l'échelle des U.P.P, donc de la parcelle. Ces valeurs sont inférieures à celles calculées pour le Burkina Faso (Krogh, 1997) et au Mali (Kanté, Smaling *et al.*, 2007) qui sont des zones où le contenu en azote et en matière organique des terres est plus élevé qu'au Niger. L'érosion considérée dans NUTMON est dite hypothétique sans précision de la nature. L'équation USLE (Universal Soil Loss Equation) qui est utilisée traite essentiellement de l'érosion en nappe. Les flux OUT5 représentent donc en grande partie les pertes liées à

⁵⁰ Universal Soil Loss Equation

l'érosion hydrique. Ces quantités d'EN perdues représentent respectivement 7%, 1.5% et 18.3% de N, P, K contenus dans le rendement en grain de mil d'un hectare au vu des pertes moyennes évaluées à -0.65, -0.04 et -0.42 kg/ha. Dans le concept du bilan de l'exploitation dans NUTMON, elles ne sont pas prises en compte au niveau de l'exploitation mais au niveau de la parcelle constituant la plus petite unité de l'activité de production végétale et elles sont agrégées au niveau des UDE. Cette approche suppose que l'érosion hydrique est un phénomène très localisé. Dans les analyses à long terme de Pieri (1989), l'érosion hydrique était déjà considérée comme une des sources importantes de pertes en terre, donc de pertes minérales à travers les eaux de surface et le drainage. Au Burkina Faso, les travaux de Bilgo, Hien *et al.*(2004) indiquent des pertes liées à l'érosion hydrique dans les cultures de l'ordre de 8 à 27 kg/ha pour l'azote et 270 à 727 g/ha pour le phosphore. Ces pertes sont retenues par les jachères en aval des zones cultivées. De même, les travaux de Visser, (2005) et de Ribolzi, Hermida *et al.* (2006) au Burkina Faso ont permis de montrer que l'érosion hydrique doit être prise en compte dans une dynamique de bassins et non à l'échelle parcellaire. Cependant les pertes en N, P, K sur les trois unités géomorphologiques étudiées que sont les dunes, les zones dégradées et les vallées restent néanmoins faibles. Les pertes d'azote ont été évaluées à -0.01 kg/ha pour les dunes, -0.21 kg/ha pour les vallées. Au niveau de la parcelle, différents auteurs ont montré que les pertes les plus importantes étaient liées à l'érosion éolienne. En effet, plusieurs travaux conduits au Niger (Collinet, Valentin *et al.*, 1980 ; Casenave et Valentin, 1989) ont montré l'importance de l'érosion éolienne dans le transport et le dépôt des éléments nutritifs du sol (Bielders, Rajot *et al.*, 2002). Ce transport s'effectue selon trois modes de déplacement en fonction de la taille des particules, par saltation (20 à 500 µm), par reptation (> 500 µm) et par suspension (< 20 µm) (Bielders, Rajot *et al.*, 2004). Ce rôle du vent est bien connu des agriculteurs (Visser, Leenders *et al.*, 2003) par son apport en éléments nutritifs et de fortes variabilités induites par le vent sur la croissance des cultures (Sterk, Stein *et al.*, 2004). Ainsi, pour l'évaluation des bilans de masse, ce sont les flux horizontaux qui sont pris en compte à l'échelle de la parcelle ou du champ (Sterk, Herrmann *et al.*, 1996; Bielders, Vrieling *et al.*, 2001), et les flux verticaux à l'échelle du terroir ou du village (Visser et Sterk, 2007). Les pertes d'éléments nutritifs évaluées sur deux jours sur des parcelles de jachères en station par Sterk, Herrmann *et al.*(1996) étaient pour les macro éléments N, P, K de l'ordre de 18.3, 6.1, et 57.1 kg/ha. Dans l'Ouest du Niger, les travaux de Bielders, Rajot *et al.*, (2002) mettent l'accent sur les bilans de l'érosion éolienne sur deux types d'occupation des sols, les

champs cultivés et les jachères. Ces travaux mettent en évidence les interrelations entre les parcelles de champs et les jachères mitoyennes, de même que le gradient existant dans la composition des dépôts éoliens, les sédiments et la distance. Les pertes d'éléments nutritifs enregistrées dans les champs étaient de l'ordre de 1.3, 0.6 et 1.2 kg/ha de N, P, K. Sur la jachère jouxtant la parcelle cultivée, les flux enregistrés représentent systématiquement moins de 3% des flux environnementaux mesurés et on enregistre une redéposition des sédiments qui améliore la fertilité des jachères. Un tel système améliore le bilan à l'échelle d'un terroir s'il y a un équilibre entre les jachères et les zones cultivées. Une telle situation n'est pas présente dans deux terroirs du Fakara : Tchigo Tegui et Kodey. En combinant les deux types d'érosion, les résultats obtenus par Visser, Sterk *et al.* (2005) mettent en évidence que les pertes et les accumulations dépendent de l'état de dégradation des zones avec une compensation pouvant conduire à un bilan nul dans certains cas. L'érosion hydrique au Sahel liée aux pluies torrentielles de début de saison qui s'abattent sur les terres presque nues, entraîne des pertes considérables en terre et en éléments nutritifs (Stroosnijder, de Ridder *et al.*, 2001). Les estimations réalisées au Burkina Faso par Geelhoed (1995), cité par Visser, Stroosnijder *et al.* (2005) sont de l'ordre de 51 kg/ha de N et 8.7 kg/ha de P. En combinant l'érosion éolienne et l'érosion hydrique, les bilans de Visser (2005) au Burkina Faso sont pour N et P, négatifs dans les espaces dégradés et très positifs dans les vallées. L'ensemble de ces processus complexes contribuent essentiellement à rendre l'environnement parcellaire sahélien très variable et à maintenir une légère fertilité dans les bassins versants qui assurent le fonctionnement minimal des terroirs au fil des siècles (Rajot, 2009). De ces différents travaux, il ressort qu'au niveau de la parcelle, comme c'est le cas de notre étude, l'érosion éolienne peut être importante en causant des pertes dans les zones cultivées et des gains dans les zones végétalisées. En revanche, à l'échelle d'un terroir, le bilan de ce type d'érosion peut être nul s'il n'y pas trop de déséquilibre entre les zones cultivées et les jachères. L'érosion hydrique, quant à elle, fonctionne essentiellement à l'échelle des bassins, et peut entraîner d'énormes pertes d'éléments nutritifs. Les pertes liées à l'érosion calculées par NUTMON à l'échelle de la parcelle sont de l'ordre de -0.29 kg N/ha, - 0.02 kg P/ha et -0.19 kg K/ha avec des valeurs plus élevées dans les zones de cultures non fumées. Ces valeurs sont largement inférieures aux valeurs calculées par Krogh (1997) au Burkina Faso dans les sols argileux et par Kanté, Smaling *et al.* (2007) au Mali. Les sols des zones d'étude des deux exemples ci-

dessus cités sont plus riches en argile et en humus que les sols du Fakara et les éléments nutritifs érodés peuvent être plus importants que sur les sols sableux.

Les flux OUT6 portent sur les déjections humaines qui sont des agrégats de protéines, carbohydrates et de graisses. Elles sont composées de deux types de déchets organiques qui sont les matières fécales contenant 65 à 80% d'eau, et l'urine contenant 95% d'eau. Les autres composants importants sont la matière organique comprenant azote, phosphore, potassium, carbone et calcium principalement. La production moyenne d'un adulte par an est environ 500 litres d'urine et de 50 litres de déjections solides, ce qui correspond approximativement à 5.7 kg N, 0.6 kg P et 1.2kg P soit 7 kg d'engrais NPK (si l'on prend en compte la composition moyenne de NPK utilisée) correspondant aux amendements minéraux nécessaires pour produire 230 kg de céréales (Wolgast 1993 cité par Malkki, 1999; Herron, 2006). La norme de consommation céréalier au Niger est de 242 kg/habitant/an (CILSS, 2000). Ces déjections sont considérées comme perdues du système si les latrines sont utilisées. Si elles restent dans le système, on peut estimer à un apport de N, P, K de l'ordre de 2.0, 0.2, et 0.4 kg/ha en tenant compte de la densité de la population des trois terroirs étudiés. Les zones rurales du Niger comme celles de la plupart des pays du Sahel ne disposent pas de latrines et les déjections sont très concentrées autour des habitations, donc dans les champs de case. Le 3^{ème} rapport national sur le développement humain (PNUD, 2004b) estime que 90% de la population rurale est concernée par ce problème sanitaire. Les paramètres utilisés dans NUTMON sont de 25% de matière sèche avec les coefficients de N, P, K à 4.8%, 1.3% et 0.83% et une production de matière fraîche de 113.2 kg/an /adulte. Les quantités journalières sont fonction surtout de l'alimentation et de l'état de santé. Schouw, Danteravanich *et al.* (2002) trouvent qu'il n'y pas de différence significative entre sexe et âge sur la composition des déjections humaines et que la production est de 120 à 400 gr /jour et 0.6 à 1.2 litres/ jour dans le sud de la Thaïlande. Les normes retenues dans NUTMON correspondent bien à ces intervalles.

Les autres flux pris en compte dans NUTMON sont les déchets ménagers. En milieu rural, les déchets ménagers sont constitués essentiellement des résidus de meunerie (son de mil) et les autres déchets organiques. Très peu d'études existent sur la quantification des déchets en milieu rural en ASS. Les travaux menés en milieu urbain et semi-urbain indiquent que la production des déchets ménagers varie selon les zones (Farinet et Niang, 2004) de 0.3 kg/habitant/jour à 1.4 kg/habitant/jour. Dans les pays à faible revenu, la production des

déchets est de l'ordre de 200 kg/hbt/an. La production en milieu rural serait de loin inférieure étant donné les modes de consommation car les déchets sont essentiellement des sous-produits agricoles (produit de meunerie) et les cendres. La teneur en N, P, K est estimée à 0.005, 0.001 et 0.007 en pourcent de matière sèche (NUTMON). Dans le cas du Fakara, aucune évaluation n'a été faite sur ces déchets ménagers. Ces déchets ménagers conduiraient à un apport de N, P, K de l'ordre de 0.17, 0.04 et 0.30 kg/ha essentiellement concentré dans les champs proches des villages.

Un des flux important est la consommation de bois à l'échelle du village. Dans les zones rurales du Niger, le bois est essentiellement utilisé pour la cuisson des aliments et couvre 90% des besoins en énergie avec une consommation moyenne de l'ordre 1.25 kg/hbt/jour. (Ozer, 2004). La consommation de bois-énergie au Niger est estimée à 1.85 kg/j (Loireau, 1998). Ces données sont plus proches de celles de Ozer (2004). Cette consommation est plus élevée que celle des travaux de Bazile (1998) cité par Manlay, Chotte *et al.*, (2002) qui est de l'ordre de 105.8 gr/hbt/jour. Le niveau de consommation de 1.25 kg/hbt/jour équivaut dans le terroir étudié à 160.8 kg/ha pour les 4415 personnes des trois sites du Fakara et sur une superficie de 12559.4 ha. En rappel, la production de masse de bois dans les pâturages, les jachères et les cultures est respectivement de 11.9 ± 0.8 t/ha, 6.8 ± 0.2 t/ha et 0.6 ± 0.1 t/ha soit une production moyenne de 4.9 t/ha dans l'ensemble des UPP étudiées. Sur la base des quantités d'éléments nutritifs N, P, K contenus dans 1 kg de matière fraîche de bois de l'ordre 0.005, 0.0001, 0.002 kg avec un pourcentage de matière sèche de 40%, les prélèvements en bois exporteraient 1.3 kg/ha d'azote, 0.03 kg/kg/ha de phosphore et 0.5 kg/ha de potassium. Cette exportation d'éléments nutritifs par l'utilisation du bois est en revanche très proche des bilans de Manlay, Ickowicz *et al.* (2004) si l'on considère uniquement les valeurs des auréoles de savane et de brousse. Le bois utilisé dans la construction des cases n'a cependant pas été évalué dans le Fakara. En ajoutant les prélèvements évalués autour de la ville de Niamey par Buerkert (1998), les quantités d'éléments minéraux N, P, K exportées par l'utilisation du bois atteindraient 1.5, 0.05, 0.9 kg/ha/an à l'échelle du terroir villageois.

D'autres apports liés aux déjections animales de la volaille de basse cour et des oiseaux n'ont pas été pris en compte. Ces apports de la volaille sont généralement faibles eu égard à leur concentration dans les concessions. Toutefois, sous la cime des arbres, les quantités déposées

peuvent atteindre 40 kg.MS/ha (Buerkert et Hiernaux, 1998). Des essais menés au Burkina Faso ont mis en exergue que la composition chimique des déjections des oiseaux (en matière sèche) est de l'ordre de 57.5% de matière organique, 7.2% d'azote, 1.3% de phosphore et 1% de potassium et permet d'améliorer le rendement coton sous les arbres (Antoine, Ouola *et al.*, 2006). Selon Petersen (2007), la densité spécifique des oiseaux au Sahel est très liée à la densité des ligneux. Dans les terroirs étudiés, eu égard à la densité des peuplements ligneux, la densité des populations d'oiseaux peut donc être faible. Concernant la volaille de basse-cour (poules, pintades essentiellement), elle a été prise en compte dans quelques études telles que celles conduites aux échelles nationales par Lesschen *et al.* (2007). La teneur en éléments nutritifs N, P, K (matière sèche) est de l'ordre de 1.08%, 0.39% et 0.35% et la production annuelle est estimée à 7.8 kg matière fraîche/kg poids vif⁵¹. Les cartes de densité de la volaille (FAO, 2007), avec une résolution de 0.05° (\approx 5.5 km de résolution) permettent d'estimer la volaille du Fakara sur la base des contours utilisés dans cette étude à environ 28.3 ± 5.4 volailles au km². Le poids moyen d'une volaille traditionnelle est de l'ordre de 0.6 à 1.5 kg (Djaby, 1983; Kondombo, 2005). Les quantités d'éléments minéraux N, P, K déposées annuellement par la volaille de basse cour sont respectivement de l'ordre de 1.43, 0.52 et 0.46. kg/ha selon ces estimations de la FAO.

La matière organique non appétée par les animaux reste importante tant sur les sols cultivés que dans les pâturages. Ces résidus de récoltes, les racines, les fruits rentrent dans le processus de décomposition microbiologique, d'attaque par les termites et autres insectes (Mando, 1997,Mando et Stroosnijder, 1999) qui varient dans le temps selon la nature de la matière organique, la température, l'humidité du sol et la pluviosité (Somda, Powell *et al.*, 1995). Des pertes peuvent être liées au piétinement des animaux. L'enfouissement de la matière organique par les termites, la décomposition dans les couches plus profondes du sol et le lessivage des éléments minéraux continuent pendant la saison sèche. (Franzluebbers, Juo *et al.*, 1994) . En prenant en compte les différents prélèvements, 75% des masses produites ont été utilisées sur l'ensemble des occupations de sols. La fraction restante en début de saison des pluies disparaîtrait très rapidement à la suite de dégradation par pourrissement favorisée par l'humidité ou par le ruissellement. Au Mali, Ramish (2005), dans l'évaluation du bilan

⁵¹ 1 kg de volaille vivante produit durant une année 7.8 kg de déjections fraîches .

d'azote des exploitations, considère que les pertes de résidus hors système ne représentent réellement que 3.6 % au niveau de l'azote.

A l'échelle des terres de l'exploitation ou des UPP, l'ensemble des flux mentionnés peuvent ne pas être internalisés, de même que le recyclage *in situ*. Cobo, Dercon *et al.* (2010) préconisent l'internalisation partielle de certains flux comme l'érosion à l'échelle des champs avec l'hypothèse que les pertes subies par une parcelle en amont sont récupérées dans une parcelle contigüe appartenant à l'exploitation. Cette hypothèse est conforme aux travaux de Bielders, Rajot *et al.* (2002) et de Visser et Sterk (2007) sur les faibles distances relevées de déplacement des particules en fonction de leur taille et la récupération des éléments minéraux par les jachères. Les restitutions de la volaille doivent être considérées de même que l'ingestion des déchets ménagers par l'ensemble des animaux de l'exploitation. En considérant les autres flux déjà évoqués à l'exception des flux liés aux déjections humaines, du bois, des déchets ménagers et de la basse-cour, le bilan partiel des flux environnementaux est respectivement pour N, P, K de -0.48, 0.29, 1.46. Le bilan global reste légèrement déficitaire pour l'azote des trois terroirs et légèrement positif pour le phosphore et le potassium. Ce résultat révèle une tendance moins négative que celle présentée par Stoorvogel, Smaling *et al.*, (1993). Cependant, il met en relief un système déséquilibré dans lequel les exportations ne sont pas compensées au niveau de l'azote. A titre d'indication, pour produire un hectare de mil, il faut apporter dans cette situation, en azote, phosphore et potassium respectivement 107%, 35% et 91% des besoins. De telles valeurs sont au-delà des valeurs négatives rencontrées dans l'évaluation des bilans des terres en ASS et restent plus proches des bilans trouvés par Manlay (2000) qui montrent que les agroécosystèmes culture-élevage à très faible apport d'intrant restent plus proches de l'équilibre tant que les besoins en eau sont satisfaits pour assurer une production végétale en conformité avec le stock minéral. Ces résultats confortent aussi les conclusions de La Rovere, Keulen van *et al.* (2008) selon lesquelles l'épuisement des sols dans le Fakara n'est pas aussi alarmant à l'image des conclusions de la plupart des études de bilan.

Apports et limites de l'approche utilisée

L'année prise en compte dans cette étude est assimilée à une année normale. Elle ne permet pas d'apprécier les situations où la pluviosité est déficitaire (3 années sur 4) ou excédentaire (1 année sur 10). Une évaluation sur des valeurs estimées de ces situations climatiques peut permettre d'appréhender les seuils critiques de durabilité des agroécosystèmes culture-élevage fournis par les bilans minéraux. Pieri (1989) préconise des bilans sur au moins deux années. Breman et De Ridder (1993) quant à eux recommandent, comme pour la production végétale, une évaluation sur 3 périodes correspondant à des seuils de probabilité de 10%, de 75% et de 50% de la pluviosité annuelle. De telles simulations peuvent être nécessaires pour la conduite d'actions ciblées sur les questions de la fertilité des sols aux échelles de l'exploitation agricole et des terroirs.

D'autres aspects méthodologiques sur le calcul des bilans partiels à ces échelles restent la grande variabilité liée à l'historique des terres qu'elles soient des jachères, des cultures et de manière générale, la gestion des terres pratiquée par les exploitations. L'impact de la gestion des terres peut entraîner des variations des caractéristiques physico-chimiques des types de sols d'un même village. Une telle tendance est lissée par la taille des échantillons mais reste un des facteurs qui influencent la production végétale. Au regard des travaux de Schlecht, Hiernaux *et al.* (2004) sur l'arrière-effet de la fumure, et de ceux de Achard et Banoin (2003b) sur la variabilité de la durée d'utilisation des terres et des jachères, une connaissance de l'historique des terres sur 5 ans au moins permet d'analyser une tendance qui intègre mieux la gestion des terres faite par les communautés rurales et la dynamique structurelle du fonctionnement du système sol-plante.

Les critiques à l'endroit de NUTMON et sur les bilans calculés en Afrique portent généralement sur les échelles spatio-temporelles des processus qui engendrent les différents flux (Schlecht et Hiernaux, 2004; Cobo, Dercon *et al.*, 2010), le changement d'échelle, et les incertitudes liées à plusieurs facteurs employés dans les fonctions utilisées pour les flux environnementaux. Au niveau très spécifique de l'élevage, les critiques portent sur la gestion communautaire des pâturages qui n'est pas prise en compte dans NUTMON. Le modèle élevage mis en place par NUTMON a été très peu utilisé au Sahel. L'échelle où cette étude a

été conduite (celle des terres de l'exploitation agricole) et la limite volontairement admise pour l'utilisation des données d'enquêtes (et très rarement des données estimées), ont permis de souligner l'importance de la gestion communautaire des parcours et leur intégration dans les flux à considérer dans les systèmes culture-élevage. Notre recherche intègre les variations temporelles des effectifs du cheptel, la variation spatiale de la production végétale et la gestion spatio-temporelle de l'élevage dans les parcours. A propos du changement d'échelle, l'objectif du travail étant volontairement limité aux terres de l'exploitation, seules les agrégations ont été effectuées à l'échelle du terroir. Cependant, l'imbrication de l'échelle des terres et de la gestion de l'exploitation pour le calcul des bilans partiels comporte des exigences en termes d'inventaire des pratiques paysannes qui peuvent influencer les différents flux. Relevons par exemple les techniques du brûlis, du paillage dans les champs qui n'ont pas été évoquées. Ces techniques ont été évaluées dans d'autres zones à proximité du Fakara et ne semblent pas très répandues (Schlecht et Buerkert, 2004). Cette étude diffère aussi des approches développées dans le cadre des travaux de Africa Nuances et de Ruffino (Ruffino, Tittonell *et al.*, 2007; Ruffino, 2008) car pour la prise en compte de l'élevage communautaire, ces études utilisent toujours NUTMON, tout en améliorant le partitionnement et la gestion des déjections animales dans la ferme par d'autres modèles.

Une des limites des études de bilan est liée à leur précision, leurs incertitudes et leur validation (Buzas, 1999; Oenema, Kros *et al.*, 2003; Lesschen, Stoorvogel *et al.*, 2007). Pour ce qui est de la précision, les bilans partiels calculés font intervenir une grande quantité de paramètres et des informations issues d'enquêtes ou d'expérimentations de laboratoire. Les plus importantes sont les mesures relatives aux masses végétales, au contenu en éléments nutritifs des productions agricoles, des déjections animales, aux estimations spatiales liées aux hypothèses sur les déplacements des troupeaux. Un second type d'erreur est lié à l'intégration des plans spatiaux dans le calcul des bilans. Oenema, Kros *et al.* (2003) classent les incertitudes sur les bilans en deux types essentiels, celles liées aux biais induits par la conceptualisation du système et celles liées aux estimateurs ou à la précision des bilans sur l'échantillon utilisé. Lesschen, Stoorvogel *et al.* (2007), dans une nouvelle approche de bilan spatialisé, évaluent pour les flux utilisés dans le bilan partiel, IN1, IN2, OUT1 et OUT2, des incertitudes relatives allant de 58% à 100%. Ces incertitudes sur les flux proviennent en partie des erreurs d'estimation des éléments entrant dans le calcul des flux qui sont rarement ou

jamais abordés dans les calculs à grande échelle et dans les modèles environnementaux. Les résultats de bilans donnent très rarement les marges d'erreur. Ces erreurs d'estimations, normales dans les mesures biologiques, en raison des fortes variabilités des facteurs qui les engendrent, existent et sont issues de recherches ayant été validées (Schlecht, Fernández-Rivera *et al.*, 1997; Turner et Hiernaux, 2002; Fernández-Rivera, Hiernaux *et al.*, 2005,).

6.5 Conclusion partielle

En partant de l'évaluation des différentes composantes du transfert de fertilité induit par l'élevage dans les agroécosystèmes culture-élevage, les parcours, le cheptel, sa dynamique temporelle et spatiale, et la quantification de l'ingestion et de l'excrétion aux échelles spatiales de la parcelle, des exploitations agricoles et les terroirs, la présente étude a permis d'améliorer l'évaluation des bilans partiels en intégrant les deux dimensions des agroécosystèmes, à savoir l'exploitation agricole et les ressources communautaires gérées à l'échelle du terroir. Cette approche d'évaluation du bilan partiel des systèmes culture-élevage à l'échelle des terres prend mieux en compte la spatialité du transfert des éléments minéraux grâce à l'apport d'un grand nombre d'informations spatiales et leur intégration dans un outil opérationnel NUTPAST. Cette amélioration concerne essentiellement la prise en compte de l'élevage par l'intégration des flux liés à l'utilisation des parcours communautaires à des échelles de temps saisonnières et des échelles spatiales liées à l'occupation des sols et au parcellaire des exploitations agricoles. L'approche diffère aussi des méthodes qui se focalisent uniquement sur les champs de l'exploitation comme NUTMON, car elle prend en compte l'ensemble des terres cultivées ou non, gérées par l'exploitation. En effet, elle permet d'évaluer et de préciser le bilan partiel à travers le parcellaire des exploitations agricoles qui comprend aussi bien les terres de culture que les autres. L'utilisation des cartes d'occupation des sols et la prise en compte de la mobilité du cheptel ainsi que le bilan de l'ingestion-excrétion apportent ainsi une amélioration dans l'évaluation des flux. De même, la taille de l'échantillon des exploitations suivies révèle l'hétérogénéité des conditions socio-économiques. Cette hétérogénéité a un impact sur l'utilisation des terres dans le milieu. Avec un tel panel statistique, une analyse des tendances (et des distributions) à travers les classes d'exploitation permet d'aboutir à des indicateurs plus précis qu'une simple classification de bilans selon le signe.

L'évaluation des bilans partiels à partir de la dynamique spatio-temporelle du transfert de fertilité qui caractérise les systèmes culture-élevage a certes été possible à l'échelle du terroir mais demande une quantité de données qu'il n'est pas possible de recueillir régulièrement dans le contexte des pays comme le Niger ou tout autre pays sahélien. Ainsi, la répétitivité et le passage aux échelles région d'une telle approche ne sont possibles qu'à travers l'utilisation de l'imagerie satellitaire, des cartes d'occupation de sols comme celles produites dans le cadre du programme GlobCover (Bicheron, Huc *et al.*, 2008) ainsi que des cartes de densité du bétail établies par la FAO (2007). Cependant, les charges pastorales relevées sur les différents types d'occupation des sols dans les études à l'échelle du terroir et des terres des exploitations agricoles peuvent être utilisées comme élément pondérateur afin de corriger l'absence de prise en compte de la mobilité dans l'utilisation des cartes de densité des effectifs du cheptel. Les futures évaluations de bilan nécessitent d'intégrer aussi des modèles de croissance de la production végétale et animale, d'ingestion et d'excrétion, des modèles dynamiques d'occupation des sols et de changements d'usage des terres (Rufino, Hengsdijk *et al.*, 2009; Cobo, Dercon *et al.*, 2010). Ces outils pourront communiquer entre eux à travers des échanges de données multi-formats (spatiales et tabulaires). D'autres approches globales, visant à intégrer les résultats de plusieurs études locales à des fins d'études de changement d'échelle, en vue d'orienter les futures recherches et les décisions politiques sont actuellement utilisées comme le système GFS (Smaling et Dixon, 2006). Les intérêts pour les bilans des éléments nutritifs (Vitousek, Naylor *et al.*, 2009) ainsi que les approches actuelles sur le changement climatique et leur impact sur l'agriculture et l'élevage dans les systèmes mixtes agriculture-élevage (Thornton, van de Steeg *et al.*, 2009) sont toujours croissants. Il en va de même des besoins de résultats basés sur la modélisation des bilans des éléments nutritifs à différentes échelles qui permettront de participer le plus pertinemment possible à l'élaboration de solutions idoines pour les problèmes de l'agriculture dans les pays en voie de développement de l'Afrique Sub Saharienne.

7 Evaluation du risque d'épuisement relatif des terres

L'objectif de ce chapitre est la mise au point d'un indicateur de risque d'épuisement relatif de la fertilité des terres à partir des variables de viabilité des exploitations agricoles et qui ajuste au mieux les tendances observées au sein de classes d'exploitations.

Le risque d'épuisement de la fertilité des terres est défini dans cette étude comme étant la probabilité prédictive par une méthode de type logistique, pour un **groupe d'exploitation** de tendre vers des classes de bilans partiels négatifs. Cette probabilité est considérée comme un indicateur de durabilité des agroécosystèmes dont la valeur est évaluée, de même que ces estimateurs statistiques. Dans cette étude, on parle de risque relatif (en référence à la méthode statistique logistique utilisée) ou risque partiel quand l'indicateur de durabilité est calculé à partir d'une seule variable de viabilité ou moyen quand il est calculé à partir d'un ensemble de variables de viabilité des exploitations agricoles.

Le risque peut être défini comme une probabilité de perte ou de conséquence néfaste. Elle exprime une situation impliquant une exposition au danger (Allen, 1984). Dans le dictionnaire de langue française (<http://www.larousse.fr/>), le risque est défini comme un danger possible, l'éventualité d'un préjudice, d'un évènement considéré comme un mal ou un dommage. Le risque en agriculture est souvent lié à des évènements qui entraînent des pertes graves en produits ou en ressources agricoles. Ses effets se comptabilisent au niveau des économies nationales et internationales, mais se gèrent d'abord et encore au niveau local (Lericollais, 1989). À la différence du risque mathématique qui se caractérise par sa probabilité d'apparition liée à des événements aléatoires, susceptibles de répétition et indépendants (Eldin et Milleville, 1989), le risque en agriculture n'est pas lié nécessairement à un déterminisme inconnu, car les causes et les origines peuvent être identifiées et aussi faire l'objet d'une évaluation quantitative (Garavini, 1997). La convergence des preuves "convergence of evidence" permet à la suite d'une analyse de plusieurs informations de définir une zone à risque, un groupe à risque. Le risque en agriculture peut être lié à une cause particulière (absence de pluies par exemple) ou à des effets complexes comme la perte de fertilité des terres.

Ainsi, le risque relatif ou partiel d'épuisement de la fertilité des terres d'une exploitation, d'un groupe d'exploitations ou d'une zone géographique, est défini dans notre recherche comme la probabilité des terres d'un groupe d'exploitations à présenter un bilan partiel des éléments nutritifs très déséquilibré. Cette notion est différente de l'état à un instant t du bilan partiel de l'azote dans le **sol**, car elle exprime une tendance moyenne des terres d'un groupe ayant des caractéristiques données dites structurelles, et qui leur sont conférées par l'ajustement du bilan partiel des éléments minéraux à des variables d'expression de la viabilité de l'agriculture.

Cette analyse du risque permet une valorisation des résultats de l'évaluation de bilans d'éléments minéraux, et tranche avec les approches classiques d'analyse de bilans qui consistent à présenter les localités étudiées en termes de zones à bilan négatif et positif. Notre approche permet d'identifier les facteurs liés à la gestion de l'exploitation qui influent sur ces bilans à travers une modélisation statistique. Elle permet aussi une comparabilité des exploitations et des terroirs concernés. Cette démarche vise dès lors à identifier les facteurs essentiels qui peuvent être utilisés dans une approche opérationnelle en plus de l'outil NUTPAST pour le ciblage des interventions dans les programmes de développement et de recherche sur les agroécosystèmes culture-élevage. Une telle approche est rendue possible par le maintien de la capacité analytique des bilans à la suite de l'utilisation d'une méthodologie basée sur la modélisation spatiale et qui assure le lien entre les flux liés à l'exploitation et ceux liés au terroir.

Cette méthode permet d'évaluer le risque et d'en déduire les estimateurs de celui-ci tout en apportant plus de précision pendant la restitution des résultats d'évaluation de bilans d'éléments nutritifs. Elle permet aussi d'apporter des réponses ou d'ouvrir de nouvelles pistes de recherche pour l'évaluation du risque dans les systèmes de production mixtes culture-élevage à travers la caractérisation des entités étudiées (exploitations agricoles, terroirs). Le risque d'épuisement relatif de la fertilité des terres est donc évalué à travers les bilans partiels de l'azote et des variables qui caractérisent la viabilité des exploitations agricoles. Il est ensuite analysé, précisé et spatialisé à l'échelle des classes d'exploitation agricole et du terroir.

7.1 Méthodologie

7.1.1 Les variables de viabilité de la gestion de l'exploitation et/ou des ressources communautaires

L'ajustement des bilans a pour objectif de rechercher les variables caractéristiques des exploitations dont la mise en relation avec les bilans partiels permet de définir des niveaux de risque d'épuisement relatif de la fertilité des sols. Pour ce faire, dix-sept variables de gestion de l'agriculture liées aux ressources disponibles (terre, homme, animal) ont été retenues et calculées pour chaque exploitation sur laquelle les bilans partiels ont été évalués. Parmi ces variables, la pression agricole sur les terres, le taux de jachère et l'intensité de fumure ont été déterminés aux deux échelles qui sont à la base de notre recherche, l'exploitation agricole et le terroir. Les variables portant sur l'exploitation agricole prennent en compte les superficies des unités de production primaire appartenant à cette exploitation pour les cultures, les cultures fumées, les jachères. Les variables à l'échelle du terroir proviennent des superficies évaluées sur des mailles de 3 km x 3 km superposées à la carte d'occupation des sols.

Les 17 variables retenues dans l'analyse sont :

1. le rapport entre les terres cultivées et les terres totales (ha/ha) : CUL1 ou (CUL1_S)
2. le rapport entre les terres cultivées et les pâturages hivernaux (ha/ha): CUL2
3. le rapport entre les cultures fumées et les terres totales (ha/ha): FUM1 ou (FUM1_S)
4. le rapport entre les cultures fumées et les terres cultivées (ha/ha): FUM2
5. le rapport entre les cultures fumées et les cultures non fumées (ha/ha): FUM3
6. le rapport entre les jachères et les terres totales (ha/ha): JAC1 ou (JAC1_S)
7. le rapport entre les jachères et les terres cultivées (ha/ha): JAC2;
8. le rapport entre la somme des jachères et des cultures sur les jachères (ha/ha): JAC3;
9. le rapport entre les jachères et les pâturages hivernaux (ha/ha): JAC4;
10. le nombre d'UBT total par surface de terre disponible (UBT/ha) : ELE1;
11. le nombre d'UBT total par surface cultivée (UBT/ha): ELE2;
12. le nombre d'UBT total par surface de pâture hivernale (UBT/ha): ELE3;
13. le nombre d'UBT total par surface fumée (UBT/ha): ELE4;
14. le nombre d'UBT total par habitant (UBT/hbt): ELE5;
15. la superficie totale des terres par habitant (ha/hbt): HAB1;
16. la superficie cultivée par habitant (ha/hbt) : HAB2;
17. la superficie cultivée par actif (ha/actif): HAB3

Les variables de viabilité ont été calculées sur la base des informations des exploitations utilisées dans la constitution des bases de données du Fakara. Les trois variables supplémentaires ont été déterminées à l'aide du système d'information géographique utilisé par NUTPAST. La procédure suivie est la suivante :

- Création d'une entité polygonale en grille, avec une résolution de 3x3 km sur l'ensemble de la zone du Fakara. Cette résolution a été choisie car elle permet d'intégrer les parcelles cultivées par les campements aux autres terres appartenant aux exploitations du village d'attache.
- Couplage par intersection spatiale du maillage avec la carte d'occupation des sols composée d'unités spatiales avec les modalités culture, culture fumée, jachère, friche, sol incultivable et zone habitée.
- Mise à jour des superficies en hectare des nouvelles unités issues de l'intersection spatiale.
- Application des routines SQL développées pour la somme des superficies par type d'occupation des sols dans les mailles et évaluation des nouvelles variables CUL1_S et FUM1_S et JAC1_S par maille;
- Réattribution des nouvelles variables aux UPP spatiales se superposant aux mailles
- Agrégation des UPP par exploitation agricole

7.1.2 Recherche des indicateurs pertinents

La méthode utilisée pour la recherche d'indicateurs pertinents ayant un effet significatif (seuil de probabilité $\alpha = 0.05$) sur le bilan partiel d'azote est la régression par quantile (Koenker et Bassett, 1978). La régression linéaire dite normale décrit comment une valeur moyenne d'une variable à expliquer varie avec les ou la variable(s) explicative(s). La régression par quantile, elle, décrit comment les quantiles d'une variable à expliquer varient avec les ou la variable(s) explicative(s) (Vancolen, 2004). Cette méthode convient bien aux données pour lesquelles l'hypothèse de normalité a été rejetée (seuil de probabilité $\alpha=0.05$). Cette approche statistique ne requiert pas la stabilité des variances (Koenker et Hallock, 2001). A la différence de la régression linéaire qui permet d'ajuster une variable indépendante à l'aide d'une seule moyenne, la régression par quantile permet un ajustement des différents quantiles conditionnels de séries de données où la distribution de la variable indépendante est asymétrique autour de la moyenne, et avec l'existence d'une forte hétéroscédasticité. La régression par quantile permet de rechercher l'effet d'une variable explicative donnée sur des percentiles d'une distribution avec une bonne précision (Koenker et Machado, 1999 ; Brian et Barry, 2003 ; Colin (Lin), 2005).

Cette approche a permis aussi de déterminer les quantiles sur lesquels des regroupements d'exploitation sont possibles. Une première analyse des moyennes des variables retenues sur ces groupes a été réalisée pour mettre en évidence les variables qui permettent de mieux discriminer les terroirs. Les coefficients de corrélation entre les variables ont été testés pour juger de l'opportunité d'inclure une ou plusieurs variables dans les modèles d'ajustement à réaliser par la suite. Les variables retenues ont été utilisées une à une dans la régression logistique comme variable explicative. Cette démarche vise à déterminer aussi l'effet de la variable retenue sur le bilan partiel d'azote, à partir de la tendance de la probabilité des différentes exploitations d'être dans un quantile du bilan partiel. L'analyse a été réalisée à trois niveaux, l'ensemble des exploitations, les exploitations gestionnaires, les exploitations non gestionnaires.

7.1.3 Modélisation du risque d'épuisement relatif de la fertilité des terres

La notion de risque relatif (RR) utilisée se réfère à deux indices de caractérisation des relations ou liaisons statistiques entre deux groupes. L'exemple type est la répartition d'un échantillon en 2 groupes comme en épidémiologie animale, un groupe malade et un groupe sain. Dans la présente étude, l'exemple peut être composé des exploitations qui ont un bilan en N positif et celles qui ont un bilan en N négatif. Le premier indice est un rapport de type p_1/p_2 avec p_1 et p_2 les pourcentages respectifs dans les deux groupes. Ce rapport représente le risque relatif de "succès" de l'échantillon (Agresti, 2007). Le risque relatif d'échec est calculé par le rapport $(1-p_1)/(1-p_2)$. Le second indice est le rapport entre les probabilités p qu'un évènement advienne et ' $1-p$ ' qu'il n'advienne pas ($odds = \frac{p}{1-p}$). Le logarithme de l'odds appelé le logit s'écrit $\log\left(\frac{p}{1-p}\right)$. Le ratio odds (RO) est le rapport entre deux odds appelé encore le rapport de chance ou le rapport de risque (Dagnelie, 2007a). Il permet de comparer deux groupes suivant la formule : $Ratio odds = \frac{p_1/(1-p_1)}{p_2/(1-p_2)}$ avec p_1 , la probabilité du groupe 1 et p_2 la probabilité du groupe 2 pour une même modalité d'un évènement donné. Si RO est inférieur à 1 par exemple, on peut conclure que le risque du groupe 1 est plus faible que celui du groupe 2 pour atteindre la modalité de l'évènement considéré. Dans les études rétrospectives, le risque relatif (RR) est considéré comme la tendance à développer ou à être dans une situation donnée. Cette notion est très utilisée en épidémiologie (Hosmer et Lemeshow, 2000). La relation entre le rapport de risque et le risque relatif peut s'écrire:

$$RO = \frac{p_1(1-p_2)}{p_2(1-p_1)} = RR \times \left(\frac{1-p_2}{1-p_1}\right) \text{ (Agresti, 2007)}$$

La modélisation des données catégorielles dans le cas par exemple d'une variable dite binaire comme dans l'exemple de Williams (1999) où il n'y a que deux réponses est réalisée par une régression logistique. En reprenant les formules dans Agresti, (2007), si Y est la variable binaire et X la variable explicative et soit $\pi(x)$ la probabilité que X prenne la valeur de x, le modèle logistique peut s'écrire alors:

$$Logit[\pi(x)] = \log\left(\frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)}\right)$$

Cette équation est de la forme $\alpha + \beta x$ et peut s'écrire aussi sous la forme

$$\pi(x) = \frac{\exp(\alpha + \beta x)}{1 + \exp(\alpha + \beta x)}$$

qui est une fonction logistique de paramètre β représentant la vitesse de croissance ou de décroissance de la courbe selon le signe de β . Dans le modèle multinomial utilisé avec r modalités (ici r=3) et la modalité r comme référence (r=3), la probabilité à modéliser s'écrit :

$$\pi_i(x) = \text{Prob}(Y = i / x) = \frac{e^{\alpha_i + \beta_{i1}x_1 + \dots + \beta_{ik}x_k}}{1 + \sum_{i=1}^{r-1} e^{\alpha_i + \beta_{i1}x_1 + \dots + \beta_{ik}x_k}}, \quad i = 1, \dots, r-1$$

$$\text{Prob}(Y = r / x) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{r-1} e^{\alpha_i + \beta_{i1}x_1 + \dots + \beta_{ik}x_k}}$$

Les probabilités utilisées dans l'évaluation du risque dans notre recherche sont calculées par ces formules. Les méthodes logistiques ont été utilisées dans la zone d'étude du Fakara pour déterminer les facteurs qui influencent les décisions de fumer les champs (Williams, 1999) et les décisions d'attribution de la main d'œuvre familiale au gardiennage des troupeaux (Turner et Hiernaux, 2008). Plusieurs formes de régression logistique existent selon le type de réponse recherché. La modélisation des données catégorielles peut porter sur plusieurs réponses nominales ou ordinaires. L'exemple de Turner et Hiernaux (2008) est une régression logistique sur des données catégorielles nominales. La méthode ordinaire n'a pas été choisie dans notre recherche, car elle ne répond pas en partie à l'objectif en dépit du fait que les codes soient ordonnés (1, 2, 3). En effet, les tests effectués avec le type ordinal n'arrivent pas à satisfaire le test d'égalité des pentes exigé en pareille situation. De même, en dépit du fait que le découpage des classes en valeurs ordinaires entraîne la perte de puissance de modélisation des rapports de risques (1/2, 1/3, 2/3 dans notre cas), le choix de l'approche nominale permet de gagner en robustesse avec une très grande performance honorable (Tufféry, 2010 – Page 313). Par conséquent, la forme retenue pour la détermination du risque dans la présente étude est la régression logistique polytomique (avec plus de 2 modalités pour la variable dépendante) de type multinomiale (avec une variable dépendante nominale à plusieurs modalités). Comme toute régression, les deux types de variables dépendantes et indépendantes sont :

- La variable dépendante est formée par les données catégorielles représentées ici par trois (3) niveaux de bilan d'azote partiel définis suivant les seuils de percentile 30 et 70 :

- Niveau 1: bilan partiel inférieur ou égal au percentile 30;
- Niveau 2: bilan partiel compris entre le percentile 30 et le percentile 70 inclus;
- Niveau 3: bilan partiel supérieur au percentile 70

Ces seuils correspondent à des niveaux de quantile sur lesquels une partie des variables de viabilité ont des effets significatifs au seuil de probabilité $\alpha=0.05$.

- La variable indépendante est toujours une variable significative retenue dans la régression par quantile parmi les 17 variables analysées ;

L'approche retenue vise à modéliser la probabilité d'appartenance d'une exploitation à une catégorie, en fonction d'une variable explicative. Cette méthode statistique nécessite de préciser une référence de comparaison comme stratégie de modélisation car le logit est toujours calculé par rapport à cette référence. Dans notre cas, la référence choisie est le niveau 3 que nous considérons comme groupe le moins à risque en termes d'épuisement de la fertilité des terres. Le choix d'un autre groupe ne modifie pas les prévisions de probabilités mais modifie le sens de la lecture des logits. En effet, les comparaisons sont toujours effectuées par rapport à la référence, de même que le calcul des logits. À cause des effets possibles de la colinéarité, un modèle de régression logistique polytomique (RLP) simple (avec une seule variable explicative) a été retenu à la place d'un RLP multiple (avec plusieurs variables explicatives).

La probabilité d'appartenance d'une exploitation ou d'un groupe d'exploitation, modélisée sur la base d'une variable quantitative dans cette recherche est considérée comme le risque d'épuisement relatif des terres (RER) de l'exploitation. La RLP (Agresti, 1980 ; Agresti, 2007 ; DeMaris, 1995) a donc été utilisée dans le but de prédire les probabilités d'appartenance de chaque exploitation à un groupe de risque donné à partir des variables significatives retenues suite à la régression par quantile et des variables dérivées des cartes d'occupations des sols. Les indicateurs de qualité du modèle sont les deux pseudo- R^2 , celui de Cox-Snell (1989) et de Nagelkerke (1991) qui diffèrent du coefficient de détermination classique par la méthode de calcul mais qui s'interprète de la même manière. Les tests du rapport de vraisemblance (Likelihood ratio) et les statistiques de Wald pour la normalité

asymptotique des coefficients permettent d'évaluer la significativité du modèle (Stokes, Davis et al., 2000; SAS, 2004b). Ces statistiques suivent généralement une loi de khi-deux.

Dans l'hypothèse que le foncier agricole est beaucoup plus en faveur des non-gestionnaires que des gestionnaires, une comparaison des résultats des modèles RLP obtenus avec les variables issues de l'occupation des sols a été réalisée avec les variables similaires des exploitations agricoles. Il s'agit des variables CUL1, JAC1, FUM1 et leurs corollaires CUL1_S, JAC1_S et FUM1_S.

Les résultats du RLP ont été analysés suivant la même approche utilisée avec les variables calculées sur les exploitations. L'accent étant mis sur les classes d'exploitation, les effets des variables indépendantes sur le risque pour les exploitations agricoles d'être dans une classe donnée (5 Classes de l'ILRI) et dans un terroir donné ont été évalués par un modèle linéaire généralisé en utilisant comme fonction de lien canonique celle de la distribution normale (Dagnelie, 2007a – Page 603). Les prédicteurs linéaires retenus dans le modèle sont le terroir, la classe d'exploitation et leur interaction.

Les régressions par quantile ont été réalisées à l'aide des macros développées par Koenker (2006) pour le logiciel R (Team, 2005). Le risque d'épuisement relatif des terres a été modélisé à l'aide du logiciel SAS par la procédure PROC LOGISTIC (SAS, 2004b). La procédure GENMOD de SAS a été utilisée pour évaluer les effets "terroir" et "classe d'exploitation" (SAS, 2004a – Page 1609). La validation des modèles de régressions logistiques a été réalisée par la méthode du "bootstrap" qui est une technique d'échantillonnage adaptée aux données dont la détermination des distributions d'échantillonnage s'avère difficile (Efron, 2003; Dagnelie, 2007b – p 370). L'ensemble des procédures SAS et des macros d'automatisation des routines a été développé et écrit au cours de cette recherche et est présenté en annexe 6.20. Pour l'ensemble des tests statistiques, le seuil de signification retenu est $\alpha=0.05$. Toutes les moyennes sont fournies avec leur erreur standard. L'utilisation de l'écart type est précisée dans le texte. L'ensemble des indicateurs de risque a été par la suite cartographié à l'échelle des unités primaires de production, base du calcul des bilans ajustés par NUTPAST. Cette cartographie a permis de déterminer l'étendue des superficies aux différents niveaux de risque.

7.2 Résultats de l'évaluation du risque d'épuisement relatif des terres

7.2.1 Déterminations des variables pertinentes pour l'ajustement

Les statistiques descriptives ont été établies pour ces 17 variables (Table 7-1) et les comparaisons ont été effectuées à l'aide de la méthode du test de rangs ou test de Wilcoxon/kruskal-Wallis pour les différences entre terroirs. Des différences hautement significatives ($p < 0.05$) apparaissent entre les trois terroirs pour l'ensemble des variables à l'exception de FUM2. Les coefficients de corrélation entre les différentes variables sont compris entre -0.40 et 0.40 à 80% (Annexe 6.21). Le bilan partiel utilisé ici est celui de l'azote. Le phosphore et le potassium n'ont pas été pris en compte, étant donné les fortes corrélations existantes entre leurs bilans partiels. Les corrélations entre le bilan partiel de N et les variables sont significatives au seuil $\alpha=0.05$ à l'exception des variables JAC2 à JAC4, ELE4, HAB2 et HAB3 et CUL1_S. Les coefficients de corrélation sont négatifs pour les trois variables JAC1, HAB1, JAC1_S et positifs pour toutes les autres variables avec les valeurs les plus élevées pour FUM1. Les signes et les valeurs des coefficients de corrélation sont globalement un indicateur de relation positive relativement étroite entre le bilan partiel de l'azote et l'intensité de fumure ($r=0.39$), et négative mais pas très étroite avec le taux de jachère ($r= -0.13$) et la superficie totale des terres par habitant ($r= -0.14$). Les corrélations observées ne peuvent pas être interprétées comme des relations de cause à effet entre les variables étudiées et le bilan partiel. D'autres variables peuvent influencer les bilans au sein des exploitations agricoles et entraîner un changement de signe de la corrélation. Pour l'ensemble des variables, l'hypothèse de normalité sur la base des résultats du test de Shapiro-Wilk a été rejetée au seuil de signification de 0.05.

Pour la sélection des variables pertinentes, la régression par quantile, avec une pondération par les superficies des terres a été réalisée en utilisant tous les indicateurs de gestion de la fertilité des sols, du centile 10 au centile 95, avec un pas de 5 (centile 10, 15, 20....85, 90), pour couvrir l'ensemble de l'échantillon.

Table 7-1: Statistiques descriptives des variables utilisées dans l'ajustement des bilans

Indicateurs	Banizoumbou	Tchigo Tegui	Kodey	Ensemble	Chi-deux	p	sign.
CUL1	0.34 ± 0.02	0.51 ± 0.02	0.78 ± 0.02	0.51 ± 0.01	156.4	<.0001	***
CUL2	1.04 ± 0.24	1.77 ± 0.21	7.55 ± 1.64	2.68 ± 0.39	135.8	<.0001	***
FUM1	0.13 ± 0.01	0.23 ± 0.02	0.31 ± 0.03	0.21 ± 0.01	17.1	0.0002	**
FUM2	0.32 ± 0.03	0.36 ± 0.03	0.37 ± 0.04	0.35 ± 0.02	1.6	0.4541	ns
FUM3	2.04 ± 0.43	2.24 ± 0.67	2 ± 0.45	2.100 ± 0.31	6.9	0.0307	*
JAC1	0.5 ± 0.02	0.38 ± 0.02	0.19 ± 0.02	0.38 ± 0.01	113.7	<.0001	***
JAC2	2.8 ± 0.49	1.33 ± 0.23	0.35 ± 0.05	1.64 ± 0.21	132.3	<.0001	***
JAC3	2.26 ± 0.28	3.16 ± 0.28	8.87 ± 1.69	3.98 ± 0.41	127.5	<.0001	***
JAC4	0.77 ± 0.02	0.78 ± 0.02	0.88 ± 0.02	0.8 ± 0.01	27.1	<.0001	***
ELE1	0.16 ± 0.03	0.38 ± 0.07	0.7 ± 0.11	0.37 ± 0.04	16.6	0.0002	**
ELE2	0.42 ± 0.10	0.61 ± 0.10	0.82 ± 0.12	0.59 ± 0.06	7.03	0.0297	*
ELE3	0.38 ± 0.12	1.54 ± 0.38	4.62 ± 1.11	1.7 ± 0.29	15.9	0.0003	**
ELE4	0.83 ± 0.20	1.48 ± 0.29	1.24 ± 0.17	1.18 ± 0.14	9.4	0.0093	**
ELE5	0.27 ± 0.05	0.43 ± 0.07	0.67 ± 0.09	0.43 ± 0.04	13.5	0.0012	**
HAB1	3.77 ± 0.24	2.54 ± 0.15	2.68 ± 0.24	3.07 ± 0.13	17.7	<.0001	***
HAB2	1.1 ± 0.07	1.17 ± 0.07	1.94 ± 0.17	1.33 ± 0.06	20.2	<.0001	***
HAB3	5.16 ± 0.50	6.98 ± 0.50	9.58 ± 1.10	6.88 ± 0.39	23.3	<.0001	***

***, **, ** Très hautement significatif, très significatif, significatif, ns = non significatif

Cette démarche a permis de retenir 9 variables significatives sur les 17 analysées. Ces variables ont au moins un effet significatif sur une partie des quantiles (Figure 7-1), c'est-à-dire que chaque variable apporte suffisamment d'information dans l'explication des valeurs du bilan partiel de l'azote dans le quantile concerné.

L'objectif final de cette démarche, étant de déterminer des groupes d'exploitation agricole à risque et de caractériser ce risque, la distribution de la significativité des variables par le diagramme à bulles (Figure 7-1) a été utilisée comme outil d'aide à la décision pour la partition en classes. Ce diagramme fait ressortir dans l'ensemble de notre échantillon trois grands groupes qui peuvent être caractérisés comme suit :

- Groupe 1 : Pression agricole forte avec très peu d'élevage (Quantile < 30%)
- Groupe 2 : Disponibilité de terres avec élevage (Quantile 30% à 70%)
- Groupe 3 : Pression agricole et élevage (Quantile > 70%)

Les coefficients (pente) liés à chaque variable dans les régressions donnent le sens de variation du bilan partiel (Annexe 6.22). Les variables HAB1, JAC1 varient dans le sens

opposé du bilan sur l'ensemble des quantiles où elles sont significatives. Cette tendance indique une variation vers des bilans négatifs quand la superficie totale des terres par habitant augmente et/ou quand le taux de jachères augmente. En revanche, l'ensemble des variables qui font intervenir l'élevage ont des coefficients positifs (Figure 7-2). Une comparaison des moyennes par le test de Tukey des trois groupes identifiés par l'analyse des quantiles, indique des différences non significatives ($\alpha=0.05$) entre les deux extrêmes (Groupe 1 et 3), sur les variables CUL1, FUM1, HAB1. Cette tendance exprime la présence d'exploitations ayant une pression agricole sur les terres dans les 2 groupes extrêmes, de même que des exploitations ayant un taux de terres fumées et des superficies de terres par habitant identiques.

Parmi les variables retenues, de fortes corrélations apparaissent entre certaines variables à partir du percentile 50. De même, la taille de l'échantillon sur laquelle chaque variable porte diffère à cause de l'absence d'élevage, de jachères ou de terres fumées dans certaines exploitations agricoles. Ces deux raisons confortent notre démarche de ne pas considérer l'ensemble des variables dans un seul modèle d'ajustement par RLP à cause de l'impact de la colinéarité sur les résultats. Pour ce faire, l'ajustement logistique a été opéré sur chaque variable individuellement afin de déterminer la probabilité liée à chaque exploitation d'être dans un groupe de risque du fait de ses caractéristiques. Le choix d'aller vers deux modèles d'ajustement, l'un basé sur les variables issues de l'exploitation agricole, et l'autre basé sur les variables issues du terroir correspond bien à notre approche d'analyse basée sur deux niveaux complémentaires au niveau du fonctionnement des agroécosystèmes.

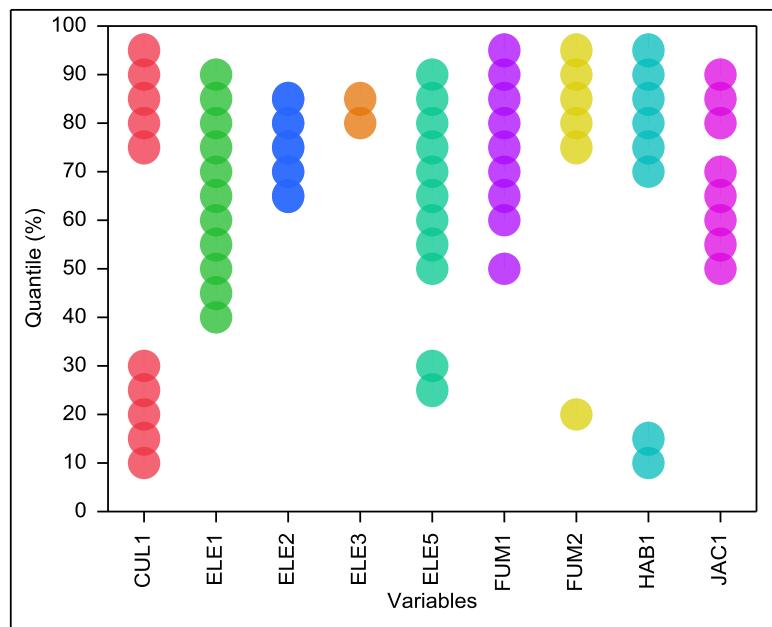


Figure 7-1: Régression par quantile : Diagramme de couverture par quantile des variables significatives ($p < 0.05$) retenues

Ce diagramme présente pour chaque variable de viabilité agricole, des cercles pleins en couleur dans la gamme de quantile où la variable est significative. Les différences de couleur permettent distinguer les variables utilisées.

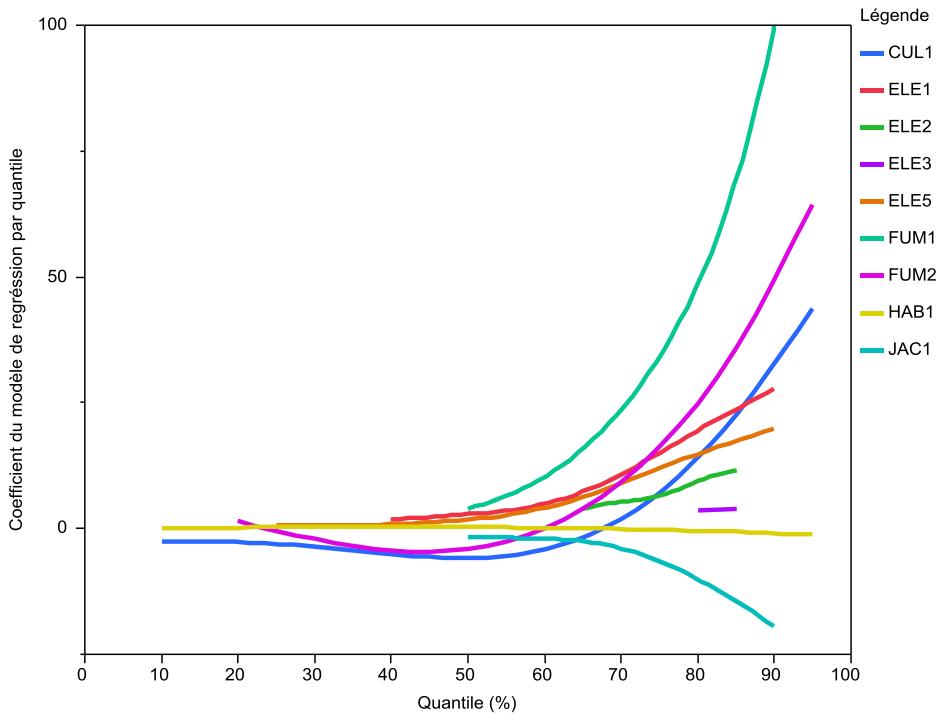


Figure 7-2: Tendance des coefficients de la régression par quantile selon les quantiles et par variable

7.2.2 Risque relatif d'épuisement de la fertilité des terres

7.2.2.1 Ajustement du risque en fonction des paramètres de l'exploitation agricole

Les résultats des analyses de RLP sont donnés pour l'ensemble des exploitations (analyse globale) et par classe d'exploitation (gestionnaire et non gestionnaire). L'évaluation des différentes RLP à l'aide du test du rapport de vraisemblance indique que les modèles sont dans l'ensemble, globalement significatifs. Le coefficient de chaque variable indépendante exprime la capacité de la variable à contribuer dans le modèle pour la prédiction des probabilités relatives au risque de type 1 (Table 7-2).

Table 7-2 : Résultats de la régression polytomique par variable suivant l'approche globale (GL) et l'approche par classe d'exploitation gestionnaire (GE) et non gestionnaire (NG)

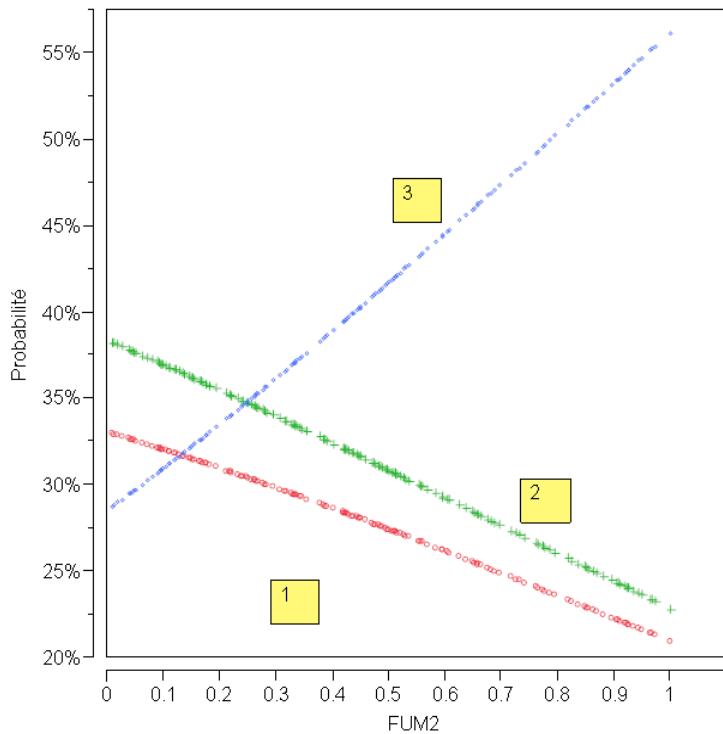
Variables	R2 de Cox et Snell			χ^2 de Wald			Coefficient de la variable indépendante					
	GL	GE	NG	GL	GE	NG	GL	GE	NG			
CUL1	0.92	0.97	0.80	942.3	394.9	424.3	-0.46	***	0.22	ns	-0.058	ns
ELE1	0.80	0.72	0.31	306.1	110.2	67.1	-0.36	***	0.05	ns	-2.611	**
ELE2	0.66	0.39	0.09	251.9	52.6	14.9	-0.23	***	0.0003	ns	0.874	**
ELE3	0.68	0.75	0.04	155.7	66.9	6.8	-0.06	***	-0.02	*	0.053	ns
ELE5	0.83	0.41	0.80	462.4	66.6	285.2	-0.70	***	-0.36	***	-3.431	***
FUM1	0.90	0.83	0.71	446.4	161.1	144.4	-1.07	***	-0.18	ns	0.139	ns
FUM2	0.52	0.32	0.05	198.6	48.9	7.0	-1.13	***	-1.14	***	0.058	ns
HAB1	0.83	0.99	0.58	719.1	506.5	237.1	0.02	*	0.16	***	-0.075	***
JAC1	0.63	0.89	0.28	391.3	231.2	95.6	1.42	***	1.93	***	0.488	*

***, **, ** Très hautement significatif, très significatif, significatif, ns = non significatif

Les résultats de l'analyse globale indiquent que les variables prédictives utilisées sont à même d'apporter de l'information sur les valeurs prises par la variable nominale. Les valeurs du pseudo-R² de Cox-Snell (identique ici au R² ajusté de Nagelkerke car il y a une seule variable explicative) sont toutes supérieures ou égales à 0.52 (FUM2) et atteignent 0.92 (pour CUL1). Les coefficients et leurs signes indiquent que l'ensemble des variables a tendance à diminuer le risque, à l'exception du taux de jachères et de la disponibilité des terres par habitant. Cette dernière variable, même si elle est significative, a un coefficient très faible de l'ordre de 0.02 qui signifie une tendance très peu variable.

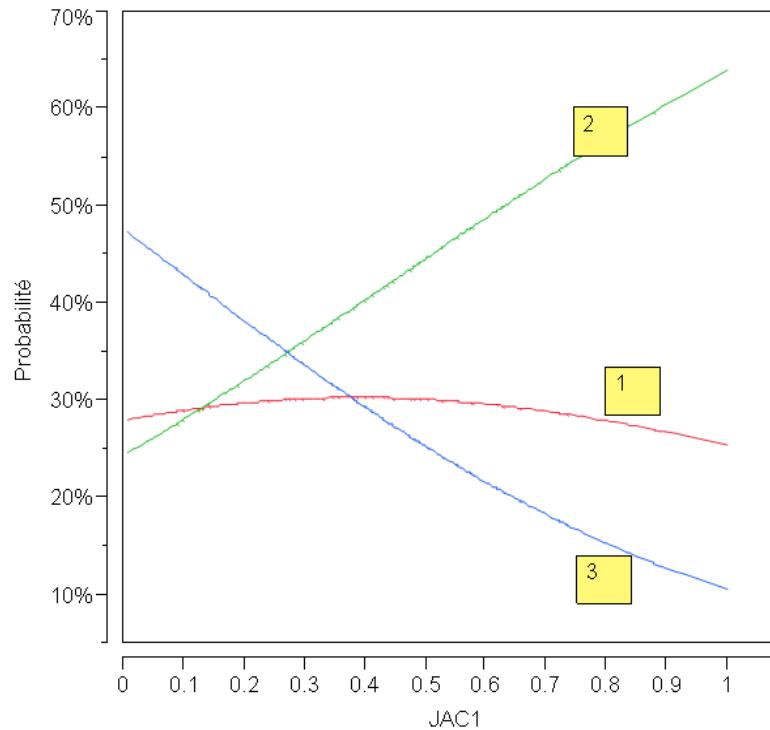
Les résultats de l'analyse par classe d'exploitation montrent que l'effet de la pression sur les cultures et celui du taux de fumure ne sont pas significatifs pour les deux types d'exploitation. Pour les gestionnaires, le nombre d'UBT par surface de terre disponible et par surface cultivée (ELE1 et ELE2) n'est pas significatif. Pour les non gestionnaires, les taux de fumure ne sont pas non plus significatifs. Ces différences de tendances s'expliquent par le fait que les variables relatives à la disponibilité des terres des gestionnaires n'ont pas d'effet sensible sur les bilans partiels d'azote de ces exploitations. En effet, les dotations en terres de ces exploitations, compte tenu du système foncier, sont peu différentes d'une exploitation à l'autre. Pour les non gestionnaires, la fumure est très peu pratiquée et les quantités de déjections animales apportées dans les champs dépendent plus de la pâture externe que de la gestion de l'exploitation. Les résultats de cette analyse confortent l'hypothèse faite sur l'apport de la prise en compte de la dimension spatiale des paramètres relatifs à la pression de culture et à l'intensité de fumure. En revanche, l'importance des jachères, dont l'effet apparaît significatif dans les deux classes, laisse supposer que cette variable calculée sur les terres des exploitations est suffisante. Sa faible significativité par rapport aux autres variables chez les non gestionnaires, marquée par un R^2 de 0.28 et $p > 0.001$, peut être favorable au choix d'une variable issue de l'agrégation spatiale sur les jachères.

Dans le domaine global, l'examen du rapport des risques pour l'ensemble des variables et leur intervalle de confiance fait ressortir des surcroûts de risque engendrés par la variable relative à la superficie totale des terres par habitant HAB1 et le pourcentage de jachères JAC1. La probabilité moyenne prédictive pour appartenir à la modalité correspondant au risque le plus élevé est de l'ordre de 30% avec une différence significative entre les terroirs. Les valeurs de probabilité sont plus faibles à Banizoumbou (28%) par rapport aux deux autres terroirs (32%). En considérant les signes des coefficients des variables dans le modèle global, les exploitations ont une probabilité faible d'être dans le groupe le plus à risque par rapport au groupe le moins à risque qui a été pris comme référence (ici le groupe 3) à l'exception des variables JAC1 (Figure 7-3) et HAB1. Les valeurs élevées des coefficients de FUM1 et FUM2 confirment cette tendance des exploitations ayant un taux de fumure élevé à être plus dans le groupe le moins à risque (Figure 7-3).



Ce graphique présente la probabilité des exploitations d'être dans une catégorie (1,2,3) de risque en fonction de l'évolution du taux de fumure de l'ensemble des terres. Les exploitations ont moins tendance à être dans le groupe à risque 1 quand FUM2 augmente .

Cette tendance est marquée par un coefficient de -1.13



Ce graphique présente la probabilité des exploitations d'être dans une catégorie (1,2,3) de risque en fonction de l'évolution du taux de jachère JAC1. Les exploitations ont plus tendance à être dans le groupe à risque 1 par rapport au risque de référence 3 quand JAC1 augmente .

Cette tendance est marquée par un coefficient de 1.42

Figure 7-3 : Représentation des probabilités de risque prédictes par la RLP au niveau global en fonction des variables FUM2 et JAC1

Les prévisions de probabilité par niveau de risque et par variable de viabilité (Figure 7-3) permettent de déterminer les seuils de changement de tendance au niveau de cette variable. Une des variables significatives dans le groupe des gestionnaires avec un R^2 élevé est ELE3 qui est le nombre d'UBT total par surface de pâture hivernale. Le coefficient de cette variable reste faible mais caractérise bien la tendance des exploitations à moins de risque quand cette variable augmente. Cependant l'évolution d'une telle tendance se limite à des valeurs de l'ordre de 15 UBT/ha. Pour le taux de jachère, la probabilité des exploitations tend vers un risque plus élevé par rapport au risque de catégorie 3 à partir d'un seuil équivalant à 40% des terres de jachères. Dans la classe des non gestionnaires, le nombre d'UBT total par habitant reste un facteur qui fait tendre les exploitations vers des catégories moins à risque à partir de 0.25 UBT/hbt.

En considérant les tendances globales (analyse de l'ensemble des exploitations) où toutes les variables sont significatives, la probabilité la plus élevée pour une exploitation d'être dans le groupe le plus à risque est prédite par la variable CUL1, en moyenne 37% et par les variables HAB1 et JAC1 avec des probabilités moyennes de 31% et 32% respectivement. La probabilité maximale atteinte dans le cas de la variable CUL1 est de 40 % (Figure 7-4). Les valeurs prédites restent globalement supérieures dans le terroir de Kodey, comparées aux deux autres terroirs. Pour les gestionnaires, cette tendance à prédire plus de risque reste l'apanage de la variable relative à la superficie totale cultivée par habitant (HAB1) avec une moyenne de 24% et une très faible variabilité entre les terroirs (Figure 7-5). Il en de même pour les non gestionnaires où le niveau de risque reste plus élevé de l'ordre de 33% avec la même variable.

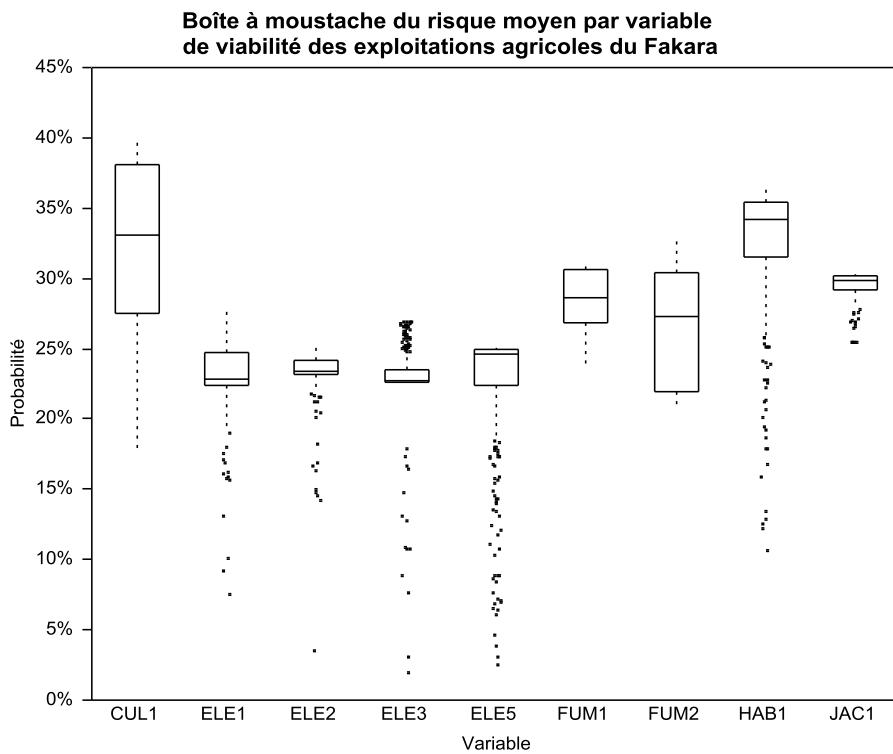


Figure 7-4 : Diagramme des valeurs moyennes de risque et leur dispersion avec des valeurs suspectes

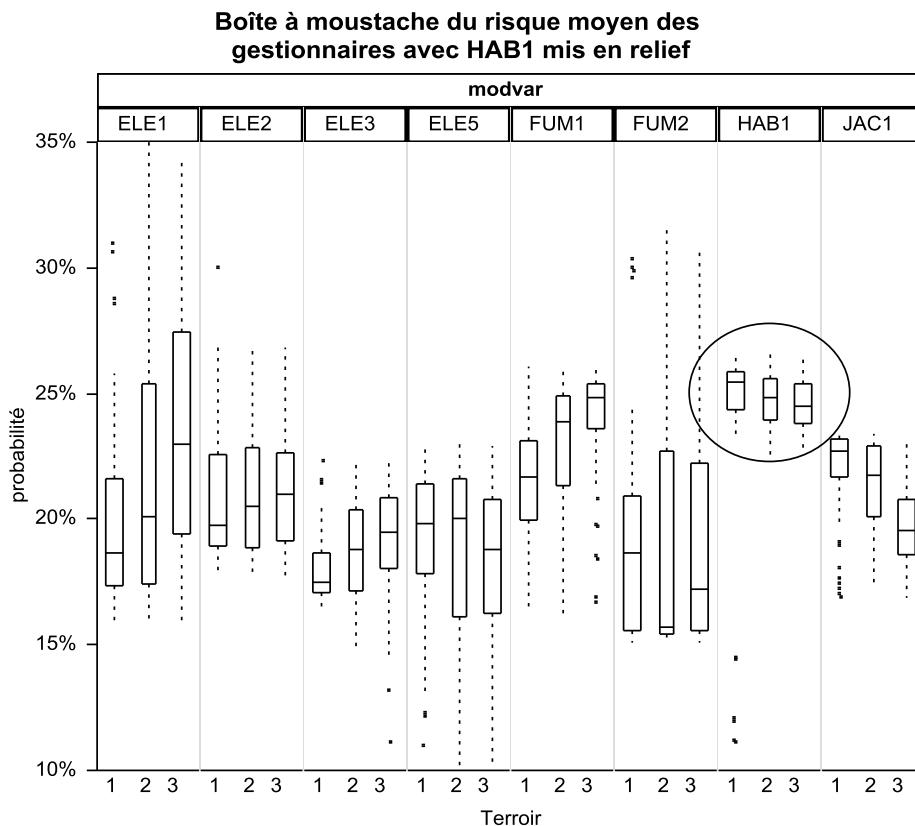


Figure 7-5 : Diagramme des valeurs moyennes de risque – classe des gestionnaires

Terroir 1,2,3, pour Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey (modvar= variables de viabilité) pour les variables significatives dans l'étude des gestionnaires.

7.2.2.2 Ajustement du risque en fonction des paramètres additionnels du terroir

Les variables additionnelles CUL1_S, JAC1_S, et FUM1_S agrégées au niveau des mailles (Figure 7-6) et ré-attribuées aux exploitations agricoles dans les UPP (Figure 7-7, Figure 7-8) suivent les mêmes tendances que celles calculées sur l'exploitation agricole. La pression de culture reste plus élevée à Kodey. Le taux de jachère est plus élevé à Banizoumbou et Tchigo Tegui. L'intensité de fumure est supérieure à Kodey. Les coefficients de corrélation calculés entre les nouvelles variables et celles dérivées des exploitations agricoles (CUL1, JAC1, et FUM1) sont plus élevés pour la pression de culture ($r=0.73$) que pour l'importance des jachères ($r=0.50$) et l'intensité de fumure ($r=0.46$). Ces coefficients laissent suffisamment de marge d'analyse dans l'expression de la netteté de la relation qui peut exister entre les deux types de variables.

La performance de cette approche a été appréciée à travers l'examen des valeurs des coefficients de détermination (Pseudo R^2 de Cox-Snell), des tests du rapport de vraisemblance et des coefficients des variables dans le modèle. Le R^2 de Cox-Snell présente des valeurs presque similaires pour la pression de culture (0.92 pour CUL1 et 0.89 pour CUL1_S) et pour l'intensité de fumure (0.90 pour FUM1 et 0.92 pour FUM1_S). Les différences résident essentiellement dans l'importance du taux de jachère (0.63 pour JAC1 et 0.91 pour JAC1_S). Ces valeurs élevées et les probabilités significatives du test de rapport de vraisemblance montrent que les trois modèles permettent d'expliquer les valeurs prises par la variable dépendante catégorielle utilisée pour le risque d'épuisement relatif de la fertilité des terres. Les coefficients attachés à chaque paramètre ainsi que leurs ordonnées à l'origine sont tous significatifs. Cependant, les tendances observées dans les coefficients sont opposées à celles observées dans le modèle général de la précédente analyse basée sur les exploitations agricoles. En effet, les coefficients positifs de la pression sur les cultures (1.35) et de l'intensité de fumure (2.11) montrent que les exploitations ont plus tendance à être dans le groupe à risque élevé que dans le groupe à risque bas quand ces paramètres augmentent. En revanche, les coefficients relatifs à la jachère (-0.97) montrent que les exploitations ont moins tendance à être dans le groupe à risque quand ce paramètre augmente. Les probabilités prédictes par la pression de culture indiquent des niveaux de risque moyen à Kodey de 48%, alors que ces niveaux de risque ne dépassent guère 31% à Tchigo Tegui et 22% à Banizoumbou.

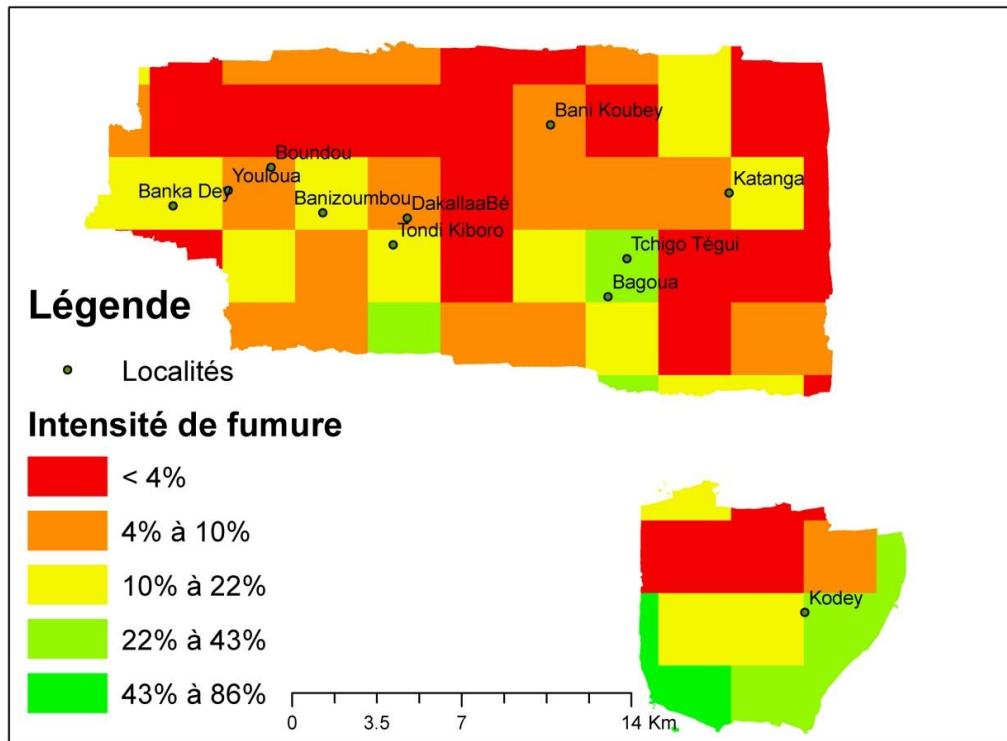
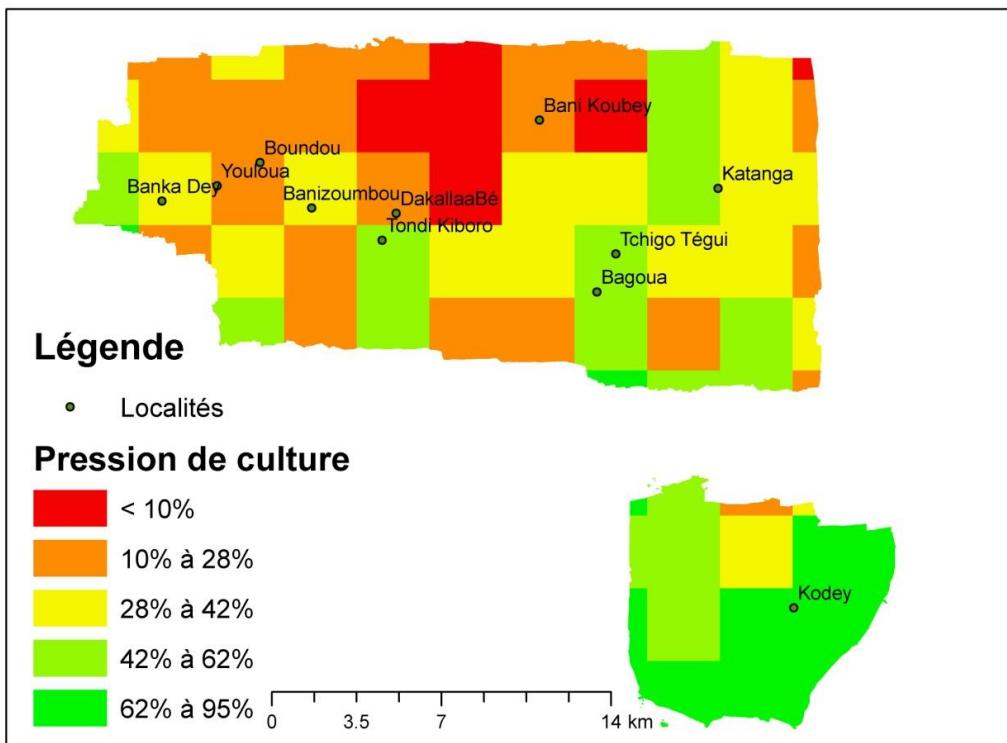


Figure 7-6 : Représentation cartographique de la pression de culture et de l'intensité de fumure calculée sur des grilles de 3 km x 3 km à partir de la carte d'occupation des sols de 1995.

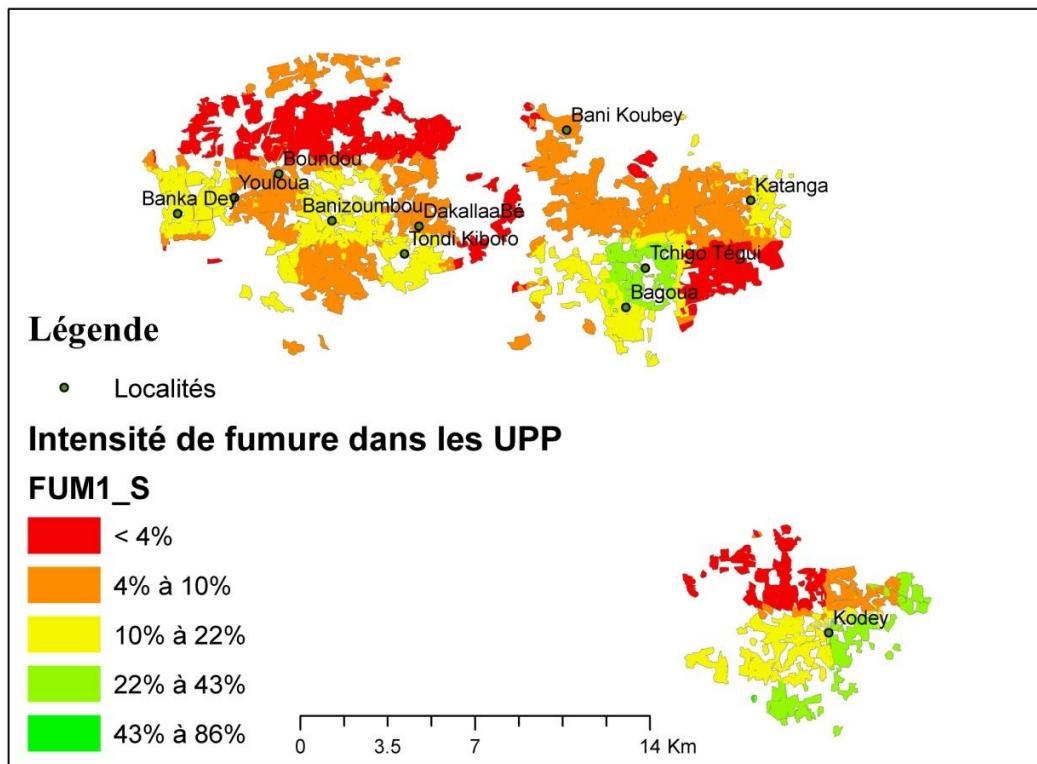
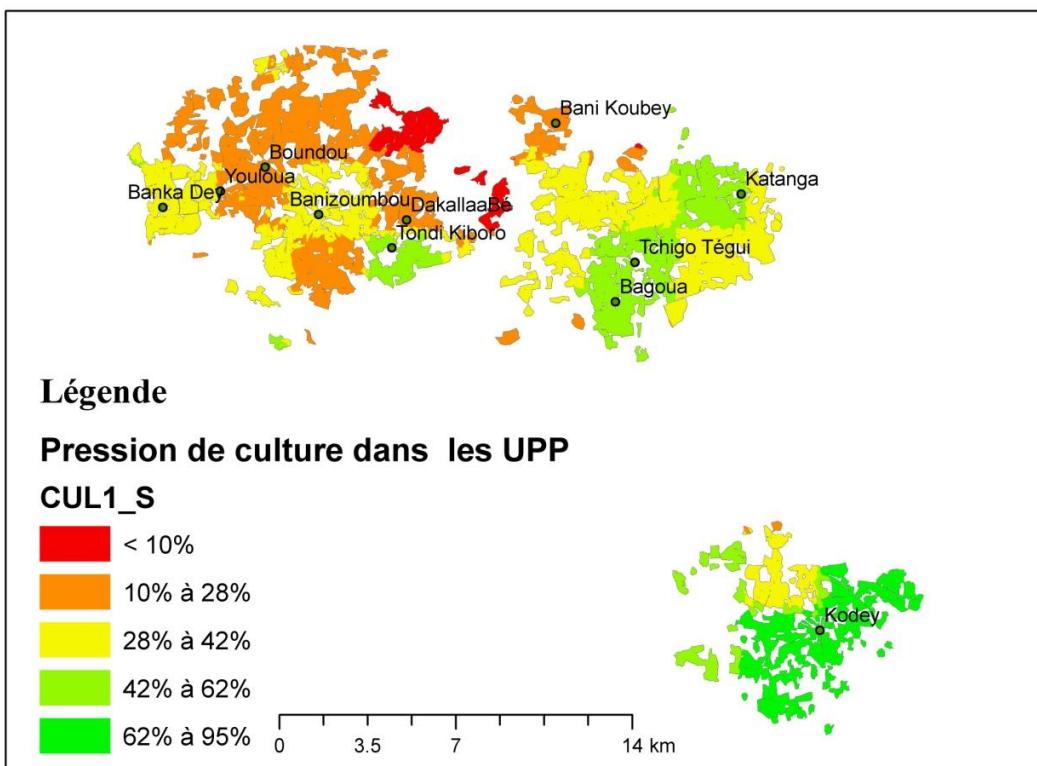


Figure 7-7 : Représentation cartographique de la pression de culture et de l'intensité de fumure dans les terres des exploitations à partir des valeurs agrégées par grille de 3 km * 3 km.

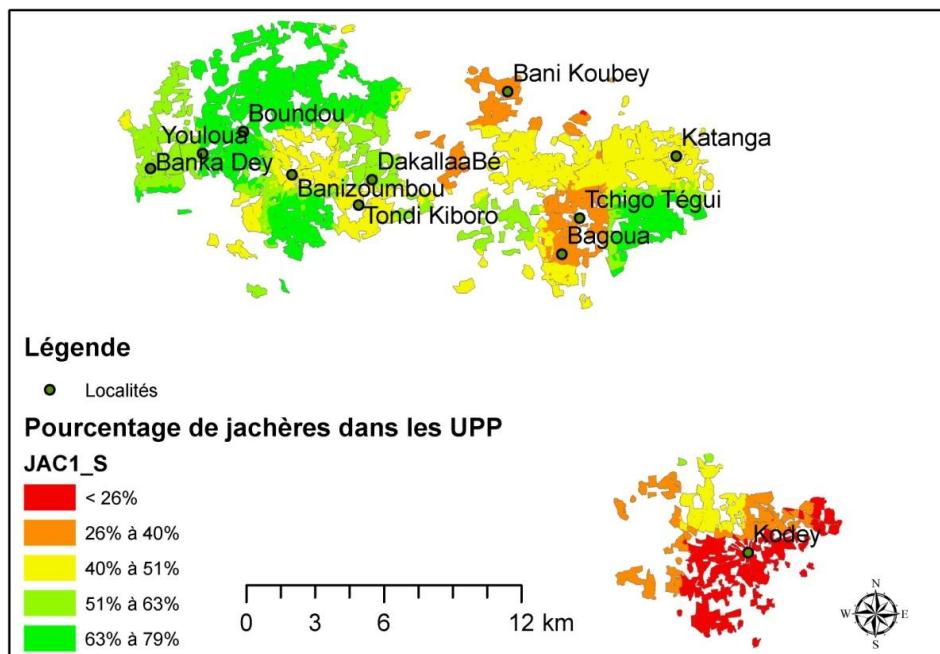


Figure 7-8 : Représentation cartographique du pourcentage de jachères dans les terres des exploitations à partir des valeurs agrégées par grille de 3km * 3 km.

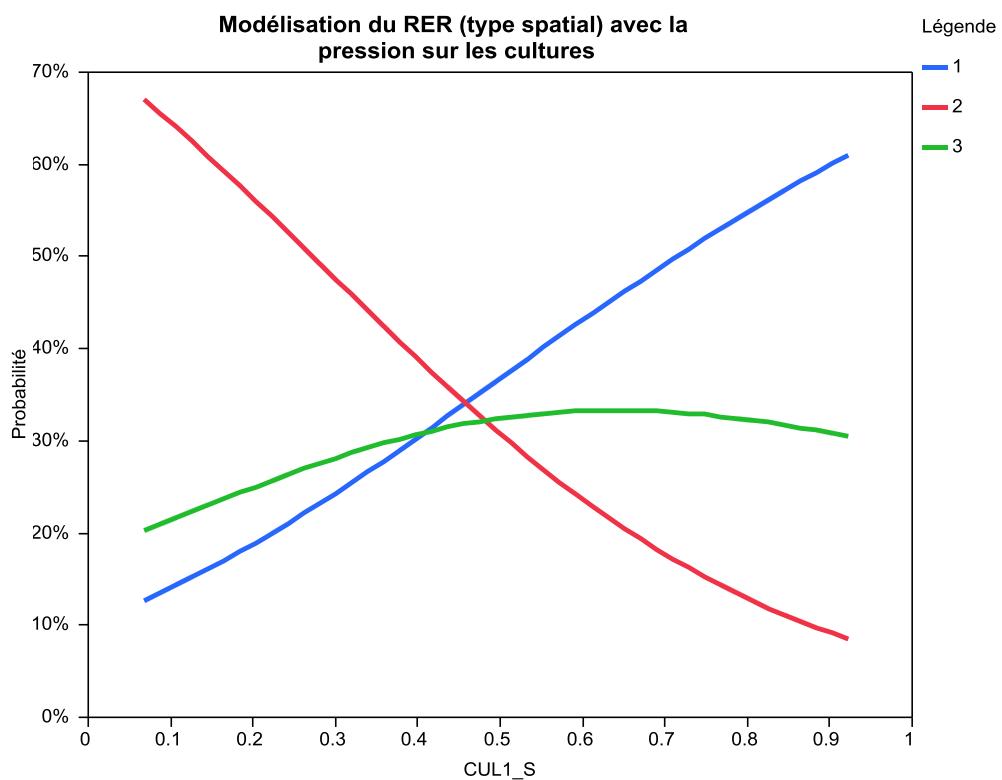


Figure 7-9 : Représentation des probabilités de risque prédictes par la RLP au niveau global en fonction de la pression de culture CUL1_S

Le seuil de rupture entre les risques élevés (1) et faibles (3) est de 43% pour la variable relative à la pression sur les cultures (Figure 7-9). Ce seuil ne contredit pas la première approche où la valeur de rupture a été de 40%. Les tendances observées avec le taux de fumure sont similaires à celles de la pression agricole avec une croissance du risque jusqu'à des taux de fumure de 15%. A partir du seuil de 15% d'intensité de fumure, la tendance vers le groupe le moins à risque se stabilise. En revanche, la tendance vers un risque d'épuisement de la fertilité des sols augmente. Les RER moyens par terroir restent supérieurs à Kodey avec des niveaux de 37% par rapport aux deux autres terroirs (test de Tukey, $p < 0.05$).

Les probabilités prédites par le modèle RLP avec comme variable explicative le taux de jachère indiquent une tendance à la baisse du risque quand le niveau des jachères augmente. En considérant les deux niveaux extrêmes de risque, les probabilités restent élevées quand le taux de jachère est faible et inférieur à 40%. A partir de ce seuil, le surcroît de risque diminue en faveur des niveaux de risque 2 et 3. Des niveaux de risque très élevés sont observés aussi à Kodey par rapport aux deux autres terroirs, de l'ordre de 45%.

Les modèles RLP basés sur les trois variables agrégées au niveau spatial avec une prédiction sans distinction des classes d'exploitation sont conformes aux tendances observées entre terroirs et particulièrement le risque élevé à Kodey. Ce modèle sans distinction des classes d'exploitation tend à accroître le niveau de risque d'épuisement de la fertilité des sols à Kodey par rapport aux deux autres terroirs à cause de la globalisation des paramètres et au poids d'une catégorie de l'échantillon qui constitue des extrêmes pour certaines variables comme la fumure. En effet, le modèle spatial tend à aggraver la situation de certaines exploitations qui diffèrent des autres avec l'avantage d'être conforme à une approche de gestion communautaire.

Les résultats des modèles RLP par classe d'exploitation sont très similaires au modèle RLP global (Table 7-3) au niveau des paramètres suivants :

- Les pseudo- R^2 des deux groupes d'exploitation confirment la qualité des modèles
- Les statistiques de Wald et leur degré de signification indiquent que la variable prise en compte a un effet sur la différentiation des exploitations en groupe de

risque avec des effets plus prononcés pour les non gestionnaires. Les valeurs de χ^2 des non gestionnaires sont largement supérieures à celles des gestionnaires.

Table 7-3 : Résultats de la RLP par variable suivant l'approche globale (GL) et l'approche par classe d'exploitation gestionnaire (GE) et non gestionnaire (NG) pour les variables issues de la carte d'occupation des sols

Variables	R2 de Cox-Snell			χ^2 de Wald			Coefficient de la variable indépendante					
	GL	GE	NG	GL	GE	NG	GL		GE		NG	
CUL1_S	0.89	0.93	0.87	861.8	322.02	562.02	1.35	***	1.53	***	2.02	***
FUM1_S	0.92	0.92	0.93	888.3	289.4	684.04	2.12	***	1.7	***	9.01	***
JAC1_S	0.92	0.89	0.91	978.4	299.37	668.1	-0.97	***	-1.1	***	-1.4	***

***très significatif ($p < 0.0001$)

Les différences entre le modèle appliqué aux gestionnaires et non gestionnaires apparaissent surtout avec la variable intensité de fumure. Celle-ci a un coefficient très élevé qui indique une tendance vers un risque élevé pour les non gestionnaires. Les coefficients liés à la variable sur la pression des cultures sont légèrement supérieurs pour les non gestionnaires et ceux sur le taux de jachère sont légèrement inférieurs à ceux des gestionnaires. Des coefficients faibles indiquent l'aversion pour le niveau de risque élevé.

La validation des RLP réalisée par la méthode de ré-échantillonnage indique des coefficients des non gestionnaires plus élevés que ceux des gestionnaires et confirme la tendance du risque élevé des non gestionnaires. La comparaison des variables indique une très faible performance du modèle jachère par rapport aux autres variables. Le modèle appliqué aux non gestionnaires ressort plus performant que le modèle appliqué aux gestionnaires (Table 7-4).

Table 7-4 : Résultats de la validation des RLP par la méthode du ‘Bootstrap’.

Type d'exploitation	Variable	Ordonnée Origine R1		Coefficients R1		Indicateur de précision	
		moyenne	Ecart type	moyenne	Ecart type	Ordonnée à l'origine	Coefficient R1
Gestionnaire	FUM1_S	-1.010	0.028	1.714	0.131	3%	8%
	CUL1_S	-1.505	0.041	1.593	0.068	3%	4%
	JAC1_S	-0.195	0.041	-1.269	0.098	21%	8%
Non gestionnaire	FUM1_S	-0.563	0.023	9.392	0.201	4%	2%
	CUL1_S	-0.451	0.028	2.108	0.065	6%	3%
	JAC1_S	1.097	0.033	-1.461	0.067	3%	5%

Le ré-échantillonnage a été réalisé sur 75% des exploitations tirés à probabilité égale avec remise sur 157 gestionnaires et 304 non gestionnaires avec 500 répétitions chacune, soit 500 modèles logistiques. R1= Risque de niveau 1.

L'incidence pour les exploitations d'être dans une classe donnée (5 classes de l'ILRI) et dans un terroir donné (3 terroirs) a été évaluée sur le niveau de risque élevé par la méthode linéaire généralisée. Les résultats (Table 7-5) indiquent pour les variables prises individuellement que le fait d'être à Kodey, ou d'être dans la classe des villageois pauvres induit un risque plus élevé ($p < 0.05$). Pour les interactions terroir et classe d'exploitation, seules sont significatifs les cas correspondants aux villageois pauvres dans les trois terroirs. Les deux interactions significatives des exploitations de villageois pauvres à Banizoumbou et à Tchigo Tegui avec des coefficients négatifs indiquent cependant une aversion pour le risque élevé de ces exploitations par rapport à celles de Kodey. Cette analyse démontre que dans le contexte du Fakara, les exploitations dites pauvres selon le critère de l'ILRI sont plus à risque dans une zone où l'agriculture connaît une plus grande intensification dans un contexte de pression agropastorale plus élevée (Figure 7-10, Figure 7-11). L'emplacement des campements autour des villages, quand bien même il serait lié aux villageois qui détiennent les propriétés, reste aussi du point de vue des éleveurs, lié à la conduite des troupeaux en hivernage, mais aussi au contrôle des chaumes à la récolte.

Les évaluations moyennes issues de ces validations (Table 7-6) indiquent que le risque reste plus élevé à Kodey de l'ordre de 33% pour les gestionnaires liés essentiellement aux "villageois gestionnaires" et de 49% pour les non gestionnaires liés aux "villageois pauvres". Le risque moyen des non gestionnaires est plus élevé que chez les gestionnaires avec un écart de l'ordre de 11%.

Une classification en trois classes de l'ensemble des exploitations permet de montrer que les facteurs pris en compte combinent deux aspects essentiels des caractéristiques des exploitations à savoir leur richesse économique et le milieu dans lequel elles se trouvent. Ainsi, il ressort que la catégorie avec un niveau de risque élevé de l'ordre de 36% correspond à des exploitations fragilisées par la pression de culture, de l'ordre de 58%, avec des superficies en jachère ne dépassant guère 30% des terres, et qui disposent en moyenne de 1 petit ruminant par habitant et de 3.7 ha/UBT. En revanche, les exploitations les moins à risque sont celles qui sont dans des zones avec 61% des jachères, en moyenne 28% des terres cultivées et qui ont en moyenne 0.44 UBT/hbt avec 6.53 ha/hbt (Figure 7-12, Annexe 6.23).

Table 7-5 : Evaluation de l'effet de la localisation et de la classe d'exploitation sur le risque

Terme	Coefficients	Erreur standard	χ^2	p	B.I	B.S
ordonnée à l'origine	0.294	0.003	2693.701	< 0.001	0.288	0.300
Banizoumbou	-0.088	0.004	387.503	<.0001	-0.096	-0.080
Tchigo Tegui	-0.010	0.004	4.993	0.0254	-0.018	-0.001
Gestionnaire pauvre	-0.055	0.006	73.191	<.0001	-0.067	-0.042
Gestionnaire riche	-0.037	0.008	22.055	<.0001	-0.052	-0.021
Villageois gestionnaire	-0.041	0.008	26.029	<.0001	-0.056	-0.025
Villageois pauvre	0.070	0.004	270.352	<.0001	0.062	0.078
Banizoumbou * Gestionnaire pauvre	0.009	0.008	1.350	0.2452	-0.006	0.025
Banizoumbou * Gestionnaire riche	0.012	0.011	1.206	0.2722	-0.009	0.033
Banizoumbou * Villageois gestionnaire	0.006	0.009	0.429	0.5124	-0.012	0.025
Banizoumbou * Villageois pauvre	-0.016	0.005	9.088	0.0026	-0.026	-0.005
Tchigo Tegui * Gestionnaire pauvre	0.006	0.009	0.467	0.4945	-0.012	0.025
Tchigo Tegui * Gestionnaire riche	-0.011	0.011	0.993	0.319	-0.033	0.011
Tchigo Tegui * Villageois gestionnaire	0.007	0.009	0.565	0.4521	-0.011	0.026
Tchigo Tegui * Villageois pauvre	-0.030	0.006	30.049	<.0001	-0.041	-0.020

Les modalités terroir sont comparées à Kodey, la classe d'exploitation aux villageois riches.

B.I et B.S sont les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance.

Table 7-6 : Evaluation du risque par terroir, classe d'exploitation suivant les variables issues de l'occupation des sols

	Variable	Banizoumbou	Tchigo Tegui	Kodey	Ensemble
Gestionnaire					
CP	CUL1_S	15%	23%	36%	23%
	FUM1_S	17%	24%	27%	22%
	JAC1_S	16%	23%	33%	22%
CR	CUL1_S	17%	23%	39%	26%
	FUM1_S	20%	25%	33%	26%
	JAC1_S	18%	23%	34%	25%
VG	CUL1_S	15%	24%	39%	21%
	FUM1_S	19%	25%	28%	22%
	JAC1_S	18%	25%	35%	23%
Ensemble		17%	24%	33%	23%
Non gestionnaire					
VP	CUL1_S	25%	33%	55%	33%
	FUM1_S	31%	32%	46%	34%
	JAC1_S	26%	35%	53%	34%
VR	CUL1_S	26%	36%	47%	35%
	FUM1_S	33%	40%	34%	36%
	JAC1_S	26%	36%	48%	34%
Ensemble		28%	34%	49%	34%

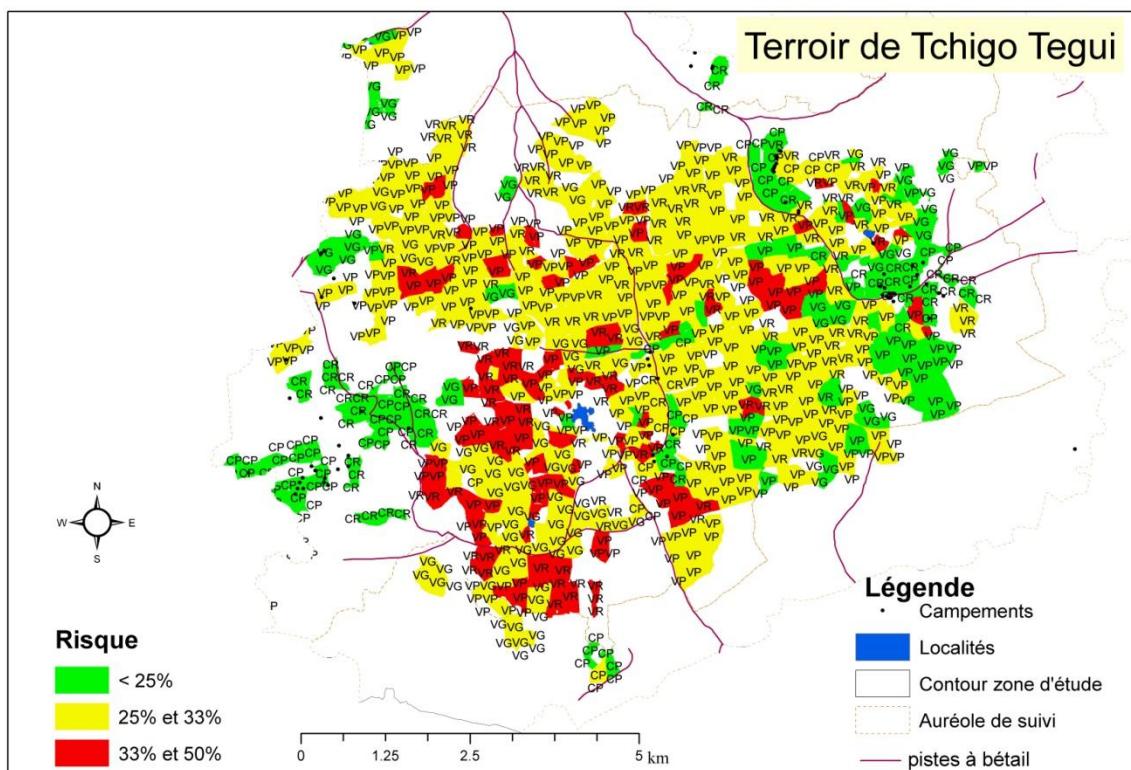
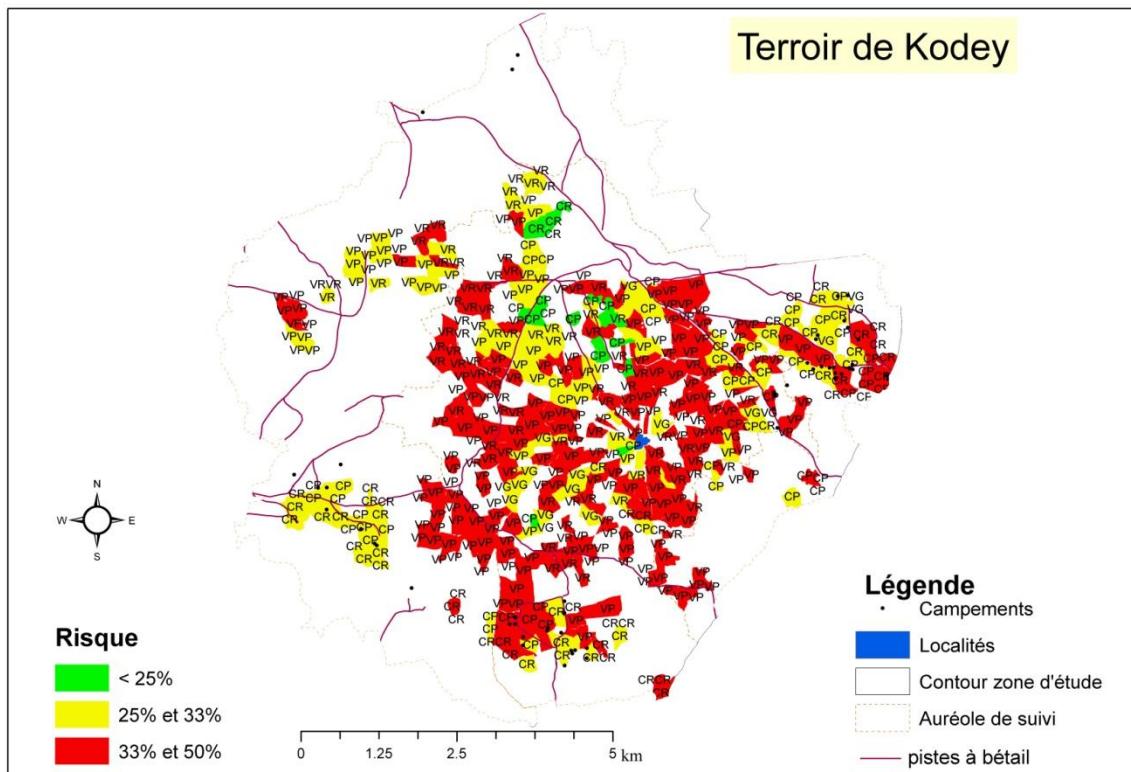


Figure 7-10: Risque moyen dans les terroirs de Kodey et Tchigo Tegui

(VR, VP, VG, CP et CR, représente les 5 catégories d'exploitations)

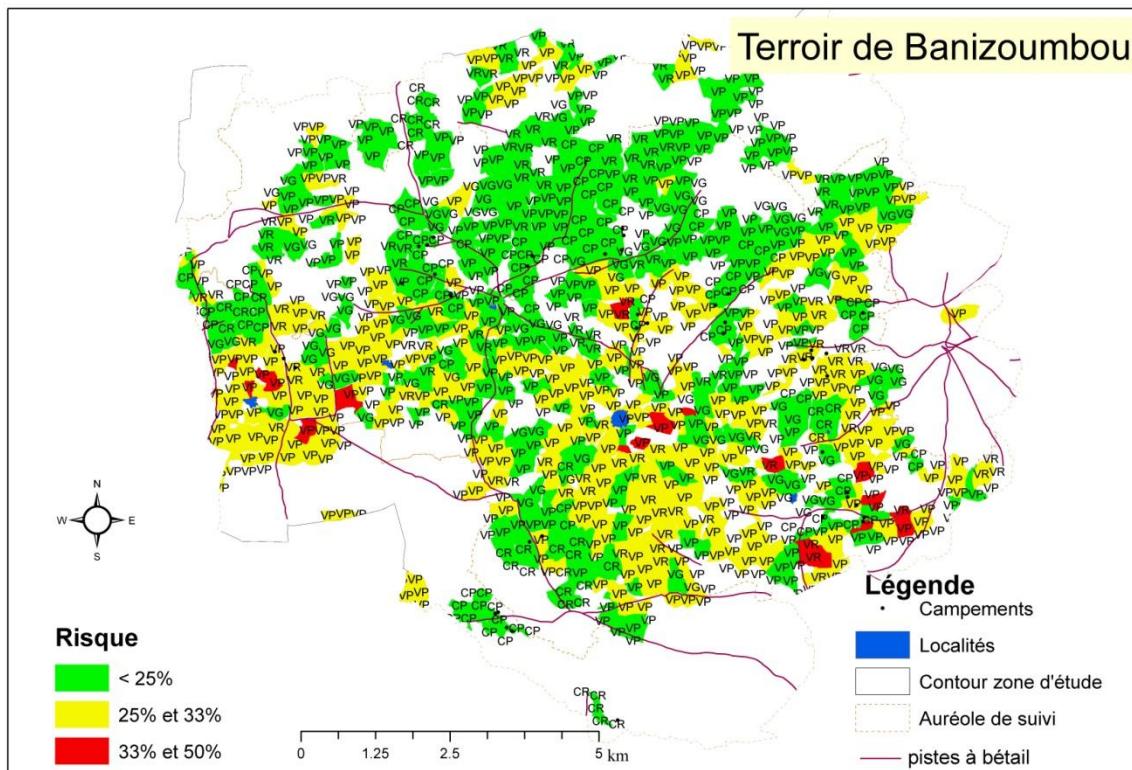
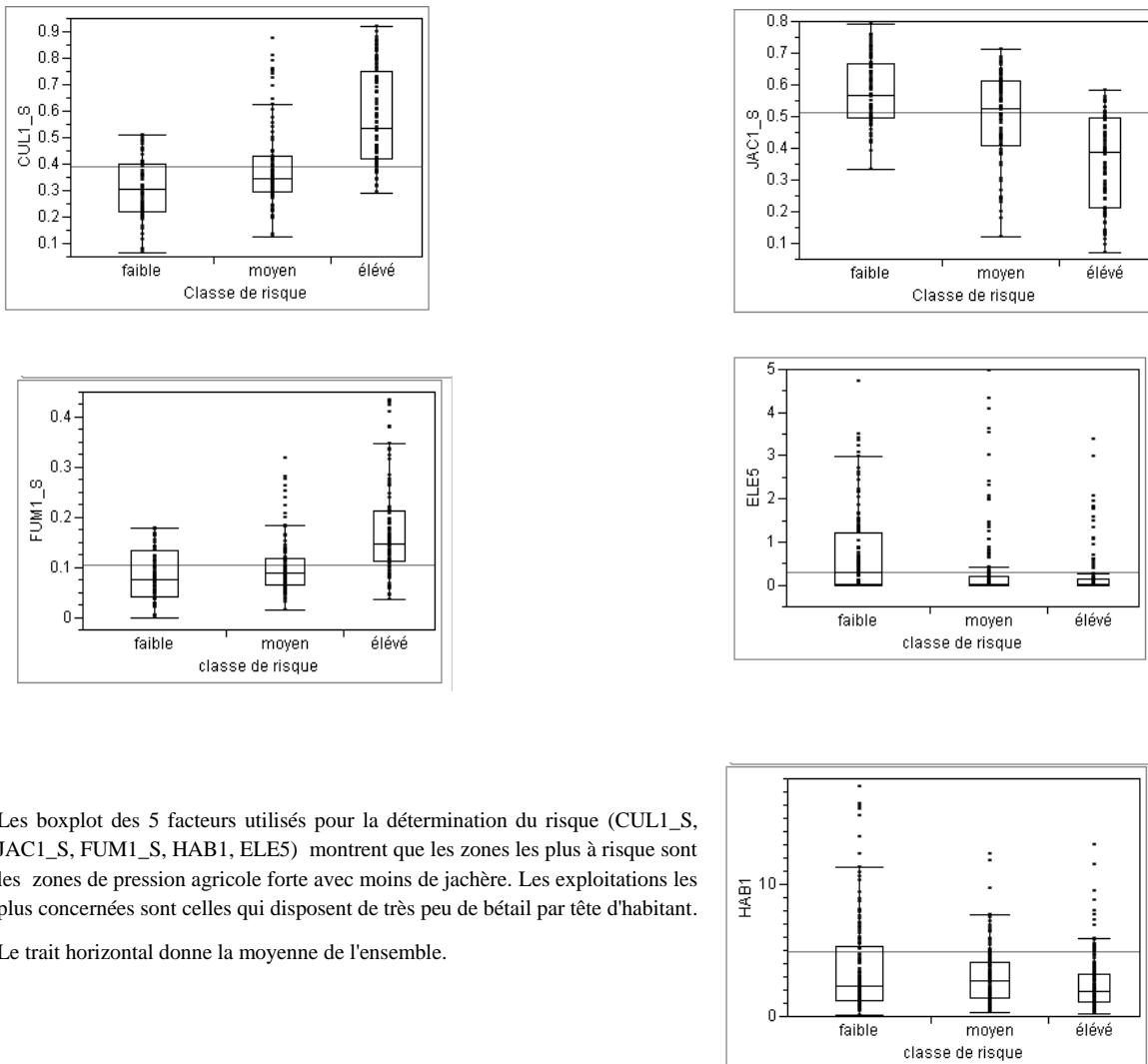


Figure 7-11: Risque moyen dans le terroir de Banizoumbou

(VR, VP, VG, CP et CR, représente les 5 catégories d'exploitation)



Les boxplot des 5 facteurs utilisés pour la détermination du risque (CUL1_S, JAC1_S, FUM1_S, HAB1, ELE5) montrent que les zones les plus à risque sont les zones de pression agricole forte avec moins de jachère. Les exploitations les plus concernées sont celles qui disposent de très peu de bétail par tête d'habitant.

Le trait horizontal donne la moyenne de l'ensemble.

Figure 7-12 : Caractéristiques moyennes des variables de viabilité selon trois classes de risque

Les niveaux de risque retenus dans ces graphiques dans cette classification diffèrent des 3 niveaux utilisés dans la RLP. Dans ce cas ci, notre échantillon a été divisé en 3 groupes presque égaux pour analyser les statistiques du risque alors que les trois groupes précédents de la régression par quantile sont des niveaux issus de l'analyse.

7.3 Discussion

En prenant en compte plusieurs variables qui caractérisent les exploitations du Fakara, l'étude a permis de relever que certaines d'entre elles peuvent expliquer les tendances du bilan partiel. L'analyse de ces variables a permis de mettre en exergue que les tendances des bilans partiels intragroupes ne peuvent pas être dissociées des facteurs de pression agropastorale, du système de gestion des terres et de l'élevage. Cette étude met aussi en évidence que le choix des variables explicatives du risque d'épuisement des terres doit tenir compte des facteurs liés à l'exploitation et de celles liées à la gestion communautaire des ressources. Les variables liées à la pression sur les terres et la disponibilité des jachères sont surtout liées au système foncier et diffèrent quand il s'agit d'un autochtone non gestionnaire, d'un éleveur gestionnaire qui a bénéficié de terres. Ainsi, comme pour les bilans, la dualité de l'organisation spatiale a nécessité la prise en compte de ces indicateurs à des échelles spatiales différentes de l'exploitation. Au niveau global, les variables liées à la pression agricole combinée à la gestion de l'élevage restent pertinentes dans ce type d'approche et d'autant plus que les exploitations agricoles sont mieux caractérisées à travers l'appropriation de troupeaux ou pas. Les tendances de risque accrues dans certaines exploitations plus que dans d'autres sont liées à la faible disponibilité de cheptel pour fumer les champs et à la pression agricole sur les terres. La conjugaison de ces deux facteurs à Kodey, entraîne des risques très élevés dans les classes d'exploitation des non gestionnaires et des campements pauvres. Les campements où vivent les éleveurs sont les moins à risque. Cependant, du fait de l'accès aux ressources communautaires, les prélèvements sur les parcelles des villageois ne sont pas compensés par des déjections animales. Une telle situation reste préjudiciable pour l'avenir des agroécosystèmes.

Le risque d'épuisement de la fertilité des sols en fonction de la disponibilité des terres par habitant est présent dans les trois terroirs, mais plus à Tchigo Tegui et Kodey qu'à Banizoumbou. Ce risque concerne essentiellement les campements d'éleveurs pauvres et les villageois. Ces campements sont tenus par l'ethnie peule et des minorités de Kel Tamashey. Quelques Djerma, les plus pauvres selon la catégorisation ILRI, vivent aussi dans les campements. Ces campements, en raison de l'origine de leurs habitants, ont bénéficié de terres sous plusieurs formes contractuelles qui ont évolué dans le temps. La forme contractuelle de durée variable ou indéterminée est la plus courante avec le paiement d'une dîme en nature

(bottes de mil) ou par l'offre de main d'œuvre annuelle sous forme de journées de sarclage dans le champ du propriétaire foncier ou d'autres types de travaux manuels. La vente des terres est opérée avec les riches éleveurs mais reste de moindre importance par rapport aux contrats moraux entre autochtones et immigrants (Turner et Williams, 2002). En dépit de la pauvreté de ces sols, les terres allouées sont souvent situées sur des emplacements abandonnés par les autochtones ou des anciennes friches. La concentration du bétail dans ces zones de campement avec très peu de jachères entraîne des pressions très élevées en début de saison des pluies sur les surfaces non cultivées. De même, comme dans les autres zones, la pression pastorale après les récoltes reste très élevée par rapport aux ressources disponibles.

Dans ces régions, l'apport de fumure dans les champs s'effectue essentiellement par épandage manuel, par la pâture et par le parage. Des quantités importantes sont appliquées sur très peu de champs et peuvent atteindre 24 tonnes/ha dans certaines unités. Ces superficies ne représentent que 11% des superficies totales appartenant aux 461 exploitations étudiées. Une très grande variabilité existe entre les parcelles au niveau des quantités de fumure avec comme conséquence une très grande variabilité au niveau des rendements. Ainsi, les exploitations villageoises sans bétail et les campements pauvres dans ces zones sont confrontés à un risque d'épuisement de la fertilité de leurs terres du fait de l'utilisation communautaire des ressources. Les résultats obtenus sur la fragilité du système basée sur les relations agriculture-élevage dans les zones de forte pression agricole concordent avec les travaux de Dalhem (Turner, 1995c; Fernández, Archer *et al.*, 2002; Hiernaux et Turner, 2002) sur la pertinence du rôle de la gestion des cultures et de l'élevage par les communautés rurales sur la fertilité des sols. Cependant, en l'absence d'indicateurs économiques dans notre étude, et au regard des résultats de ces études citées ci-dessus, les tendances observées en termes d'impact environnemental ne sont pas directement liées à la satisfaction des besoins alimentaires ou à la production agricole. Toute-fois, en termes d'impact environnemental, la proportion de terres concernées par des situations de risque reste très élevée. Les tendances observées dans l'analyse intraclassé d'exploitations expriment plus des situations prospectives à long terme de l'évolution possible des classes d'exploitations qu'une situation instantanée car on y distingue plusieurs catégories d'itinéraires et de pratiques. L'évolution de ces pratiques ne suit pas une tendance linéaire et ne peut pas concerner l'ensemble des exploitations dans le même temps.

Dans cette étude, l'hétérogénéité spatiale est prise en compte à l'échelle parcellaire, les classes d'exploitation les plus à risque en termes de durabilité, sont définies par rapport à la fertilité des sols, elle-même liée à la pression agricole et pastorale. Elle rompt aussi cette tendance à la caractérisation moyenne des exploitations qui peut être préjudiciable aux interventions visant à assurer le développement des populations sans tenir compte des particularités.

7.4 Conclusion partielle

Une approche d'évaluation du risque d'épuisement relatif de la fertilité des terres a été entreprise à travers une modélisation statistique du bilan partiel à l'aide des variables de viabilité des exploitations agricoles.

Les résultats de cette évaluation ont permis de relever que le risque est très élevé dans des zones à forte intensification (par l'apport de déjections animales dans les cultures) et à forte pression agricole. Les terres les plus concernées par ce risque élevé appartiennent à des exploitations qui possèdent très peu de bétail et qui subissent l'inégale répartition des restitutions de déjections animales issues de la pâture des ressources communautaires. Dans une moindre mesure, les exploitations se trouvant dans ce cas dans les autres terroirs sont aussi concernées.

Les résultats de l'analyse orientée vers des groupes d'exploitations peuvent servir à entreprendre des actions de développement ciblées en relation avec les questions de gestion des ressources naturelles. L'identification cartographique des zones et des terres des exploitations selon les différentes modalités de ces indicateurs permet une utilisation multiple des conclusions du travail.

L'examen des tendances des indicateurs d'épuisement des sols des exploitations agricoles fait apparaître l'apport de l'élevage dans la durabilité des systèmes mixtes agriculture élevage mais aussi l'impact négatif sur les exploitations villageoises avec peu de ressources en cheptel et en terres. Les différences liées aux ressources socio-économiques ont un impact considérable sur l'épuisement de la fertilité des sols et la dégradation des ressources.

Cette analyse du risque indique que le risque élevé concerne essentiellement une grande partie des exploitations du Fakara qui se caractérise par une faible dotation de cheptel, en moyenne de 0.14 UBT/habitant, des superficies cultivables par habitant de l'ordre de 3.7 ha/hbt. Le risque de ces exploitations est exacerbé à cause de la pression des cultures. L'intensification par l'utilisation des déjections animales dans ces zones concerne très peu d'exploitation et très peu de terres et ne permet pas d'assurer une durabilité du système agricole à l'échelle des terroirs. Les exploitations avec un risque faible sont celles qui sont dans des zones où le taux

de jachère est supérieur à 61% et qui disposent de plus de 6.5 ha/hbt. Dans ces zones, les exploitations ont des dotations en cheptel de l'ordre de 0.43 UBT/hbt.

Sur le plan méthodologique, cet outil replace la question de l'utilisation d'informations spatialement explicites pour améliorer l'évaluation des indicateurs de risque. En effet, les degrés de signification élevés des paramètres issus de l'occupation des sols et indépendants des exploitations, devraient permettre à l'avenir d'explorer l'évaluation des risques environnementaux liés aux questions de pressions agricoles à l'échelle zonale et de disposer de plan d'informations utiles à l'aide à la décision pour la gestion des terroirs.

8 Conclusion générale et perspectives

8.1 Conclusions

Les agroécosystèmes culture-élevage dans l'ouest du Niger ont été étudiés à travers la dynamique spatio-temporelle de leurs activités agricoles et de leur environnement dans trois terroirs, Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey. Leur durabilité liée à la gestion de l'exploitation et du terroir est analysée à travers les évaluations de flux organiques et bilans partiels d'éléments minéraux, essentiellement azote, phosphore et potassium,. Les contributions méthodologiques dans l'évaluation des bilans apportées par cette recherche sont surtout la prise en compte et l'intégration de 2 niveaux d'échelles d'organisation de l'agroécosystème d'une part, et d'autre part la mise au point d'un indicateur de risque de perte de fertilité des terres sur la base de bilan et des variables de viabilité de l'exploitation agricole.

Pour tenir compte de la dualité de l'organisation spatiale des agroécosystèmes qui caractérisent les systèmes mixtes culture-élevage, un lien a été établi entre exploitation agricole et terroir. Ce qui a nécessité l'utilisation de deux modèles pour le calcul des flux de gestion, NUTMON (De Jager, Nandwa *et al.*, 1998b; Van den Bosch, De Jager *et al.*, 1998) pour ceux liés aux cultures à l'échelle parcellaire et NUTPAST pour ceux liés à l'échelle du terroir. Ces deux entités, terroir et exploitation agricole sont interdépendants en raison des flux existant entre elles mais aussi des décisions de gestion, qu'elles soient communautaires ou individuelles. L'interaction entre les deux modèles se base sur une approche de modélisation spatiale des transferts de fertilité dans l'agroécosystème. Cette approche prend en compte la dimension spatio-temporelle des productions végétales, des activités du bétail et la dynamique temporelle des effectifs du cheptel. C'est aussi une approche systémique qui fait intervenir la triple dimension homme, milieu et animal. Une modélisation statistique a permis de mettre au point un indicateur intégré de risque de perte de fertilité des sols par exploitation agricole et par terroir sur la base de facteurs qui caractérisent la viabilité des exploitations agro-pastorales. Le système d'information géographique utilisé pour la modélisation spatiale a permis par la suite de représenter spatialement les différents niveaux de risque en rapport avec les terres des exploitations et d'aboutir à un nouveau plan d'information à intégrer dans une démarche d'analyse spatiale.

Les écarts entre les trois terroirs investigués, Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey, se caractérisent essentiellement par une différence dans l'importance des terres cultivées avec, respectivement pour les 461 exploitations étudiées, 31%, 46% et 74% des terres mises en culture. Le corollaire de la pression agricole pour la même année, représenté par l'importance des jachères pour le même échantillon est respectivement de 50%, 43% et 25% des terres disponibles à Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey. La densité du cheptel et le nombre d'UBT par habitant varient aussi d'un terroir à l'autre avec une plus forte concentration de bétail dans les zones où la pression agricole est forte.

L'évaluation des flux liés aux cultures et aux pâturages a permis de quantifier les flux organiques et leur variabilité saisonnière marquée par les éléments suivants :

- des niveaux de production de masse végétale herbacée supérieurs dans les cultures que dans les pâturages et compris entre 390 kgMS.ha^{-1} dans des sols incultivables à $2150 \text{ kgMS.ha}^{-1}$ dans les cultures fumées.
- Une contribution aux flux organiques liés à l'élevage dans l'ensemble dominé par la présence de zones non cultivées qui s'élève à 66% avec des variations entre terroirs dues aux écarts d'occupation de sol. Une plus grande contribution des jachères aux stocks minéraux de l'ordre de 44%.
- Une différence marquée entre les terroirs quant à la répartition des stocks organiques et minéraux essentiellement liée aux différences d'occupation des sols.

L'analyse de la dynamique temporelle du cheptel a mis en évidence que

- les effectifs du cheptel se caractérisent par de grandes fluctuations saisonnières. Celles-ci se marquent par des densités supérieures en saison sèche à celles de la saison des pluies qui s'expliquent par les départs en transhumance et l'exclusion du bétail des champs pendant la saison de culture.

De manière générale, les stocks organiques destinés à l'alimentation animale et les fluctuations saisonnières sont essentiellement marqués par les différences d'occupation des

sols dans les terroirs qui ont un impact sur la gestion de l'élevage essentiellement, mais aussi sur les cultures.

L'évaluation du bilan d'ingestion et d'excrétion a permis de relever :

- qu'avec des charges moyennes de 6.3 UBT.km^{-2} , le bétail n'utilise que 25% des masses appétibles disponibles et 10 à 15% des masses végétales produites annuellement dans cet agroécosystème avec des variations importantes entre les trois terroirs ;
- le recyclage des fourrages ingérés par le bétail, si l'on ne tient compte que des excréptions fécales, a été de l'ordre de 42% dans les terroirs du Fakara.(40% de l'azote, 87% du phosphore et 42% du potassium);
- les flux minéraux ingérés ont été respectivement pour l'azote, le phosphore et le potassium de 3.2 kg/ha, 0.2 kg/ha et 2.6 kg/ha et les excréptions hors parage, c'est-à-dire le long des itinéraires de pâture, sont de l'ordre de 1.3 kg/ha, 0.2 kg/ha et 1.1 kg/ha.

Cette recherche a permis de montrer que la globalisation dans l'approche NUTMON de la conduite du bétail hors des terres de l'exploitation, dans le cas des terroirs étudiés, ne permet pas de prendre en compte la variabilité des flux organiques liés aux cultures et à l'élevage dans ces zones. Cette globalisation porte sur 83% et 60% des superficies respectivement explorées le jour et la nuit par le bétail. La prise en compte de cette variabilité par modélisation spatiale des flux à l'échelle terroir, dans l'outil que nous avons développé, NUTPAST, améliore l'évaluation des flux organiques et des bilans partiels des éléments minéraux, azote, phosphore et potassium à l'échelle de l'exploitation agricole et du terroir. En effet, la prise en compte de l'impact de la mobilité des troupeaux à l'échelle du terroir et les dépôts de déjections fécales du bétail dans l'exploitation, opérés par les animaux extérieurs à cette dernière, permettent d'améliorer la quantification des flux entrants et sortants des terres de l'exploitation. Les bilans partiels évalués avec l'approche NUTPAST montrent une situation moyenne des terroirs proche de l'équilibre (Figure 7.1). Ces bilans partiels pour l'azote, le phosphore et le potassium sont respectivement 0.3 kg.ha^{-1} , 1.2 kg.ha^{-1} et 0.9 kg.ha^{-1} . Cette tendance du bilan partiel moyen moins négatif que celui calculé par la méthode

NUTMON s'observe également dans les terres des exploitations agricoles. Les valeurs obtenues mettent en évidence le nécessaire équilibre à rechercher entre la pratique de l'élevage, les ressources végétales annuelles disponibles et l'intensification par la fumure.

COMPARAISON DES BILANS PARTIELS DES ELEMENTS MINERAUX N,P,K DU FAKARA CALCULES PAR NUTMON ET NUTPAST

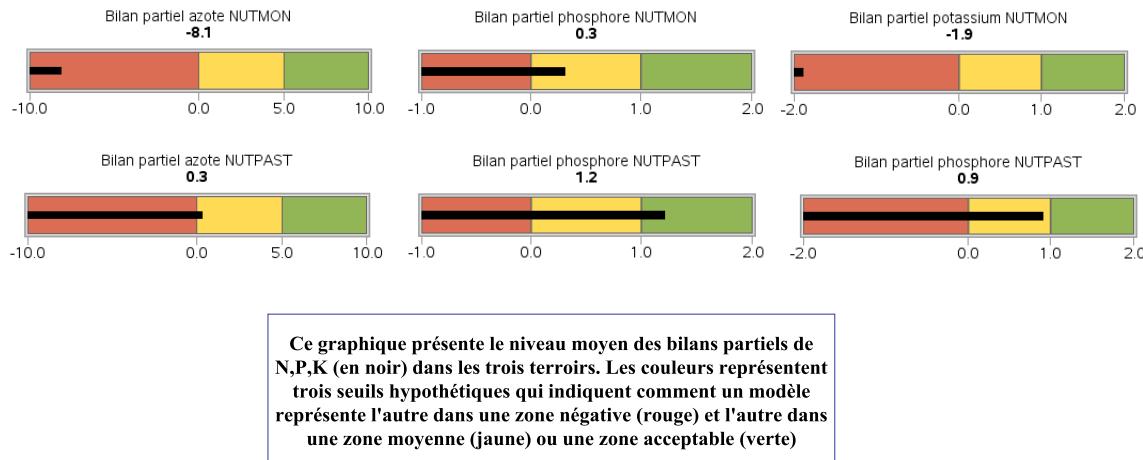


Figure 7.1 : Comparaison des bilans partiels N, P, K de NUTMON et de NUTPAST

La recherche de variables pertinentes de viabilité des exploitations agricoles par la méthode des régressions par quantile a permis de retenir trois grands groupes d'indicateurs significatifs qui sont :

- La pression agricole sur les terres
- La taille des troupeaux
- La pratique de la fumure

Pour chaque variable, un risque relatif ou partiel d'épuisement de la fertilité des sols a été déterminé sur base des méthodes de régression logistique polytomique de type multinomiale avec comme variable catégorielle trois niveaux de quantile des bilans partiels d'azote. Un indicateur intégré de risque a été mis au point avec un jeu minimal de données, les dotations en terres et en cheptel de l'exploitation agricole, les dynamiques spatiales du terroir portant sur l'intensité de fumure, de culture et la disponibilité de jachères. En considérant les trois niveaux de risque retenus dans cette recherche, les situations les plus viables dans les trois terroirs du Fakara sont les exploitations qui ont la moitié des terres encore en jachère, qui cultivent environ un tiers de leurs terres, qui ont en moyenne quatre petits ruminants par

habitant et qui ont 7 ha de terres (avec ou sans cultures correspondant au percentile 90% de HAB1) par habitant. Cette approche met aussi en évidence dans ces agroécosystèmes des tendances d'épuisement annuel de la fertilité des terres plus élevée chez les villageois et les éleveurs qui ne possèdent pas de bétail et qui sont dans des zones de pression agricole équivalent à 62% des terres cultivées en moyenne, avec des superficies de terres par habitant ne dépassant guère 3.7 ha.hbt^{-1} .

De telles tendances permettent de conclure que dans les agroécosystèmes culture-élevage de l'ouest du Niger, le risque d'épuisement de la fertilité des terres est intimement lié à la gestion foncière et au déséquilibre existant entre l'utilisation des ressources végétales par le bétail et le recyclage in situ. En effet, la position dans l'espace des propriétaires de bétail et le libre accès des parcours, même si elle assure une certaine fertilité des parcelles des exploitations agricoles disposant de bétail, ne profite pas à l'ensemble de la communauté. Il faut prendre en compte un transfert de fertilité dans l'espace qui accroît le risque de perte de fertilité pour une partie de la communauté et qui améliore les terres des propriétaires de bétail. Ce déséquilibre dans la gestion des ressources communautaires est un des facteurs de non viabilité de ce système de production mixte agriculture – élevage dominé par la culture du mil et la présence de l'élevage. Une telle situation compromet durablement le système car elle entraîne une baisse du rendement agricole et dégrade l'environnement dans les zones à forte pression agricole. Cette situation se double, dans les zones sous pression agricole forte comme à Kodey, d'un accroissement, à terme, des processus érosifs dans les exploitations qui ne bénéficient pas de recyclage de la matière organique par le bétail et de recyclage in situ des chaumes. Dans les zones comme Banizoumbou où il existe encore des superficies en jachères qui atteignent 50% des terres cultivées, les niveaux de risque restent en dessous des deux autres terroirs car la jachère permet d'assurer les besoins alimentaires des troupeaux. Cependant, les évolutions démographiques actuelles et les changements climatiques peuvent avoir raison de ces systèmes qui évoluent très peu sur le plan des techniques agricoles. Une des tendances de survie, dans ces zones qui connaissent une saturation de l'espace, reste l'amplification des migrations saisonnières pour subvenir aux besoins de la famille. Ces solutions transitoires ne sont pas des stratégies durables car les zones d'accueil sont confrontées, elles aussi, aux problèmes de saturation et à l'impact de la mondialisation sur leur économie.

Les tendances actuelles dans ces systèmes de production culture mil-élevage affectés par la pression agricole, le déséquilibre du transfert de fertilité vers une minorité et les changements climatiques ne peuvent que mettre en péril la durabilité des agroécosystèmes culture-élevage. L'agriculture d'autosubsistance menée dans ce contexte, sans amélioration technique (mêmes outils aratoires depuis des siècles), avec les mêmes variétés de mil, ne peut pas être un levier pour le développement économique de ces régions. De même, l'absence de référence technique qui permettrait de répliquer les innovations technologiques dans ces systèmes, à l'image de la cohabitation entre les systèmes de culture de rente et l'agriculture céréalière, est un frein à l'amélioration de l'agriculture dans les agroécosystèmes culture-élevage. Certes, les pratiques de parage, de fumure restent des techniques séculaires d'amélioration de la productivité agricole. Si l'on part de l'hypothèse que la pression sur les terres sera croissante (avec la pression démographique), un des scénarios inévitables sera la nécessité d'avoir des systèmes mieux intégrés agriculture-élevage ou culture-élevage favorisant une meilleure optimisation de la fertilisation organique d'origine animale avec comme postulat un accès équitable aux ressources fourragères et à la fumure. Aujourd'hui, dans le sahel, il n'existe pas de gratuité de la fumure animale. Ne sera-t-il pas intéressant de prévoir pareille pratique pour les ressources alimentaires du bétail issues des jachères ou des chaumes des champs ? L'accès à la propriété du bétail reste difficile aux petits cultivateurs qui sont les plus nombreux dans ces terroirs.

A la suite de bilans effectués par différentes instances de recherche, plusieurs recommandations proposent l'utilisation d'engrais minéral dans les cultures céréalières. De fortes augmentations de rendements ont été obtenues tant sur station qu'en milieu paysan à l'aide d'engrais minéraux. En outre des essais menés dans le Fakara dans le cadre du projet DGCD montrent le rôle positif de l'apport de phosphore sous forme de micro doses dans la gestion du risque climatique (Gérard, Fatondji *et al.*, 2007). L'adoption d'innovations comme l'apport d'engrais dans les cultures a toujours été supérieure dans les systèmes de culture de rente que dans les cultures d'autosubsistance. Le financement de ce type d'agriculture semble être un des problèmes cruciaux pour son évolution, de même que la primauté accordée par les exploitations agricoles à la gestion du risque climatique. A l'heure où se posent avec acuité les problèmes d'utilisation des engrains en termes de durabilité à l'échelle mondiale, ne serait-il pas

préférable d'éviter à ces zones qui souffrent déjà de leurs conditions climatiques, l'utilisation d'engrais chimiques et encourager celle d'engrais vert, biologique afin d'éviter, à terme, des conséquences problématiques, difficilement contrôlables, au niveau de la pollution des terres et des cours d'eau ?

Sur le plan méthodologique, il ressort que les bilans partiels, malgré leurs incertitudes, permettent de bien renseigner sur les tendances d'épuisement de la fertilité des sols. Cependant, ils doivent être complétés par des études concernant les pratiques et habitudes des groupes d'exploitation étudiés afin de mieux identifier les facteurs en cause, et notamment ceux liés aux modes de gestion de ces dernières. Ainsi, la connaissance de l'occupation des sols, de la démographie de la population, de l'élevage et de ses activités, sur un panel représentatif d'exploitations de la région étudiée est nécessaire dans une telle démarche. Une mise à jour régulière des données existantes sur la zone, à l'image des travaux du projet DGCD et du projet ECLIS en cours devront permettre d'utiliser la démarche de cette recherche pour étudier l'impact des politiques, des projets en cours sur les exploitations. La production d'informations sur le climat par des modèles de prédiction et leur intégration dans les modèles de croissance peuvent être des inputs de ce système pour des études de scénario en vue de permettre une prise de mesures adéquates pour la protection des exploitations à risque et pour des interventions visant le maintien de l'équilibre actuel ou son amélioration.

L'approche spatiale, en permettant de modéliser les activités d'élevage pour mieux évaluer l'ingestion et l'excrétion à l'échelle des unités d'occupation des sols, a aussi permis d'établir le lien entre les deux échelles, celle de l'exploitation agricole et ses terres et celle de l'occupation des sols dont la dynamique est surtout située à l'échelle du terroir. Cette exploitation des caractéristiques des systèmes d'informations géographiques dépasse le simple rôle assigné à ceux-ci dans la gestion des données et leur agrégation. La possibilité de relier deux types de modèles de données, vectoriel et matriciel reste un des atouts essentiels des SIG dans les approches de modélisation multi-échelles (parcelle, occupation des sols, unité géographique) et multi-temporelle (découpage en saisons essentiellement).

Les limites d'une telle démarche se situent sur plusieurs plans tant dans la prise en compte des bilans partiels seuls que dans l'approche utilisée :

- La limitation au bilan partiel, que nous avons introduite volontairement, constitue indubitablement une des limites de cette étude. De nombreux auteurs constatent, en effet, le peu de fiabilité à accorder à un exercice qui agrège aux évaluations de bilans partiels d'un terroir donné ou d'une exploitation donnée, des bilans environnementaux calculés par des fonctions de transfert. En regard à leur mode de calcul par des fonctions de pédo-transfert généralement liées à la pluviosité annuelle et aux caractéristiques des sols, leur introduction n'induit aucune variabilité de tendance dans les résultats de notre échelle de travail et dans la méthode de modélisation statistique utilisée.
- L'absence de prise en compte des erreurs d'estimation multiples aux différentes échelles et sur les différentes évaluations : plusieurs incertitudes non prises en compte existent sur les estimations de masse végétale, les évaluations des effectifs du cheptel, les éléments minéraux contenus dans les végétaux et les déjections animales, les approximations réalisées sur les déplacements des troupeaux, et les quantités de matières organiques ingérées et excrétées. Leur prise en compte montre une propagation d'erreurs qui peut entraîner des variations de bilan du simple au double (Lesschen, Stoorvogel *et al.*, 2007). Il est évident que les bilans partiels obtenus sont influencés par ce type d'incertitude. Cependant la démarche adoptée allie approches quantitative et qualitative pour analyser plusieurs types d'échelles et d'organisations sociales. Ce type d'approche reste un des moyens d'améliorer la compréhension de la dynamique des agroécosystèmes dans l'utilisation des terres (Turner, 1999b).
- Le modèle NUTMON a fait l'objet de nombreuses critiques pour la quantité d'informations nécessaires. Il en va de même de l'approche utilisée. Les données sur le cheptel, leurs activités, les données d'ingestion et d'excrétion, l'occupation des sols, le parcellaire sont autant d'informations qui restent difficile à acquérir dans le contexte actuel du Sahel. Les informations sur lesquelles la présente recherche a été conduite ont mobilisé plusieurs équipes pluridisciplinaires composées de chercheurs internationaux et nationaux pendant plusieurs années, avec une contribution financière importante provenant d'appuis extérieurs. Il est

clair qu'aucun pays de la zone sahélienne ne peut supporter une collecte de données de cette ampleur vu l'état de leur économie et leurs priorités. Aussi, des alternatives doivent être recherchées pour poursuivre ou améliorer les études de bilans minéraux des agroécosystèmes dans cette zone. L'approche de détermination d'un indicateur de risque par un jeu de données limité peut permettre d'aller dans ce sens pour les prochaines évaluations.

Les difficultés liées au passage des bilans partiels aux bilans globaux non traitées dans la présente étude sont essentiellement liées à l'évaluation des flux environnementaux à des échelles du terroir pour être compatibles avec les unités d'occupation des sols ou les parcelles.

D'autres limites connues aux évaluations de bilans portent sur :

- les excréptions urinaires du bétail et leurs effets sur la biochimie et la biologie des sols ;
- la prise en compte des ligneux, en particulier le recyclage qui contribue à la matière organique du sol ;
- le recyclage *in situ* du matériel végétal non exporté et non consommé par le bétail et l'importance des activités des insectes et des rongeurs sur ce recyclage ;
- la question du changement d'échelle spatiale vers le niveau supérieur au terroir et l'extrapolation à d'autres systèmes agricoles.

Plusieurs travaux critiques sur les bilans d'éléments minéraux en agriculture se sont toujours posés la question de la pertinence de la poursuite de ces évaluations en Afrique subsaharienne. Des réponses presque identiques à ces questions sont données et justifiées par Schlecht et Hiernaux (2004) et Cobo, Dercon *et al.*, (2010). Le problème crucial de l'agriculture dans les pays concernés (liés essentiellement à la pauvreté des sols) et de sa production qui n'arrive pas à satisfaire les besoins d'une population en constante augmentation milite en faveur d'une poursuite des études de bilans. De même, plusieurs raisons scientifiques et pratiques sont en faveur des études de bilans selon Schlecht et Hiernaux (2004), comme l'amélioration des connaissances sur les agroécosystèmes culture-élevage, l'évaluation des tendances sur des processus complexes et l'examen approfondi du

fonctionnement des écosystèmes. Les raisons pratiques les plus avancées sont l'impact des bilans sur les décideurs politiques, l'identification des pôles de production qui épuisent la fertilité, et la possibilité de disposer d'indicateurs sur les grands cycles biogéochimiques (cycle de l'eau, carbone, CO₂, O₂, azote, phosphore, soufre, etc.) et sur les changements climatiques. L'ensemble de ces justifications doit être accompagné d'une amélioration des modèles, notamment, par une meilleure internalisation des flux pour les différentes échelles et par l'utilisation des systèmes d'information géographique pour améliorer l'intégration des flux.

Plusieurs techniques existent pour les nouvelles approches de modélisation. Elles ont été inventoriées par Cobo, Dercon *et al.* (2010). Elles vont des modèles qui font une rupture avec l'aspect statique de NUTMON et qui combinent les aspects biophysiques et économiques allant du pas de temps annuel (Shepherd et Soule, 1998) à des modèles fonctionnant au pas de temps journalier comme DYNBAL-N (Tittonell, Leffelaar *et al.*, 2006). De nouvelles techniques ont été explorées comme la combinaison des aspects géostatistiques et de la spectrographie pour la quantification précise des éléments minéraux (Stuth, Jama *et al.*, 2003; Shepherd et Walsh, 2007 ; Kidane, Stuth *et al.*, 2008; Wiedower, Hansen *et al.*, 2009). Outre les aspects d'utilisation des SIG explorés dans cette recherche, les approches multi-agents offrent des nouvelles perspectives en incluant dans les modèles, les comportements des différents agents (Manlay, Cambier *et al.*, 2000; Ginot, Le Page *et al.*, 2002; Grimm, Berger *et al.*, 2006; Schreinemachers, 2006; Schreinemachers, Berger *et al.*, 2007 ;Saqalli, Caron *et al.*, 2009).

En dépit de ces approches novatrices, très peu d'évaluations des bilans d'éléments nutritifs ont été réalisées dans les agroécosystèmes culture-élevage des zones semi-arides d'Afrique de l'ouest comme le confirment les travaux cités dans le tableau 6.1 de cette recherche, en comparaison avec l'Afrique de l'Est. Les quelques rares études conduites dans cette région ont été menées dans des systèmes cotonniers (Stoorvogel, Bonzi *et al.*, 1999; Kanté, Smaling *et al.*, 2007) à l'exception des travaux conduits au Niger et au Sénégal (Hiernaux, Fernandez-rivera *et al.*, 1997, Manlay, Ickowicz *et al.*, 2004; Schlecht, Hiernaux *et al.*, 2004) qui sont essentiellement des bilans partiels comme dans le cas de cette étude. Cette tendance laisse penser à un désintérêt dans ce type d'évaluation pour les cultures autres que celles de rente. Une des raisons essentielles évoquées par Stoorvogel et Smaling (1998) est l'absence de

données. Il faut ajouter l'absence d'innovation dans les outils et méthodologies utilisées pour l'évaluation des bilans dans cette région, d'autant que plusieurs résultats sont *in fine* comparés aux résultats obtenus par Stoorvogel et Smaling (1990b) et arrivent aux mêmes conclusions de bilans négatifs dans les agroécosystèmes du Sahel. De telles répétitions font dire à Færge et Magid (2004) que les conclusions relatives aux études de bilans d'éléments minéraux en Afrique sub-saharienne sont devenues des faits scientifiques. Notre approche tranche avec cette vision des bilans d'éléments minéraux en indiquant :

- ✚ d'une part, une situation d'état du rôle de l'élevage, les valeurs des bilans partiels pour les trois éléments minéraux, les tendances existantes dans les exploitations, et les facteurs qui expliquent ces tendances.
- ✚ et d'autre part, en représentant spatialement les terres des exploitations qui se retrouvent dans les différentes typologies de risque qui ressortent de l'analyse des facteurs pertinents.

Une des conclusions importantes de notre recherche sur les agroécosystèmes culture-élevage est que les pratiques actuelles mettent sérieusement à risque la durabilité de l'agriculture dans les sites étudiés (Figure 8-1)

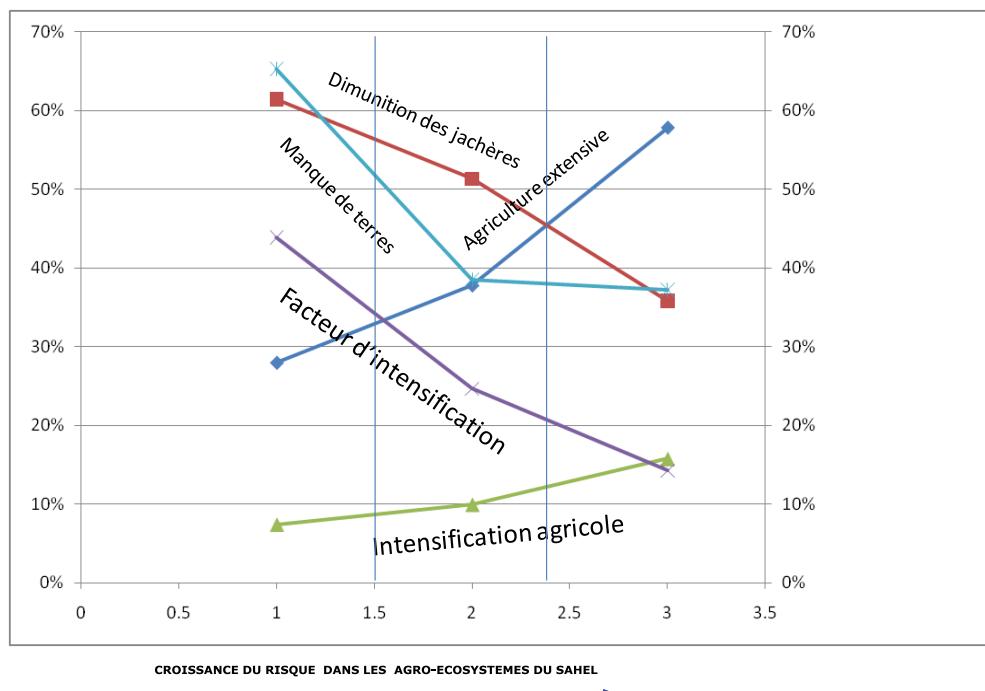


Figure 8-1: Synthèse des facteurs et tendances du risque (RER)

Dans un tel contexte et sur la base des conclusions de cette recherche, nous donnerons quelques perspectives pour la poursuite de ce type de travaux, sur plusieurs échelles spatio-temporelles, dans les zones semi-arides d'Afrique de l'Ouest où la problématique de la fertilité des sols est un des facteurs d'insécurité alimentaire chronique ?

8.2 Perspectives

L'approche utilisée dans notre démarche d'évaluation des flux organiques et des bilans partiels dans les agroécosystèmes culture-élevage de l'Ouest-Niger a permis de partir d'une situation comportant beaucoup de données pour aboutir à une autre qui permet d'expliquer les grandes tendances des exploitations étudiées avec un jeu minimal de données. Une telle approche, à l'image des études systémiques, met en jeu plusieurs disciplines scientifiques nécessitant d'être menées par des équipes interdisciplinaires. Cet aboutissement permet d'ouvrir moult perspectives pour l'évaluation des bilans des éléments minéraux.

La base de données du Fakara constitue un exemple de capitalisation de travaux d'une institution et de chercheurs sur l'agriculture, très rare en Afrique de l'Ouest et particulièrement au Sahel. Grâce à la structure de la base de données de NUTMON et de NUTPAST qui intègre aussi bien les données tabulaires que spatiales, ces informations peuvent être utilisées de manière interactive pour l'évaluation des bilans partiels, des bilans globaux et des analyses de scénario. A ce stade, étant donné les collaborations entre l'ILRI et les autres centres de recherche, cette base de données peut être transférable et mise à jour dans les systèmes en cours ou peut être développée pour la poursuite des recherches sur les systèmes de production mixtes culture-élevage. Elle s'y prête aisément comme le prouvent les résultats obtenus dans cette recherche.

De futurs travaux pourraient viser l'intégration de cartes d'occupation des sols issues des observations satellites - dont les qualités sont meilleures que par le passé - (Stephenne et Lambin, 2001; Ramankutty, 2004 ; Bicheron, Huc *et al.*, 2008; Brink et Eva, 2009), la prise en compte des produits issus de la spatialisation des données du cheptel (FAO, 2007), les informations sur les localités et la population. L'ensemble de ces données disponibles avec des résolutions compatibles pour une prospection multi-échelle devrait permettre de

poursuivre les études des bilans d'éléments minéraux en les couplant à des modèles de croissance des cultures (Hoogenboom, 2000; Tan et Shibasaki, 2003; Herrero, González-Estrada *et al.*, 2007, Akponikpé, 2008), des modèles de croissance de la végétation naturelle et de production végétale (Lo Seen, Mougin *et al.*, 1995; Jarlan, Mougin *et al.*, 2005; Zine, Jarlan *et al.*, 2005; Hiernaux, Ayantunde *et al.*, 2009) et des modèles de croissance des troupeaux (Lesnoff, Lancelot *et al.*, 2007; Lesnoff, 2008). Ces études devront suivre des approches de modélisation plus dynamiques qui font intervenir les caractéristiques des agroécosystèmes cultures-élevage dans toute leur dimension (Herrero, Thornton *et al.*, 2010) à l'image des systèmes de pensée proposés par Keulen et Schiere (2004), « *Complex system thinking*' » et qui permettent de passer de l'état d'observation et de diagnostic permanent de la pauvreté des populations sahéliennes à des solutions endogènes qui bénéficient des apports et solutions externes dans une optique d'un environnement de production durable.

Les systèmes de production mixte-culture élevage en plus d'être confrontés aux problèmes de pression de terre doivent faire face aux impacts des changements climatiques sur la productivité des parcours, la santé animale, et les questions liées à la biodiversité (Thornton, van de Steeg *et al.*, 2009). De même, les dynamiques sociétales et leurs implications sur la démographie, l'urbanisation et les systèmes fonciers sont autant d'éléments à intégrer dans un système d'analyse des risques et de la vulnérabilité de ces systèmes de production en vue de les accompagner efficacement vers un développement durable. Aussi, les modèles d'analyse de risque sur l'agriculture devront prendre en compte ces différents éléments dans les études de scénario en y intégrant les aspects spatiaux pour identifier les zones et les périodes pendant lesquelles les différentes stratégies peuvent être mises en œuvre et constituer des éléments d'aide à la décision pour les scientifiques, les techniciens et les politiques.

Au terme de cette recherche sur les systèmes de production mixtes culture-élevage, beaucoup reste à faire pour le développement agricole des pays sahéliens, voire les pays en voie de développement car au-delà des solutions techniques et scientifiques qui la soutiennent, la question de l'agriculture sahélienne a une composante politique. C'est cette composante qui doit intervenir efficacement, en synergie avec la recherche et le développement, sur les questions foncières soulevées qui entraînent des surcroûts de risque mais aussi sur la nécessaire imbrication des cultures et de l'élevage tant au niveau de la formation et des

institutions qu'au niveau des acteurs. La séparation des questions relatives à la production animale et des cultures, au niveau institutionnel, au niveau de la formation et de la recherche, et du développement continue d'avoir des conséquences néfastes sur le développement agricole au Sahel tant sur la nécessaire association de ces activités que dans les conflits agriculteurs-éleveurs.

Bibliographie

S

Achard, F. et M. Banoin (2003a). "Fallows, forage and nutrients transfers by livestock in Niger." Nutrient Cycling in Agroecosystems **65**: 183-189.

Achard, F. et M. Banoin (2003b). "Fallows, forage production and nutrient transfers by livestock in Niger." Nutrient Cycling in Agroecosystems **65**(2): 183-189.

Achard, F., M. Banoin et C. Bartholoméy (1998). Gestion de la fumure animale dans un terroir du sud-ouest du Niger. Fertilité et relations agriculture-élevage en zone de savane, Cirad, Montpellier, France, Cirad.

Achard, F., N. Konieczka, P. Montagne et M. Banoin (1996). Ressources ligneuses des jachères du Sud-Ouest du Niger. In: C. Floret (Eds), Jachère, lieu de production, Bobo Dioulasso, Burkina Faso, 2-4 octobre 1996, CORAF, 43-48.

Achard, F., H. Pierre et M. Banoin (2001). Les jachères fourragères naturelles et améliorées en Afrique de l'Ouest. La jachère en Afrique tropicale, Paris,, John Libbey Eurotext.

Agresti, A. (1980). "Generalized Odds Ratios for Ordinal Data." Biometrics **36**(1): 59-67.

Agresti, A. (2007). An introduction to categorical data analysis, 2nd edition. New York, John Wiley & sons.

Akpo, L. E., M. Grouzis et A. T. BA (1995). "L'arbre et l'herbe au Sahel: effets de l'arbre sur la composition chimique des pâturages naturels du Nord-Sénégal (Afrique de l'Ouest)." Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux **146**(10): 663-670.

Akpo, L. E., D. Masse et M. Grouzis (2002). "Durée de la jachère et valeur pastorale de la végétation herbacée en zone soudanienne au Sénégal." Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux **55**(4): 275-283.

Akponikpé, P. B. I. (2008). Millet response to water and soil fertility management in the Sahelian Niger : experiments and modeling. Faculté d'Ingénierie Biologique, Agronomique et Environnementale, Département des Sciences du Milieu et de l'Aménagement du Territoire. Louvain La Neuve, Université catholique de Louvain. **Phd:** 200.

Alexandratos, N. (2005). "Countries with Rapid Population Growth and Resource Constraints: Issues of Food, Agriculture, and Development." *Population and Development Review* **31**(2): 237-258.

Allen, R. E., Ed. (1984). *The Oxford Dictionary of Current English*. Oxford, Oxford University Press.

Altman, D. G. et J. M. Bland (2005). Standard deviations and standard errors. *331*: 903-.

Ambouta, J.-M. k. et C. Valentin (1996). "Jachères et croûtes d'érosion au Sahel." *Sécheresse* **7**: 269-275.

Antoine, S. N., R. Ouola, C. Pane et T. Karim (2006). "Effect Of Bird Manure On Cotton Plants Grown On Soils Sampled From Faidherbia Albida Park Land In Burkina Faso Sudanian Zone." *Journal of Agriculture, Forestry and the Social Sciences*. **4**(1): 114-126.

AP3A (2002). Système de gestion de la banque de données. SGBD. C. R. AGRHYMET. Niamey, Coopération Italienne, OMM, CILSS.

Atallah, T. (1993). "Conditions de valorisation du fumier et risques de lixiviation de l'azote." *Cahiers Agricultures* **2**: 26-35.

Ayantunde, A. A. (1998). Influence of grazing regimes on cattle nutrition and performance and vegetation dynamics in Sahelian rangelands. Wageningen, The Netherlands., Wageningen Agricultural University. **Phd**.

Ayantunde, A. A., S. Fernandez-Rivera, P. Hiernaux, H. van Keulen et Udo (1999). "Forage intake and feeding behaviour of day and/or night grazing cattle in." In: Regulation of feed intake (eds. Heide, D van der, Huisman, EA, Kanis, E: 197.

Ayantunde, A. A., S. Fernández-Rivera, P. H. Hiernaux et R. Tabo (2008). "Implications of restricted access to grazing by cattle in wet season in the Sahel." *Journal of Arid Environments* **72**(4): 523-533.

Ayantunde, A. A., S. Fernandez-Rivera, P. H. Y. Hiernaux, H. Van Keulen, H. M. J. Udo et M. Chanono (2001). "Effect of timing and duration of grazing of growing cattle in the West African Sahel on diet selection, faecal output, eating time, forage intake and live-weight changes." *Animal Science* **72**: 117-128.

Ayantunde, A. A., S. Fernandez-Riviera, P. H. Hiernaux, H. Van Keulen et H. M. J. Udo (2002). "Day and night grazing by cattle in the Sahel." *Journal of Range Management* **55** (2001): 144-149.

Ayantunde, A. A., P. Hiernaux, S. Fernandez-Rivera, H. van Keulen et H. M. J. Udo (1999). "Selective grazing by cattle on spatially and seasonally heterogeneous rangeland in Sahel." Journal of Arid Environments **42**(4): 261-279.

Ayantunde, A. A., T. Williams, H. Udo, S. Fernández-Rivera, P. Hiernaux et H. Van Keulen (2000). "Herders' Perceptions, Practice, and Problems of Night Grazing in the Sahel: Case Studies from Niger." Human Ecology **28**(1): 109-129.

Bado, B. V. (2002). Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Département des sols et de génie agroalimentaire, Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'alimentation. Québec - Canada, Université de Laval. **PHD - Thesis**.

Bahili, J. et B. Djaby (1993). "L'enquête nationale sur les effectifs du cheptel au Burkina Faso." *STATECO* **73**: 49-62.

Baidu-Forson, J. (1994). Uses and economic value of crop residues and herbaceous plants to rural households in western Niger. Ressources management program, Progress report. ICRISAT. Niamey, ICRISAT. **5**: 13 pages.

Baidu-Forson, J. (1995). "Determinants of the availability of adequate millet stover for mulching in the Sahel." Journal of sustainable agriculture **5**(1/2): 101-116.

Baidu-Forson, J. (1999). "Factors influencing adoption of land-enhancing technology in the Sahel: lessons from a case study in Niger." Agricultural Economics **20**(3): 231-239.

Baijukya, F. P. et B. Steenhuijsen Pitors (1998). "Nutrient balances and their consequences in the banana-based land use systems of Bukoba district, northwest Tanzania." **71**(1-3): 147-158.

Balaghi, R. (2000). Suivi de l'évolution des réserves en eau sous culture de blé en région semi-aride marocaine: calibration et utilisation du modèle "Soil". Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, Fondation Universitaire Luxembourgeoise. **Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA)**.

Balent, G. (1993). Cartographier des activités de pâturage sur un territoire hétérogène avec le logiciel CARPAT. In: Pratiques d'Elevage Extensif. identifier, modéliser, évaluer. E. Landais. France, INRA: 265-282.

Baoua, I. (2003). Caractérisation de la distribution spatiale de la végétation herbacée paturée dans les terroirs du Fakara. Centre régional d'enseignement spécialisé en agriculture (CRESA). Niamey, Université Abdou Moumouni. **DESA**.

Bassett, T. et M. Turner (2007). "Sudden Shift or Migratory Drift? FulBe Herd Movements to the Sudano-Guinean Region of West Africa." *Human Ecology* **35**(1): 33-49.

Bationo, A., J. Kihara, B. Vanlauwe, B. Waswa et J. Kimetu (2007). "Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems." *Agricultural Systems* **94**(1): 13-25.

Bationo, A., F. Lombo et S. Koala (1998). "Research on nutrient flows and balances in west Africa: state-of-the-art." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **71**(1-3): 19-35.

BCR. (2001). "Site du Recensement général de la population 2001 du Niger." Année d'accès, 2009, page web: http://www.stat-niger.org/bcrsite/donneglobal/tabc2_donglo.pdf.

Belcher, K. W., M. M. Boehmb et M. E. Fulton (2004). "Agroecosystem sustainability: a system simulation model approach." *Agricultural Systems* **79**: 225-241.

Bellefontaine, R., A. Gaston et Y. Petrucci, Eds. (1997). Aménagement des forêts naturelles des zones tropicales sèches. Cahier FAO: Conservation. Rome, FAO.

Belli, P., J. Turini, A. Harouna, I. A. Garba, E. Pistocchini et M. Zecchini (2008). "Critères de sélection des bovins laitiers par les éleveurs autour de Niamey au Niger." *Revue Élevage Médecine vétérinaire tropicale* **61**(1): 51-56.

Benoit, M. (1979). Le chemin des Peuls du Boobola : contribution à l'écologie du pastoralisme en Afrique des savanes. PARIS.

Bernus, E. (1974). "L'évolution récente des relations entre éleveurs et agriculteurs en Afrique tropicale." *Cahiers ORSTOM, série des sciences Humaines* **XI**(2): 137-143.

Bernus, E. (1975). "Pasteurs face à la sécheresse : rebondir ou disparaître ?" *Revue de géographie de Lyon* **70**(3-4): 255-259.

Bernus, E. (1984a). "Attitude des populations." *Bulletin de la société Languedocienne de Géographie* **18**(3-4).

Bernus, E. (1984b). "les causes de la désertification: les thèses en présence." *Bulletin de la société Languedocienne de Géographie* **107**(3-4): 159-165.

Bicheron, P., M. Huc et C. Henry (2008). GLOBCOVER : products description manual. E. G. P. ESA: 19.

Bielders, C. L., J.-L. Rajot et M. Amadou (2002). "Transport of soil and nutrients by wind in bush fallow land and traditionally managed cultivated fields in the Sahel." *Geoderma* **109**(1-2): 19-39.

Bielders, C. L., J. L. Rajot et K. Michels (2004). "L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien : influence des pratiques culturelles actuelles et méthodes de lutte." *Sécheresse* **15**(1): 19-32.

Bielders, C. L., A. Vrieling, J. L. Rajot et E. Skidmore (2001). "On-farm evaluation of field-scale soil losses by wind erosion under." In: *Soil Research for the 21ste Century, Hawaii 2001.* - [S.l.] : [s.n.]: 494.

Bilgo, A., V. Hien, S. Georges, M. Dominique, C. Jean-Luc, J. Fournier et P. Zaonero (2004). Matière organique et éléments minéraux déplacés par l'érosion hydrique sur des parcelles cultivées, en jachère, ou mixtes en savane soudanienne (Burkina Faso). In: *Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone : actes 1. Erosion du carbone = Land use, erosion and carbon sequestration.* R. Eric, D. N. Georges, P. Christian, G. F. et B. G. Montpellier (FRA): 208-222.

Binger, L. G. (1892). *Du Niger au golfe de Guinée par le pays de Kong et le Mossi (1887-1889) - Tome premier.* Paris, Librairie Hachette et Cie - Diffusion électronique - Gallica Bibliothèque numérique - Bibliothèque nationale de France - www.bnf.fr.

Blanc-Pamard, C. et L. Cambrezy, Eds. (1995). *Terre, terroir, territoire, les tensions foncières. Dynamique des systèmes agraires.* PARIS, ORSTOM.

Bode, S. (2004). Pratique pastorale et biodiversité des parcours dans le canton de Dantchandou(Fakara). CRESA. Niamey, Université Abdou Moumouni. **DESS:** 59.

Bodé, S. (2004). Pratiques pastorales et biodiversité des parcours dans le canton de Dantchandou (Fakara). Centre régional d'enseignement spécialisé en agriculture (CRESA). Niamey, Université Abdou Moumouni. **D.E.S.S:** 59.

Bonfiglioli, A. (1990). "Pastoralisme, agro-pastoralisme et retour :itinéraires sahéliens." *Cahier des Sciences humaines* **26**(1-2): 255-266.

Bosc, P. M. (1992). "Culture attelée et environnement: réflexions à partir d'expériences uest-africaines." *Afrique Contemporaine* **161**.

Boserup, E. (1965). *The conditions of agricultural growth : The Economics of Agrarian Change under Population Pressure.* Chicago : Aldine, George Allen and Unwin Ltd.

Bosma, R. H., M. Bos, S. Kante, D. Kebe et W. Quak (1999). "The promising impact of ley introduction and herd expansion on soil organic matter content in southern Mali." Agricultural Systems **62**(1): 1-15.

Boudet, G. (1961). "Problèmes de l'association agriculture-élevage en zone soudanienne : Résultats expérimentaux obtenus au Centre de recherches zootechniques de Sotuba-Bamako (République du Mali)." Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire Tropicale **14**(1): 78-85.

Boudet, G. (1975a). Inventaire et cartographie des pâturages en Afrique de l'Ouest. In:(Eds),Inventaire et Cartographie des pâturages tropicaux africains, Mali,3-8mars 1975, CIPEA ILCA, 57-77.

Boudet, G. (1975b). Problèmes posés par l'estimation de la capacité de charge d'un "paturage naturel" tropical. In:(Eds),Inventaire et Cartographie des pâturages tropicaux africains, Mali,3-8mars 1975, CIPEA ILCA, 265-267.

Boudet, G., Ed. (1978). Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. série Manuels et précis d'élevage. Maisons-Alfort, Ministère de la Coopération.

Boudet, G. (1979). "Quelques observations sur les fluctuations du couvert végétal sahélien au Gourma malien et leurs conséquences pour une stratégie de gestion sylvo-pastorale." Revue Bois et Forêts des tropiques(184): 31-44.

Boudet, G. et F. Baeyens (1963). "Une méthode d'étude et de cartographie des pâturages tropicaux." Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire Tropicale **16**(2): 78-85.

Boudet, G., M. Carriere, P. Christy, H. Guerin, C. Le Jan, A. W. O. Cheikh, S. Prom Tep et D. Reiss (1987). Paturages et élevage au sud de la Mauritanie (Kaedi): étude intégrée sur les paturages leur conservation et leur restauration le cheptel et les éleveurs. Nouakchott, Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux: 282.

Bourzat, D. (1989). Les petits ruminants dans les systèmes de production des zones aride et semi-aride de Somalie et du Burkina Faso. Créteil, Université de Paris-Val-de-Marne. **Thèse de doctorat : Sciences.**: 331.

Boutrais, J. (2007). "Crises écologiques et mobilités pastorales au Sahel : les Peuls du Dallol Bossou (Niger)." Sécheresse **18**(1): 5-12.

Breman, H. (1993). Modélisation et simulation dans l'élaboration des systèmes de production animale durables. Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa, Addis Abeba, Ethiopia,.

Breman, H. et A. M. Cissé (1977). "Dynamics of sahelian pastures in relation to drought and grazing." *Oecologia* **28**(4): 301-315.

Breman, H. et N. de Ridder, Eds. (1993). Manuel sur les pâturages des pays sahéliens. Editions KARTHALA, ACCT, CABO-DLO & CTA (1993) 485 pp.

Breman, H. et C. T. de Wit (1983). "Rangeland Productivity and Exploitation in the Sahel." *Science* **221**(4618): 1341-1347.

Breman, H., B. Fofana et A. Mando (2008). The lesson of Drente's 'Essen': Soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa and Management strategies for soil replenishment. In: Land use and soil ressources. A. K. Braimoh et P. L. G. Vlek, Springer.

Breman, H., J. J. R. Groot et H. van Keulen (2001). "Resource limitations in Sahelian agriculture." *Global Environmental Change* **11**(1): 59-68.

Breman, H., J.-J. Kessler, F. Dekker, F. Ohler et P. Uithol (1991a). Le rôle des ligneux dans les agro-écosystèmes des régions semi-arides (avec un accent particulier sur les pays sahéliens). AB-DLO. Wageningen, Institut de recherche en agrobiologie et fertilité des sols.

Breman, H., J. J. Kessler, F. van der Laan, T. Rammelt et H. Snijders (1991b). "Carte de paysages semi-détaillée (Mali), échelle 1:100.000." Annexe: Manuel sur les pâturages des pays sahéliens, H. Breman, N. de Ridder.

Brian, S. C. et R. N. Barry (2003). "A gentle introduction to quantile regression for ecologists." *Frontiers in Ecology and the Environment* **1**(8): 412-420.

Brink, A. B. et H. D. Eva (2009). "Monitoring 25 years of land cover change dynamics in Africa: A sample based remote sensing approach." *Applied Geography* **29**(4): 501-512.

Brouwer, J. et J. M. Powell (1998). "Increasing nutrient use efficiency in West-African agriculture: the impact of micro-topography on nutrient leaching from cattle and sheep manure." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **71**(1-3): 229-239.

Buerkert, A. et P. Hiernaux (1998). "Nutrients in the west african sudano-sahelian zone: losses, transfers and role of external inputs." *Zeitschrift fur Pflanzenernährung und Bodenkunde* **161**: 365-383.

Buerkert, A., F. Mahler et H. Marschner (1996). "Soil Productivity management and plant growth in the Sahel: Potential of an aerial monitoring technique." *Plant and soil* **180**: 29-38.

Burnsilver, S., R. Boone et K. Galvin (2004). Linking Pastoralists to a Heterogeneous Landscape. In: People and the Environment: 173-199.

Busqué, J. (2002). Diagnostic of Low Input farming System in West Niger. ILRI restricted document. Niamey, Niger.

Buzas, K. (1999). "Nutrient Balances of the Danube Basin: The Role of Uncertainties." Water Science and Technology **40**(10): 51-58.

Cappelaere, B., L. Descroix, T. Lebel, N. Boulain, D. Ramier, J. P. Laurent, G. Favreau, S. Boubkraoui, M. Boucher, I. Bouzou Moussa, V. Chaffard, P. Hiernaux, H. B. A. Issoufou, E. Le Breton, I. Mamadou, Y. Nazoumou, M. Oi, C. Ottlé et G. Quantin (2009). "The AMMA-CATCH experiment in the cultivated Sahelian area of south-west Niger - Investigating water cycle response to a fluctuating climate and changing environment." Journal of Hydrology **375**(1-2): 34-51.

Casenave, A. et C. Valentin (1989). Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Paris.

CILSS (2000). L'information au cœur du dispositif de la sécurité alimentaire sahélienne, bilan et perspectives des dispositifs nationaux et régionaux. CILSS. Ouagadougou, CILSS.

Cisse, A. M. (1986). Dynamique de la strate herbacée des pâturages de la zone sud-sahélienne, Wageningen: 209.

Cissé, M. I. (1980). The browse production of some trees of the Sahel: Relationships between maximum foliage biomass and various physical parameters**. In: H. N. L. Houérou (Eds), the International Symposium on Browse in Africa, Addis Ababa, April 8-12, 1980, International Livestock Center for Africa, ILCA, 491.

Clanet, J.-C. (1987). Études des transhumances internationales des pays de la Communauté économique du bétail et de la viande. FAO/Communauté économique de l'Afrique de l'Ouest (CEAO). Ouagadougou: 87.

Clanet, J.-C. et A. Ogilvie (2009). "Farmer and herder conflicts and water governance in a semi-arid region of Africa." Water International **34**(1): 30 - 46.

Cobo, J. G., G. Dercon et G. Cadisch (2010). "Nutrient balances in African land use systems across different spatial scales: A review of approaches, challenges and progress." Agriculture, Ecosystems & Environment **136**(1-2): 1-15.

Cohen, M. et C. Mering (2001). Geographic information system and spatial effect. In: Cybergeo (Eds), Dossiers, 12th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography, St-Valery-en-Caux, France, September 7-11, 2001, mis en ligne le 25 mai 2004, European Journal of Geography.

Colin (Lin), C. (2005). An Introduction to Quantile Regression and the QUANTREG Procedure. In:(Eds), SUGI 30, SAS Institute Inc.

Colin De verdière, P. (1995). Etude comparée de trois systèmes agropastoraux dans la région de Filingué - Niger : les conséquences de la sédentarisation de l'élevage pastoral au Sahel. Institute fur Tierproduktion in den Tropen und Subtropen. Stuttgart, Universität Hohenheim, Germany. **Ph D:** 223.

Collinet, J., C. Valentin, J. Asseline, M. Hoeppfner, P. Harang et Y. Pepin (1980). Ruissellement, infiltration et érosion en zones sahéliennes et subdésertiques. Bassin versant de Galmi et cuvette d'Agadez. Abidjan, ORSTOM: 38.

Coppolillo, P. (2000). "The Landscape Ecology of Pastoral Herding: Spatial Analysis of Land Use and Livestock Production in East Africa." *Human Ecology* **28**(4): 527-560.

Coq, C. (2005). Cartographie détaillée de l'occupation et de l'utilisation du sol à partir de données satellitaires à très haute résolution en région sahélienne. Faculté d'ingénierie biologique agronomique et environnementale. Louvain-la-Neuve, Université Catholique de Louvain. **bio-ingénieur:** 99.

Cottam, G. et J. T. Curtis (1956). "The Use of Distance Measures in Phytosociological Sampling." *Ecology* **37**(3): 451-460.

Cox, D. R. et E. J. Snell (1989). *The Analysis of Binary Data*, Second edition. Londonc, Chapman & Hall.

Crépeau, C., T. Bennouna, P. Bicheron, P. Cayrol, B. Djaby, Y. Legros, N. Ganzin, S. Diop, A. Ka, A. Diouf et A. Samba (2003). "Suivi de la végétation en zone sèche par des produits d'information dérivés de l'imagerie spatiale." *Science et changements planétaires / Sécheresse* **14**(1): 56-57.

CSAO-OCDE et CEDEAO (2008). Élevage et marché régional au Sahel et en Afrique de l'Ouest : potentialités et défis. Transformation du monde rural et développement durable en Afrique de l'Ouest. CSAO. PARIS.

CTA et CIRAD-EMVT (1991). *Atlas "Elevage et potentialités pastorales sahéliennes. Synthèses cartographiques: Tchad, Niger, Burkina Faso, Mali, Sénégal, Mauritanie"*. Wageningen, CTA.

d'Herbes, J. M. et C. Valentin (1997). "Land surface conditions of the Niamey region: ecological and hydrological implications." *Journal of Hydrology* **188-189**: 18-42.

Daget, P. (1996). "Mesurer le recouvrement des ligneux dans les végétations ouvertes des paturages." *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux* **49**(1): 76-78.

Daget, P. et Y. Djellouli (2002). "Une approche écoclimatique des potentialités pastorales en régions sahélienne." *Science et changements planétaires / Sécheresse* **13**(2): 73-79.

Dagnelie, P. (2007a). Statistique théorique et appliquée Tome 2. Inférence statistique à une et à deux dimensions. Paris et Bruxelles, Editions de Boeck Université.

Dagnelie, P. (2007b). Statistique théorique et appliquée Tome I. Statistique descriptive et bases de l'inférence statistique. Paris et Bruxelles, Editions de Boeck Université.

De Bruijn, M. et H. Van Dijk (2003). "Changing population mobility in West Africa: Fulbe pastoralists in Central and South Mali." *African Affairs* **102**(407): 285-307.

de Grandi, J. C., M. Breman et J. J. Kessler (1996). "L'évolution des systèmes de production agropastorale." In: Collection FAO: Gestion des exploitations agricoles, FAO, Rome 11.

De Jager, A., I. Kariuku, F. M. Matiri, M. Odendo et J. M. Wanyama (1998). "Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON): IV. Linking nutrient balances and economic performance in three districts in Kenya." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **71**(1-3): 81-92.

De Jager, A., S. M. Nandwa et P. F. Okoth (1998a). "Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON): I. Concepts and methodologies." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **71**(1-3): 37-48.

De Jager, A., S. M. Nandwa et P. F. Okoth (1998b). "Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON): I. Concepts and methodologies." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **71**(1-3): 37-48.

De Leeuw, P. N., L. Reynolds et B. Rey (1995). Nutrients transferts from livestock in West African agricultural systems. In: J. M. Powell, Fernandez-Rivera S., T. O. Williams et Renard C. (Eds), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa*. International Livestock Centre for Africa, Addis Ababa, Ethiopia, International Livestock Centre for Africa, 371-391.

de Rouw, A. (2004). "Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel." Agricultural Systems **81**(1): 73-93.

DeMaris, A. (1995). "A Tutorial in Logistic Regression." Journal of Marriage and Family **57**(4): 956-968.

Diarra, L., P. Hiernaux et P. N. de Leeuw (1993). Foraging behaviour of cattle grazing semi-arid rangelands in the Sahel of Mali. In: J. M. Powell, S. Fernandez-Riviera, T. O. Williams et C. Renard (Eds), Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of sub-Saharan Africa, Addis Ababa, Ethiopia, 22–26 November 1993.

Djaby, B. (1983). Mise en place d'un centre d'étude des performances de la poule locale. Institut Supérieur Polytechnique, Université de Ouagadougou. **Ingénieur des Techniques du Développement rural:** 78.

Djaby, B. (2000). Utilisation de la télédétection pour le suivi des parcours en zone agropastorale sahélienne :Etude comparative de deux indices de végétation, le TSAVI et le NDVI. Arlon, Fondation Universitaire Luxembourgeoise (FUL). **DEA en Sciences de l'Environnement:** 150.

Drees, L. R., A. Manu et L. P. Wilding (1993). "Characteristics of aeolian dusts in Niger, West Africa." Geoderma **59**(1-4): 213-233.

Efron, B. (2003). "Second Thoughts on the Bootstrap." Statistical Science **18**(2): 135-140.

Eldin, M. et P. Milleville, Eds. (1989). Le risque en agriculture. Collection à travers champs,. Paris.

Elias, E., S. Morse et D. G. R. Belshaw (1998). "Nitrogen and phosphorus balances of Kindo Koisha farms in southern Ethiopia." Agriculture, Ecosystems & Environment **71**(1-3): 93-113.

ESRI. (2008). "ARCGIS 9.2 Desktop Help." Gis by ESRI Année d'accès, 2008, page web: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/>.

Færge, J. et J. Magid (2004). "Evaluating NUTMON nutrient balancing in Sub-Saharan Africa." Nutrient Cycling in Agroecosystems **69**(2): 101-110.

FAO-SMIAR (2007). Rapport No 3 - 13 septembre 2007: Sahel : Situation météorologique et état des cultures. FAO.

FAO (1976). "A framework for land evaluation." FAO Soils Bulletin **32**.

FAO (1991). The digitized soil map of the world notes: Volume 1 - Africa. Rom.

FAO (2000a). Land resource potential and constraints at regional and country levels. World Soil Resources Reports. FAO. ROME, FAO. **90**: 122.

FAO (2000b). livestock distribution, production and diseases : towards a global livestock atlas. Consultants'report. W. Wint, J. Slingenbergh et D. Rogers. Rome.

FAO, Ed. (2004). Scaling soil nutrients balances: Enabling mesolevel applications for African realities. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 15. Rome, FAO.

FAO (2007). Gridded livestock of the world 2007. G. R. W. Wint et T. P. Robinson. ROME: 131.

FAO. (2008). "FAOSTAT." Année d'accès, 2000-2008, page web: <http://faostat.fao.org/>.

FAO. (2010). "FAOSTAT." Année d'accès, 2010, page web: <http://faostat.fao.org/>.

FAO/ISRIC/ISSS (1998). World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report. Rome, FAO. **84**.

FAO/ISRIC/ISSS (2006). World Reference Base for Soil Resources 2006. World Soil Resources Report. Rome, FAO. **103**.

FAO/WHO (1996). World Food Summit - Rome Declaration on World Food Security and WFS Plan of Action.

Farinet, J.-L. et S. Niang (2004). Le recyclage des déchets et effluents dans l'agriculture urbaine. In: Développement durable de l'agriculture urbaine en afrique francophone : Enjeux, concepts et méthodes. O. B. Smith, P. Moustier, L. J. A. Mougeot et A. Fall, CIRAD: 176.

Faugère, O., A. C. Dockes, C. Perrot et B. Faugère (1990). "L'élevage traditionnel des petits ruminants au Sénégal. I. Pratiques de conduite et d'exploitation des animaux chez les éleveurs de la région de Kolda." Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux **43**(2): 249-259.

Feil, P. R., J. P. A. Lamers et L. Herrmann (1995). "Knowledge transfer in the field : Solving crop residue problems in Niger." The journal of technology transfer **20**(1): 31-41.

- Fernández-Rivera, S., P. Hiernaux, T. O. Williams, M. D. Turner, E. Schlecht, A. Salla, A. A. Ayantunde et M. Sangaré** (2005). Nutritional constraints to grazing ruminants in the millet-cowpea-livestock farming system of the Sahel. In: Coping with feed scarcity in smallholder livestock systems in developing countries. A. A. Ayantunde, S. Fernández-Rivera et G. McCrabb. Nairobi, Kenya, International Livestock Research Institute: 307.
- Fernandez-Rivera, S., T. O. Williams, P. Hiernaux et J. M. Powell** (1995a). Faecal excretion by ruminants and manure availability for crop production in semi-arid West Africa. In: J. M. Powell, S. Fernandez- Rivera, T. O. Williams et C. Renard (Eds), Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa, Addis Ababa-Ethiopia, 22–26.11.93, 149-70.
- Fernandez-Rivera, S., T. O. Williams, P. Hiernaux et J. M. Powell** (1995b). Livestock, feed, and manure availability for crop production in semi-arid west Africa. In: J. M. Powell, S. Fernandez- Rivera, T. O. Williams et C. Renard (Eds), Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa, Addis Ababa-Ethiopia, 22–26.11.93, 149-70.
- Fernández, R., E. R. M. Archer, A. J. Ash, H. Dowlatabadi, P. H. Y. Hiernaux, J. F. Reynolds, C. H. Vogel, B. H. Walker et T. J. Wiegand, Wyatt** (2002). Degradation and recovery in socio-ecological systems: A view from the household/farm level. In: J. F. Reynolds et M. S. Smith (Eds), Do Humans Create Deserts? The Ecological, Meteorological, and Human Dimensions of Global Desertification, Dahlem University Press, Berlin, 297-323.
- Fléchet, G.** (2008). Le souffle de l'Harmattan amplifie les épidémies de méningite. Actualité scientifique. France, IRD. **308**.
- Florax, R. J. G. M., R. L. Voortman et J. Brouwer** (2002). "Spatial dimensions of precision agriculture: a spatial econometric analysis of millet yield on Sahelian coversands." Agricultural Economics **27**(3): 425-443.
- Floret, C. et R. Pontanier** (1997). Jachère et maintien de la fertilité. Amélioration et gestion de la jachère en Afrique de l'Ouest, Projet 7 ACP RPR 269, Bamako, ORSTOM.
- Floret, C. et R. Pontanier** (2001). la jachère en Afrique tropicale: De la jachère naturelle à la jachère améliorée; le point des connaissances, John Libbey Eurotext.
- Floret, C., P. Roger et G. Serpantié** (1993). La jachère en Afrique Tropicale. Paris, UNESCO.
- Folmer, E. C. R., P. M. H. Geurts et J. R. Francisco** (1998). "Assessment of soil fertility depletion in Mozambique." Agriculture, Ecosystems & Environment **71**(1-3): 159-167.

Fotsing, E., J.-P. Cheylan , W. T. Degroot et P. H. Verburg (2003). Un dispositif régional et multi-échelle d'analyse des dynamiques agraires. In:(Eds),6èmes Rencontres de Théo Quant,Février 2003.

France, J. et J. H. M. Thornley (1984). Mathematical models in agriculture. London, Butterworths.

Franklin, J. et P. H. Y. Hiernaux (1991). "Estimating foliage and woody biomass in Sahelian and Sudanian woodlands using a remote sensing model." International Journal of Remote Sensing **12**(6): 1387 - 1404.

Franzluebbers, K., A. S. R. Juo et A. Manu (1994). "Decomposition of cowpea and millet amendments to a sandy Alfisol in Niger." Plant and Soil **167**(2): 255-265.

Freschet, G. T., D. Masse, E. Hien, S. Sall et J. L. Chotte (2008). "Long-term changes in organic matter and microbial properties resulting from manuring practices in an arid cultivated soil in Burkina Faso." Agriculture, Ecosystems & Environment **123**(1-3): 175-184.

Gallais, J. (1972). "Les sociétés pastorales ouest-africaines face au développement." Cahiers d'études africaines **12**(47): 353-368.

Gandah, M., J. Bouma, J. Brouwer, P. Hiernaux et N. Van Duivenbooden (2003). "Strategies to optimize allocation of limited nutrients to sandy soils of the Sahel: a case study from Niger, west Africa." Agriculture, Ecosystems & Environment **94**(3): 311-319.

Garavini, M. (1997). La définition du concept de risque dans le cadre d'un système d'alerte précoce agrométéorologique. Niamey, OMM, AGRHYMET,CILSS, DGCD Italie.

Garba, I. (2002). Inventaire des ligneux par télédétection dans le terroir de Tigo Tegui. Centre régional d'enseignement spécialisé en agriculture (CRESA). Niamey, Université Abdou Moumouni. **DESA**.

Geiger, S. C. et A. Manu (1993). "Soil surface characteristics and variability in the growth of millet in the plateau and valley region of Western Niger." Agriculture, Ecosystems & Environment **45**(3-4): 203-211.

Gérard, B. (2000). Attribute coding for the land use change in grid format. Niamey, Niger, ICRISAT: 2.

Gérard, B., D. Fatondji, C. Dandois, C. Manyame et C. Bielders (2007). Mineral versus organic fertilization conflict or synergism ? In: S. D. Neve, J. Salomez, A. V. D. Bossche, S. Haneklaus, O. V. Cleemput, G. Hofman et E. Schnug (Eds),16th International Symposium of the International Scientific Centre of Fertilizers (CIEC), Ghent, Belgium, CIEC.

Gerard, B., P. Hiernaux, B. Muelig-Versen et A. Buekert (2001). "Destructive and non-destructive measurements of residual crop residue and phosphorus effects on growth and composition of herbaceous fallow species in the Sahel." *Plant and Soil* **228**: 265-273.

Gerard, B., P. S. Traore, A. Laouali, B. Ndiaye et D. Fatondji (2007). Documentation of ILRI/JIRCAS/ICRISAT Fakara data sets: JIRCAS Commissioned Research. ICRISAT. Niger, JIRCAS, ICRISAT, ILRI.

Ginot, V., C. Le Page et S. Souissi (2002). "A multi-agents architecture to enhance end-user individual-based modelling." *Ecological Modelling* **157**(1): 23-41.

Goutorbe, J. P., T. Lebel, A. Tinga, P. Bessemoulin, J. Brouwer et al. (1994). "HAPEX-Sahel: a large-scale study of land-atmosphere interactions in the." *Ann. Geophysicae* **12** (1994) 53-64.

Grimm, V., U. Berger, F. Bastiansen, S. Eliassen, V. Ginot, J. Giske, J. Goss-Custard, T. Grand, S. K. Heinz, G. Huse, A. Huth, J. U. Jepsen, C. Jørgensen, W. M. Mooij, B. Müller, G. Pe'er, C. Piou, S. F. Railsback, A. M. Robbins, M. M. Robbins, E. Rossmanith, N. Rüger, E. Strand, S. Souissi, R. A. Stillman, R. Vabø, U. Visser et D. L. DeAngelis (2006). "A standard protocol for describing individual-based and agent-based models." *Ecological Modelling* **198**(1-2): 115-126.

Guengant, J. P. et M. Banoin (2003). Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers: Le cas du Niger. M. L. Francis Gendreau.

Guigou, J., F. Giraudy, C. O. T. Doucouré, S. Healy, K. Traoré et O. Guindo (2005). "L'âge des champs: un indicateur du passage de la culture itinérante à la culture permanente dans le bassin cotonnier du Mali." *Cahiers Agricultures* **13**: 467-472.

Guillaume, K., L. Abbadie, A. Mariotti et H. Nacro (1999). "Soil organic matter dynamics in tiger bush (Niamey, Niger). Preliminary results." *Acta Oecologica* **20**(3): 185-195.

Guinko, S. (1997). Rôle des Acacias dans le développement rural au Burkina Faso et au Niger, Afrique de l'Ouest. In: Rôle des Acacias au Burkina Faso et au Niger. FAO.

Hafner, H., B. J. Ndunguru, A. Bationo et H. Marschner (1992). "Effect of nitrogen, phosphorus and molybdenum application on growth and symbiotic N₂-fixation of groundnut in an acid sandy soil in Niger." *Fertilizer Research* **31**(1): 69-77.

Hanan, N. P., S. D. Prince et P. H. Y. Hiernaux (1991). "Spectral modelling of multicomponent landscapes in the Sahel." *International Journal of Remote Sensing* **12**(6): 1243 - 4258.

Harris, F. M. A. (1998). "Farm-level assessment of the nutrient balance in northern Nigeria." **71**(1-3): 201-214.

Henao, J. et C. Baanante (1999). Nutrient depletion in the Agricultural soils of Africa. In: 2020 Vision brief 62. IFPRI. Washington, DC, IFPRI.

Herrero, M., E. González-Estrada, P. K. Thornton, C. Quirós, M. M. Waithaka, R. Ruiz et G. Hoogenboom (2007). "IMPACT: Generic household-level databases and diagnostics tools for integrated crop-livestock systems analysis." Agricultural Systems **92**(1-3): 240-265.

Herrero, M., P. K. Thornton, A. M. Notenbaert, S. Wood, S. Msangi, H. A. Freeman, D. Bossio, J. Dixon, M. Peters, J. van de Steeg, J. Lynam, P. P. Rao, S. Macmillan, B. Gerard, J. McDermott, C. Sere et M. Rosegrant (2010). "Smart Investments in Sustainable Food Production: Revisiting Mixed Crop-Livestock Systems." Science **327**(5967): 822-825.

Herrmann, L., K. E. Bleich et K. Stahr (1993). "Influence des dépôts éoliens sur la restauration de la fertilité des sols sous végétation en friche au Niger, Afrique de l'Ouest." Bulletin du réseau érosion, ORSTOM/CNRS **14**.

Herron, A. H. (2006). Of low-cost sanitation: an overview of available methods. M. Parker, A. Williams et C. Youngblood. Washington, DC, Woodrow Wilson International Center for Scholars - Environmental change and security program: 98.

Hiernaux, P., Ed. (1980). L'inventaire du potentiel fourrager des arbres et arbustes d'une région du Sahel malien. Méthodes et premiers résultats. Les fourrages ligneux en Afrique: état actuel des connaissances. Addis Abeba, CIPEA.

Hiernaux, P. (1983). Les végétations et les ressources fourragères dans les systèmes pastoraux. In:(Eds),*Pastoral systems research in sub-Saharan Africa*, ADDIS ABABA, ETHIOPIA,August 2003, IDRC, ILRI.

Hiernaux, P. (1984). Distribution des pluies et production herbacée au Sahel : une méthode empirique pour caractériser la distribution des précipitations journalières et ses effets sur la production herbacée. Premiers résultats dans le sahel malien. Bamako, Mali, Centre International Pour l'Elevage en Afrique: 48.

Hiernaux, P. (1995). Spatial Heterogeneity in Sahelian Rangelands and Resilience to Drought and Grazing. 5th International Rangeland Congress, Salt Lake City, Utah.

Hiernaux, P. (1996). The soils in villages lands in western Niger, opportunities and constraints for rural development., ILRI: 23.

Hiernaux, P., A. Ayantude, P. De Leeuw, S. Fernandez-Rivera, M. Sangare et E. Schecht (1999). Foraging efficiency, stocking rates, grazing pressure and livestock weight changes in the Sahel. People and Rangelands Building the Future -VI International Rangeland Congress, Aitkenvale, Townsville, Queensland, Australia.

Hiernaux, P. et A. A. Ayantude (2004). The Fakara: a semi-arid agro-ecosystem under stress, Report of research activities, first phase (July 2002-June 2004) of the DMP-GEF programme. GEF/2711-02-4516. Niamey, International Livestock Research Institute (ILRI), ICRISAT: 95.

Hiernaux, P., A. Ayantunde, A. Kalilou, E. Mougin, B. Gérard, F. Baup, M. Grippa et B. Djaby (2009). "Trends in productivity of crops, fallow and rangelands in Southwest Niger: Impact of land use, management and variable rainfall." *Journal of Hydrology* **375**(1-2): 65-77.

Hiernaux, P., C. L. Bielders, C. Valentin, A. Bationo et S. Fernandez-Rivera (1999). "Effects of livestock grazing on physical and chemical properties of sandy soils in Sahelian rangelands." *Journal of Arid Environments* **41**(3): 231-245.

Hiernaux, P., L. Diarra et A. Maiga (1988). Evolution de la végétation sahélienne après la sécheresse : Bilan du suivi des sites du Gourma en 1987. Bamako, Mali, Centre International Pour l'Elevage en Afrique.

Hiernaux, P. et S. Fernandez-Rivera (1995). Grazing Effects of Goat-Sheeps Mixes on Vegetation Structure and Productivity of Old Fallow in the Sahel. 5th International Rangeland Congress, Salt Lake City, Utah.

Hiernaux, P., S. Fernandez-rivera, E. Schlecht, M. D. Turner et T. O. Williams (1997). Livestock-mediated nutrient transfers in Sahelian agro-ecosystems. Soil Fertility Management in West African Land Use Systems, Niamey, Niger, Margraf Verlag, Weikersheim, Germany.

Hiernaux, P., S. Fernandez-Rivera, E. Schlecht, M. D. Turner et T. O. Williams (1998). Livestock management options in response to cropland expansion in the Sahel. In:(Eds),International Conference on Food, Lands and Livelihoods, BSAS/KARI, Nairobi , BSAS, Edinburgh, UK,27-30 January 1998, 12-13.

Hiernaux, P. et B. Gerard (1999). "The influence of vegetation pattern on the productivity, diversity and stability of vegetation: The case of 'brousse tigree' in the Sahel." *Acta Oecologica* **20**(3): 147-158.

Hiernaux, P. et B. Héault (2003). Influence of grazing regime by cattle on the soil seed stock and germination pattern in the annual rangelands of the Sahel. In: N. Allsopp, A. R. Palmer, S. J. Milton, K. P. Kirkman, G. I. H. Kerley, C. R. Hurt et C. J. Brown (Eds),VIIth International Rangelands Congress, Durban, South Africa,26th July – 1st August 2003, Document Transformation Technologies.

Hiernaux, P. et H. N. Le Houerou (2006). "Les parcours du Sahel." Sécheresse **17**(1-2): 51-71.

Hiernaux, P. et E. Schlecht (2003). The scales issues in assessing matter fluxes and balance in/out agro-ecosystems. In:(Eds),Conference on International Agricultural Research for Development - Deutscher Tropentag 2003, Göttingen, October 8-10, 2003.

Hiernaux, P., M. Turner et S. Fernández-Rivera (2004). Influence of the farm type and the propriety status of the animals on the herd composition and reproductive performances of cattle, sheep and goats in western Niger. M. r. d. P. Hiernaux, ILRI.

Hiernaux, P. et M. D. Turner (1996). "The effect of clipping on growth and nutrient uptake of Sahelian annual rangelands." Journal of Applied Ecology **33**: 387-399.

Hiernaux, P. et M. D. Turner (2002). The influence of Farmer and Patoralist Management Practices on desertification Processes in the Sahel. Global Desertification: Do Humans Cause Deserts ?, Berlin, Dahlem University Press.

Hiernaux, P. H. Y., M. I. Cisse, L. Diarra et P. N. De Leeuw (1994). "Fluctuations saisonnières de la feuillaison des arbres et des buissons sahéliens. Conséquences pour la quantification des ressources fourragères." Revue Elev. Med. Vet. Pays Trop. **47**(1): 117-125.

Hiernaux, P. H. Y. et C. O. Justice (1986). "Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le Sahel Malien." International Journal of Remote Sensing **7**(11): 1515 - 1531.

Hoch, T., P. Pradel et J. Agabriel (2004). "Modélisation de la croissance de bovins : évolution des modèles et applications." INRA Prod. Anim. **17**(4): 303-314.

Hoogenboom, G. (2000). "Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications." Agricultural and Forest Meteorology **103**(1-2): 137-157.

Hosmer, D. W. et S. Lemeshow (2000). Applied Logistic Regression, 2nd Edition. New York, John Wiley & sons.

Hountondji, Y. C. H. (2008). Dynamique environnementale en zone sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest: Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal. Faculté des Sciences , Département des Sciences et Gestion de l'Environnement. Arlon, Université de Liège. **Docteur en Sciences:** 131.

Ickowick, A. (1995). Approche dynamique du bilan fourrager appliquée à des formations pastorales du Sahel tchadien. université de Paris XII. Paris: 471.

Ickowicz, A., J. C. Usengumuremyi, D. Bastien et D. C. N. (1997). Spatial Analysis of land use by cattle Herds in a village of the Sudanese Zone in Senegal. Application for grazing system improvement. In:(Eds),International Grassland Congress. 18, Winnipeg, Canada.,Juin 1997, 11.

Ikpe, F. N. et J. M. Powell (2002). "Nutrient cycling practices and changes in soil properties in the crop-livestock farming systems of western Niger Republic of West Africa." Nutrient Cycling in Agroecosystems **62**(1): 37-45.

INS. (2009). "Tableau des indicateurs de 2005 à 2008." Année d'accès, 2009, page web: <http://www.stat-niger.org/statistique/>.

Ipe, D. (1987). Performing the Friedman Test and the Associated Multiple Comparison Test Using PROC GLM. Twelfth Annual SAS Users Group International Conference (SUGI 1987).

Jarlan, L., E. Mougin, P. Mazzega, M. Schoenauer, Y. Tracol et P. Hiernaux (2005). "Using coarse remote sensing radar observations to control the trajectory of a simple Sahelian land surface model." Remote Sensing of Environment **94**(2): 269-285.

Justice, C. O. et P. H. Y. Hiernaux (1986). "Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR data: Niger 1983." International Journal of Remote Sensing **7**(11): 1475 - 1497.

Kante, S. (2001). Gestion de la fertilité des sols par classe d'exploitation au Mali - Sud. Departement of Plant Sciences Plant Production Systems Group. Wageningen, Wageningen University: 236.

Kanté, S., E. M. A. Smaling et H. van Keulen (2007). Nutrient balances for different farm types in Southern Mali. In: 557-566.

Keulen, H. v. et J. B. Schiere (2004). Crop-livestock systems: old wine in new bottles.

Kho, R. M., B. Yacouba, M. Yayé, B. Katkoré, A. Moussa, A. Iktam et A. Mayaki (2001). "Separating the effects of trees on crops: the case of Faidherbia albida and millet in Niger." Agroforestry Systems **52**: 219-238.

Kidane, N. F., J. W. Stuth et D. R. Tolleson (2008). "Predicting Diet Quality of Donkeys via Fecal-NIRS Calibrations." Rangeland Ecology & Management **61**(2): 232-239.

Kirmse, R. D. et B. E. Norton (1984). "The potential of Acacia albida for desertification control and increased productivity in Chad." Biological Conservation **29**(2): 121-141.

Koenker et R. Machado (1999). "Goodness of Fit and Related Inference Processes for Quantile Regression." *Journal of the American Statistical Association* **94**(448): 1296-1310.

Koenker, R. (2006). "Quantile Regression in R: A vignette." Année d'accès, 2008, page web: <http://www.econ.uiuc.edu/~roger/research/rq/vig.pdf>.

Koenker, R. et G. Bassett, Jr. (1978). "Regression Quantiles." *Econometrica* **46**(1): 33-50.

Koenker, R. et K. F. Hallock (2001). "Quantile Regression." *Journal of Economic Perspectives* **15**(4): 143-156.

Konaté, M. (2002). Intégration de données sur le couvert ligneux dans un système d'information géographique : cas du Fakara (Niger). Agrhytem. Niamey, Agrhytem. **Ingénieur agrométéorologie**.

Kondombo, S. R. (2005). Improvement of village chicken production in a mixed (chicken-ram) farming system in Burkina Faso. Wageningen Institute of Animal Sciences - Animal Nutrition Group. Wageningen, The Netherlands, Wageningen Institute of Animal Sciences. **PhD Thesis:** 208.

Krogh, L. (1997). "Field and village nutrient balances in millet cultivation in northern Burkina Faso: a village case study." *Journal of Arid Environments* **35**(1): 147-159.

La Rovere, R. (2001). Livestock roles and agro-environmental sustainability of Sahelian Niger mixed crop-livestock systems under intensification. Faculty of Agricultural Sciences,. Italy, Bologna University. **Phd:** 180.

La Rovere, R., P. Hiernaux, H. Schiere et H. van Keulen (2002). Co-evolutionary scenarios of livestock impacts on the sustainability of sahelian LEIA systems. International Farming Systems Association, Florence.

La Rovere, R., H. Keulen van, P. Hiernaux, J. Szonyi et R. A. Schipper (2008). "Intensification scenarios in south-western Niger: Implications for revisiting fertilizer policy." *Food Policy* **33**(2): 156-164.

Lamers, J. et E. Frank (1995). The role of weeds in Niger. ILEIA Newsletter. **11**: 9.

Lamers, J. P. A. et F. Emhardt (1995). The role of weeds in Niger. ILEIA newsletter for low external input and sustainable agriculture. **11**: 9.

Landais, E. et G. Balent (2001). Introduction à l'étude des systèmes d'élevage extensif. In: Pratiques d'élevage extensif : Identifier, modéliser, évaluer (seconde édition). INRA. France, Editions Quae: 389.

Landais, E. et P. Lhoste (1993). "Systèmes d'élevage et transferts de fertilité dans la zone des savanes africaines." Cahiers Agricultures **2**: 9-25.

Landais, E., P. Lhoste et P. Milleville (1987). "Points de vue sur la zootechnie et les systèmes d'élevage tropicaux." Cahier des Sciences humaines **23**(3-4): 421-437.

Lars Hein, N. D. R. (2006). "Desertification in the Sahel: a reinterpretation." Global Change Biology **12**(5): 751-758.

Le Gal, O. et D. Planchenault, Eds. (1993). Utilisation des races caprines exotiques dans les zones chaudes: contraintes et intérêts, Département d'Elevage et de Médecine Vétérinaire (EMVT).

Le Houerou, H. N. (1977). Biological Recovery Versus Desertization, Clark University. **53**: 413-420.

Le Houerou, H. N., Ed. (1980). Browse in Africa, International Livestock Center for Africa, ILCA.

Le Houerou, H. N. (1992). Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride. In: L'aridité, une contrainte au développement. A. O. Editions: 197-220.

Le Houérou, H. N. (2009). Bioclimatology and Biogeography of Africa. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.

LEAD. (2002). "Boite à outils Elevage." Année d'accès, 2003, page web: <http://lead.virtualcenter.org/es/dec/toolbox/FAO/Main1/>.

Lebel, T. et A. Ali (2009). "Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007)." Journal of Hydrology **375**(1-2): 52-64.

Lebel, T. et L. Le Barbe (1997). "Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 2. Point and areal estimation at the event and seasonal scales." Journal of Hydrology **188-189**: 97-122.

Lebel, T., J. D. Taupin et N. D'Amato (1997). "Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 1. General rainfall conditions and climatology." Journal of Hydrology **188-189**: 74-96.

Lecorguillé, T. (2000). Intégration des données sur les ligneux dans un système d'information environnementale sur la région de Fakara au Niger. Arlon, Fondation Universitaire Luxembourgeoise. **DESS**.

Lemmens, R. L. G. (1999). Towards an integrated multi-scale decision support system: the linking of bio-economic models and GIS at village and district level. Niamey, Niger, ICRISAT Sahelian Centre.

Leng, R. A., Ed. (1997). Tree foliage in ruminant nutrition. FAO ANIMAL PRODUCTION AND HEALTH PAPER Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Lericollais, A. (1989). Risques anciens, risques nouveaux en agriculture paysanne dans la vallée du Sénégal. In: le risque en agriculture, coll. A travers Champs. ORSTOM. Paris: 419-436.

Lesnoff, M. (1999). "Dynamics of a sheep population in a Sahelian area (Ndiagne district in Senegal): a periodic matrix model." Agricultural Systems **61**: 207-221.

Lesnoff, M. (2008). "Evaluation of 12-month interval methods for estimating animal-times at risk in a traditional African livestock farming system." Preventive Veterinary Medicine **85**: 9-16.

Lesnoff, M., R. Lancelot et C. H. Moulin (2007). Calcul des taux démographiques dans les cheptels de ruminants domestiques tropicaux. Approche en temps discret., Editions Quae.<http://www.quae.com/numerique>

Lesschen, J., J. Stoorvogel, E. Smaling, G. Heuvelink et A. Veldkamp (2007). "A spatially explicit methodology to quantify soil nutrient balances and their uncertainties at the national level." Nutrient Cycling in Agroecosystems **78**(2): 111-131.

Lhoste, P. (1987). L'association Agriculture - Elevage. Maisons Alfort, France, CIRAD.

Lhoste, P. (2002). Livestock systems in drylands. The conditions for sustainability. In:(Eds),53rd annual meeting of the european Association for Animal Production, Le Caire, Egypte,4/09/2002.

Lhoste, P. (2004). "Les relations agriculture élevage." OCL **11**(4/5): 253-255.

Lo Seen, D., E. Mougin, S. Rambal, A. Gaston et P. Hiernaux (1995). "A regional Sahelian grassland model to be coupled with multispectral satellite data. II: Toward the control of its simulations by remotely sensed indices." Remote Sensing of Environment **52**(3): 194-206.

Loireau, M. (1998). Espaces-Ressources-Usages: Spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel Nigérien. Arts et Lettres, Langues et Sciences Humaines et Sociales-Département de Géographie. Montpellier, Université Montpellier III - Paul Valéry. **Thèse de Doctorat:** 385.

Loireau, M., M. Sghaier, M. Fétoui, M. Ba, M. Abdelrazik, J.-M. d'Herbès, J.-C. Desconnets, D. Leibovici, S. Debard et É. Delaître (2007). "Système d'information sur l'environnement à l'échelle locale (Siel) pour évaluer le risque de désertification :situations comparées circumsahariennes (réseau Roselt)." Sécheresse **18**(4): 328-335.

Longley, P. A., M. F. Goodchild, D. J. Maguire et D. W. Rhind (2005). Geographical information systems and science. West Sussex, England.

Mahamane, A. (1997). Structure fonctionnement et dynamique des parcs agro-forestiers dans l'ouest du Niger, Université de Ouagadougou. **Thèse de doctorat de 3 ème cycle.**

Mahamane, A., Aboubacar Ichaou, JM Karimou Ambouta, S. Mahamane, B. Morou, I. Amani, H. Mahamadou, J. M. d'Herbès, P. Gineste, I. Wata et A. Issaka (2007). "Indicateurs écologiques de la période optimale de remise en culture de jachères au Niger." Sécheresse **18**(4): 289-295.

Malkki, S. (1999). Human faeces as a resource in agriculture. In:(Eds), 36-43.

Mando, A. (1997). "Effect of termites and mulch on the physical rehabilitation of structurally." Land Degradation and Development 8 (1997) 269-278.

Mando, A. et L. Stroosnijder (1999). "The biological and physical role of mulch in the rehabilitation of custed." Soil Use and Management 15 (1999): 123.

Manlay, R., C. Cambier, A. Ickowicz et D. Masse (2000). Modélisation de la dynamique du statut organique d'un terroir ouest-africain par un système multi-agents (Sénégal). In: C. Floret, Pontanier, R. (Eds), La jachère en Afrique tropicale. Rôles, aménagements, alternatives (vol I). Actes du séminaire international, Dakar (Sénégal), 13-16 avril 1999, John Libbey, Paris, 777.

Manlay, R. J. (2000). Dynamique de la matière organique à l'échelle d'un terroir agro-pastoral de la savane ouest -Africaine (Sud Sénégal). Sciences de l'Environnement. Montpellier, ENREF. **Thèse de Doctorat:** 246.

Manlay, R. J., J. L. Chotte, M. Dominique, L. J. Yves et F. Christian (2002). "Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna: III. Plant and soil components under continuous cultivation." Agriculture, Ecosystems & Environment **88**(3): 249-269.

Manlay, R. J., A. Ickowicz, D. Masse, C. Feller et D. Richard (2004). "Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savanna--II. Element flows and functioning of a mixed-farming system." Agricultural Systems **79**(1): 83-107.

Manyame, C. (2006). On-farm yield and water use response of pearl millet to different management practices in niger, Texas A&M University. **Phd:** 138.

Marichatou, H., L. Mamane, M. Banoin et G. Baril (2002). "Performances zootechniques des caprins au Niger : étude comparative de la chèvre rousse de Maradi et de la chèvre à robe noire dans la zone de Maradi." Revue Élevage et Médecine vétérinaire des Pays tropicaux **55**(1): 79-84.

Marinho, E. C. (2008). Economics of hunger: several methods, levels and scales. Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale. Louvain, Belgique, Université catholique de Louvain. **Phd:** 173.

Massuel, S. (2005). Evolution récente de la ressource en eau consécutive aux changements climatiques et environnementaux du sud-ouest Niger. Modélisation des eaux de surface et souterraines du bassin du kori de Dantiandou sur la période 1992-2003. Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, Université Montpellier II. **Phd:** 238.

Mati, B. M. et A. Veihe (2001). "Application of the USLE in a Savannah Environment: Comparative Experiences from East and West Africa." Singapore Journal of Tropical Geography **22**(2): 138-155.

McDonagh, J. F. et A. E. M. Hillyer (2003). "Grain legumes in pearl millet systems in northern namibia: an assessment of potential nitrogen contributions." Experimental Agriculture **39**(04): 349-362.

Meuret, M. et P. Thinon (1993). La maîtrise de l'utilisation de l'espace pâturé vue à travers un système d'information géographique. In: E. Landais (Eds),Pratiques d'Elevage Extensif. Identifier, modéliser, évaluer., France, I.N.R.A, Etude et recherches sur les systèmes agraires et le développement, 217-236.

Meyer, J. F. (1989). Le troupeau bovin du Burkina Faso. Résultats d'enquêtes. Rapport d'étude: 118.

Michel, J. F. (2000). "Les dénombrements d'animaux domestiques, une revue." Rev. Elev. Méd. Pays trop. **53**: 55-66.

Milleville, P. et G. Serpantié (1994). Intensification et durabilité des systèmes agricoles en Afrique soudano-sahélienne. In: M. Benoit-Cattin et J.-C. de Grandi (Eds),Promotion de systèmes

agricoles durables dans les pays d'Afrique soudano-sahélienne, Dakar, Sénégal, 10-14 janvier 1994, FAO, CIRAD, CTA, 33-44.

Minami, M. (2000). Using ArcMap. Redlands, ESRI.

Minet, J. (2007). Influence de la dispersion du parcellaire sur la gestion du risque climatique au Fakara, Niger. Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale, Université Catholique de Louvain. **Bio-ingénieur en Environnement:** 105.

Mohamed Saleem, M. A. (1998). "Nutrient balance patterns in African livestock systems." Agriculture, Ecosystems & Environment **71**(1-3): 241-254.

Mortimore, M. et B. Turner (2005). "Does the Sahelian smallholder's management of woodland, farm trees, rangeland support the hypothesis of human-induced desertification?" Journal of Arid Environments **63**(3): 567-595.

Mortimore, M. J. (2003). L'avenir des exploitations familiales en Afrique de l'Ouest: Que peut-on apprendre des données à long terme ? Programme zones arides. IIED. London, International Institute for Environment and Development.

Mortimore, M. J., M. Frances, H. A. et B. TURNER (1999). "Implications of land use change for the production of plant biomass in densely populated sahelo sudanian shrub grasslands in north-east Nigeria." Global Ecology and Biogeography **8**: 243-256.

Muoghalu, J. I. et A. Oakhumen (2000). "Nutrient content of incident rainfall, throughfall and stemflow in a Nigerian secondary lowland rainforest." Applied Vegetation Science **3**(2): 181-188.

Nachtergael, F. O., O. Spaargaren, J. A. Deckers et B. Ahrens (2000). "New developments in soil classification: World Reference Base for Soil Resources." Geoderma **96**(4): 345-357.

Nagelkerke, N. J. D. (1991). "A Note on a General Definition of the Coefficient of Determination." Biometrika **78**(3): 691-692.

Niamir-Fuller, M. (1998). The resilience of pastoral herding in Sahelian Africa. In: Linking Social and Ecological Systems: Management practices and social mechanisms for building resilience. Berkes F. et C. Folke. Cambridge, Cambridge University: 250-284.

Niamir-Fuller, M. (1999). Managing Mobility in African Rangelands: The Legitimization of Transhumance. Southampton, London, FAO and the Beijet International Institute of Ecological Economics.

Niemeijer, D. et V. Mazzucato (2002). "Soil degradation in the West African Sahel : how serious is it?" Environment 44 (2002) 2: 20.

Oenema, O., H. Kros et W. de Vries (2003). "Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies." European Journal of Agronomy 20(1-2): 3-16.

Olivier, S. (2005). Les propriétés chimiques des sols de parcelles cultivées dans le Fakara (Niger). Faculté d'ingénierie biologique agronomique et environnementale. Louvain-la-Neuve, Université Catholique de Louvain. **bio-ingénieur:** 186.

Olsson, L., L. Eklundh et J. Ardo (2005). "A recent greening of the Sahel--trends, patterns and potential causes." Journal of Arid Environments 63(3): 556-566.

Otte, M. J. et P. Chilonda (2002). Cattle and small ruminant production systems in sub-Saharan Africa : A systematic review. Rome.

Ouédraogo-Koné, S., C. Y. Kaboré-Zoungrana et I. Ledin (2006). "Behaviour of goats, sheep and cattle on natural pasture in the sub-humid zone of West Africa." Livestock Science 105(1-3): 244-252.

Ozer, P. (2004). "Bois de feu et déboisement au Sahel: mise au point." Sécheresse 15(3): 243-251.

Ozer, P., C. Bodart et B. Tychon (2005). "Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental: récentes modifications et impacts environnementaux." Cybergeo : revue européenne de géographie(308).

Ozer, P. et A. Ozer (2009). Desertification in the Sahel: climatic or human driven causes?

Payne, W., J. Williams, K. Moussa et R. Stern (1998). "Crop diversification in the sahel through use of environmental changes near faidherbia albida (del.) a. chev." Crop Sci. 38(6): 1585-1591.

Penning de Vries, F. W. T. et M. A. Djitèye (1982). La productivité de pâturages sahéliens - Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. Wageningen, The Netherlands.

Penning de Vries, F. W. T. et M. A. Djitèye (1991). La productivité des pâturages sahéliens: une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. Wageningen, Centre for agricultural publishing and documentation.

Penning de Vries, F. W. T. et H. Van Keulen (1982). La production actuelle et l'action de l'azote et du phosphore. In: La productivité des pâturages sahéliens: une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. PUDOC. Wageningen, Centre for agricultural publishing and documentation: 196-222.

Penning de Vries, P. W. T. (1983). "The productivity of sahelian rangelands." Pastoral network paper: 1-31.

Petersen, B. S., K. D. Christensen et F. P. Jensen (2007). "Bird population densities along two precipitation gradients in Senegal and Niger." *Malimbus* **29**: 101-121.

Pieri, C. (1989). Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Paris.

Planchenault, D. (1992). Enquête productivité du bétail camerounais, CIRAD-EMVT, Ministère de l'élevage, des pêches et des industries animales: 249.

PNUD (2004a). Rapport mondial sur le développement humain 2004. Paris, ECONOMICA.

PNUD (2004b) "Rapport National sur le développement humain du Niger." République du Niger , Système des Nations Unies.

Poissonet, J., I. A. Toure, H. Gillet et M. Cabaret (1986). Méthodologie pour l'étude des paturages sahéliens, UNIVAL documentation et éditions scientifiques agronomiques.

Powell, J. M., S. Fernandez-Rivera, P. Hiernaux et M. D. Turner (1996). "Nutrient Cycling in Integrated Rangeland/Cropland Systems of the Sahel." *Agricultural Systems* **52**(2-3): 143-170.

Powell, J. M., S. Fernández-Rivera, P. Hiernaux et M. D. Turner (1996). "Nutrient cycling in integrated rangeland/cropland systems of the Sahel." *Agricultural Systems* **52**(2-3): 143-170.

Powell, J. M., S. Fernandez-Rivera et S. Hofs (1994). "Effects of sheep diet on nutrient cycling in mixed farming systems of semi-arid West Africa." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **48**(3): 263-271.

Powell, J. M., S. Fernandez-Rivera, T. O. Williams et C. Renard (1995). Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed farming systems of sub-Saharan African., Addis Ababa, Ethiopia, ILCA (International Livestock Centre for Africa).

Powell, J. M., F. N. Ikpe, Z. C. Somda et S. Fernandez-Rivera (1998). "Urine effects on soil chemical properties and the impact of urine and dung on pearl millet yield." *Experimental Agriculture* **34**(03): 259-276.

Powell, J. M., R. A. Pearson et P. H. Hiernaux (2004). "Crop-livestock interactions in the west African drylands." *Agronomy Journal* **96**(2): 469-483.

Powell, J. M. et T. O. Williams (1995a). Livestock, Nutrient Cycling and sustainable agriculture in the West African Sahel, International Institute for Environment and Development.

Powell, J. M. et T. O. Williams (1995b). An overview of mixed farming systems in sub-Saharan Africa. In: J. M. Powell, S. Fernandez-Rivera, T. O. Williams et C. Renard (Eds), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed farming systems of sub-Saharan African*, Addis Ababa, Ethiopia, 22–26 November 1993, International Livestock Centre for Africa, 568.

Prince, S. D., E. Brown, D. Colstoun et L. L. Kravitz (1998). "Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification." *Global Change Biology* **4**(4): 359-374.

Prince, S. D., K. J. Wessels, C. J. Tucker et S. E. Nicholson (2007). "Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation." *Global Change Biology* **13**(7): 1308-1313.

Ramankutty, N. (2004). "Croplands in West Africa: A Geographically Explicit Dataset for Use in Models." *Earth Interactions* **8**(23): 1-22.

Ramisch, J. (1999). "In the balance ? Evaluating soil nutrients budgets for an agro-pastoral village of Southern Mali." *Managing Africa's Soils* **9**: 28.

Ramisch, J. J. (2005). "Inequality, agro-pastoral exchanges, and soil fertility gradients in southern Mali." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **105**(1-2): 353-372.

Raynaut, C. (2001). "Societies and nature in the Sahel: ecological diversity and social dynamics." *Global Environmental Change* **11**(1): 9-18.

Reardon, T. (1994). *Promotion de systèmes agricoles durables dans les pays de l'Afrique soudano-sahélienne*. FAO, Rome.

Regnauld, N., R. B. McMaster, A. M. William, R. Anne et L. T. Sarjakoski (2007). A synoptic View of Generalisation Operators. In: *Generalisation of Geographic Information*. Amsterdam, Elsevier Science B.V.: 37-66.

Reynolds, J. F. et D. M. S. Smith (2002). Global Desertification: Do Humans Cause Deserts? In: J. F. Reynolds et D. M. S. Smith (Eds), Dahlem Workshop Report 88, Berlin, Dahlem University Press, 403-424.

Ribolzi, O., M. Hermida, H. Karambiri, J. P. Delhoume et L. Thiombiano (2006). "Effects of aeolian processes on water infiltration in sandy Sahelian rangeland in Burkina Faso." *CATENA* **67**(3): 145-154.

Rockstrom, J., J. Barron, J. Brouwer, S. Galle et A. de Rouw (1999). "On-Farm Spatial and Temporal Variability of Soil and Water in Pearl Millet Cultivation." *Soil Sci. Soc. Am. J.* **63**(5): 1308-1319.

Rodionov, S. N. (2004). "A sequential algorithm for testing climate regime shifts." *Gophysical research letters* **31**(L09204).

Rodionov, S. N. (2006). Sequential Regime Shift Detection Software version 3.2. *Gophysical research letters* **31**.

Roose, É. et B. Barthés (2001). "Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa: a contribution from Francophone research." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **61**: 159-170.

Roose, É. et G. D. Noni (2004). "Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique : revue et perspectives." *Science et changements planétaires / Sécheresse* **15**(1): 121-129.

Roose, E. J. (1979). Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indures sous sorgho et sous savane soudano-sahélienne - Saria (Haute-Volta) : synthèse des campagnes 1971-1974. ORSTOM. PARIS, OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER: 125.

Roy, R. N., R. V. Misra, J. P. Lesschen et E. M. Smaling (2003). Assessment of soil nutrient balance : Approaches and methodologies. FAO Fertilizer and plan nutrition bulletin. FAO. Rome: 87.

Ruben, R. et J. Pender (2004). "Rural diversity and heterogeneity in less-favoured areas: the quest for policy targeting." *Food Policy* **29**(4): 303-320.

Rufino, M., H. Hengsdijk et A. Verhagen (2009). "Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **84**(3): 229-247.

Rufino, M., P. Tittonell, P. Reidsma, S. López-Ridaura, H. Hengsdijk, K. Giller et A. Verhagen (2009). "Network analysis of N flows and food self-sufficiency—a comparative study of crop-livestock systems of the highlands of East and southern Africa." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **85**(2): 169-186.

Rufino, M. C. (2008). Quantifying the contribution of croplivestock integration to African farming. *Production Ecology and Resource Conservation*. Wageningen, Wageningen University, The Netherlands. **PhD Thesis**.

Rufino, M. C., E. C. Rowe, R. J. Delve et K. E. Giller (2006). "Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop-livestock systems." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **112**(4): 261-282.

Rufino, M. C., P. Tittonell, M. T. van Wijk, A. Castellanos-Navarrete, R. J. Delve, N. de Ridder et K. E. Giller (2007). "Manure as a key resource within smallholder farming systems: Analysing farm-scale nutrient cycling efficiencies with the NUANCES framework." *Livestock Science* **112**(3): 273-287.

Ruthenberg, H. (1980). *Farming Systems in the Tropics*, Third Edition. Oxford, Clarendon Press.

Sangaré, M., A. Bationo, P. Hiernaux, S. Fernandez-Rivera et V. Pandey (2002). "Effect of type and level of roughage offered to sheep and urine addition on compost quality and millet growth and production in the Sahel." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **62**(3): 203-208.

Saqalli, M., P. Caron, P. Defourny et A. Issaka (2009). "The PBRM (perception-based regional mapping): A spatial method to support regional development initiatives." *Applied Geography* **29**(3): 358-370.

SAS (2004a). *SAT/STAT 9.1 User's Guide*. Cary, NC 27513, SAS Publishing.

SAS (2004b). *SAT/STAT^(r) 9.1 User's Guide*. Cary, NC, SAS Publishing.

SAS (2004c). The STEPDISC Procedure. In: *SAT/STAT(r) 9.1 User's Guide*. S. I. Inc. Cary, NC, SAS Publishing: 4157-4181.

Schareika, N. (2003). Know to move, move to know: ecological knowledge and herd movement strategies among the Wodaabe of Southeastern Niger. In: *Know to move, move to know: ecological knowledge and herd movement strategies among the Wodaabe of Southeastern Niger*: viii + 60 pp.

Schiere, J. B., M. N. M. Ibrahim et H. van Keulen (2002). "The role of livestock for sustainability in mixed farming: criteria and scenario studies under varying resource allocation." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **90**(2): 139-153.

Schlecht, E. (1995). The influence of different levels of supplementation on feed intake and nutrient retention of grazing Zebu cattle in Sahelian agro-pastoral systems. Fakultat IV - Agrarwissenschaften II. Hohenheim, Universitat Hohenheim. **Phd:** 200.

Schlecht, E. et A. Buerkert (2004). "Organic inputs and farmers' management strategies in millet fields of western Niger." *Geoderma* **121**(3-4): 271-289.

Schlecht, E., S. Fernández-Rivera et P. Hiernaux (1997). Timing, size and N-concentration of faecal and urinary excretions in cattle, sheep and goats - Can they be used for better manuring of cropland?. *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems. Proceedings of the Regional Workshop*, Niamey, Niger, Margraf Verlag, Weikersheim, Germany.

Schlecht, E. et P. Hiernaux (2004). "Beyond adding up inputs and outputs: Process assessment and upscaling in modelling nutrient flows." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **70**(3): 303-319.

Schlecht, E., P. Hiernaux, F. Achard et M. Turner (2004). "Livestock related nutrient budgets within village territories in western Niger." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **68**(3): 199-211.

Schlecht, E., P. Hiernaux, I. Kadaoure, C. Hulsebusch et F. Mahler (2006). "A spatio-temporal analysis of forage availability and grazing and excretion behaviour of herded and free grazing cattle, sheep and goats in Western Niger." *Agriculture Ecosystems & Environment* **113**(1-4): 226-242.

Schlecht, E., C. Hulsebusch, F. Mahler et K. Becker (2004). "The use of differentially corrected global positioning system to monitor activities of cattle at pasture." *Applied Animal Behaviour Science* **85**(3-4): 185-202.

Schlecht, E., F. Mahler, M. Sangaré et K. Becker (1995). "Quantitative and qualitative estimation of nutrient intake and faecal excretion of Zebu cattle grazing natural pasture in semi-arid Mali. In: *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of sub-Saharan Africa.*" *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of sub-Saharan Africa.*: 85-97.

Schouw, N. L., S. Danteravanich, H. Mosbaek et J. C. Tjell (2002). "Composition of human excreta -- a case study from Southern Thailand." *The Science of The Total Environment* **286**(1-3): 155-166.

Schreinemachers, P. (2006). The (ir)relavance of the crop yield gap to food security in developing countries. With an application of multi-agent modeling to farming systems in Uganda. Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät. Bonn, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität. **Phd**.

Schreinemachers, P., T. Berger et J. B. Aune (2007). "Simulating soil fertility and poverty dynamics in Uganda: A bio-economic multi-agent systems approach." *Ecological Economics* **64**(2): 387-401.

Scoones, I. et C. Toulmin (1995). Socio-economic dimensions of nutrient cycling in agropastoral systems in dryland Africa. In: J. M. Powell, S. Fernández-Rivera, T. O. Williams et C. Renard (Eds), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of sub-Saharan Africa*, Addis Ababa, Ethiopia, International Livestock Centre for Africa (ILCA).

Scoones, I. et C. Toulmin (1998). "Soil nutrient balances: what use for policy?" *Agriculture, Ecosystems & Environment* **71**(1-3): 255-267.

Scoones, I. et C. Toulmin (1999). "Soil nutrient balances: what use for policy?" *Managing Africa's Soils* **6**: 28.

Seghieri, J. et M. Simier (2002). "Variations in phenology of a residual invasive shrub species in Sahelian fallow savannas, south-west Niger." *Journal of Tropical Ecology* **18**(06): 897-912.

Seghieri, J., M. Simier, A. Mahamane, P. Hiernaux et S. Rambal (2005). "Adaptative above-ground biomass, stand density and leaf water potential to droughts and clearing in *Guiera senegalensis*, a dominant shrub in Sahelian fallows (Niger)." *Journal of Tropical Ecology* **21**(02): 203-213.

Seré, C. et H. Steinfeld (1996). World livestock production systems: current status, issues and trends. FAO animal production and health paper 127. Rome, FAO.

Sheldrick, W. F. et J. Lingard (2004). "The use of nutrient audits to determine nutrient balances in Africa." *Food Policy* **29**(1): 61-98.

Shepherd, K. D. et M. J. Soule (1998). "Soil fertility management in west Kenya: dynamic simulation of productivity, profitability and sustainability at different resource endowment levels." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **71**(1-3): 131-145.

Shepherd, K. D. et M. G. Walsh (2007). "Review: Infrared spectroscopy:enabling an evidence-based diagnostic surveillance approach to agricultural and environmental management in developing countries." *Journal of Near Infrared Spectroscopy* **15**(1): 1-20.

Shi, X., A.-X. Zhu et M. Turner (1998). An Efficient Algorithm for Computing Euclidean Shortest Paths through a polygon. Madison, WI, Department of Geography, University of Wisconsin: 4.

Sivakumar, M. V. K. (1988). "Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa." *Agricultural and Forest Meteorology* **42**(4): 295-305.

Smaling, E. M. A. et J. Dixon (2006). "Adding a soil fertility dimension to the global farming systems approach, with cases from Africa." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **116**(1-2): 15-26.

Smaling, E. M. A. et L. O. Fresco (1993). "A decision-support model for monitoring nutrient balances under agricultural land use (NUTMON)." *Geoderma* **60**(1-4): 235-256.

Smaling, E. M. A., O. F. Louise et D. J. Andre (1996). "Classifying, Monitoring and Improving soil nutrients stocks and flows in African Agriculture." *Ambio* **25**(8): 492-496.

Smaling, E. M. A., J. J. Stoorvogel et P. N. Windmeijer (1993). "Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **35**(3): 237-250.

Soe Win Myint, C. T. a. D. A. E. (1997). "Soil Nutrient Depletin Modelling using Remote Sensig and GIS: A Case Study in Chonburi, Thailand." Année d'accès, 2003, page web: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1997/ps3/ps3005pf.htm>.

Somda, Z. C., J. M. Powell, Fernandez-Rivera et J. Reed (1995). Feed factors affecting nutrient excretion by ruminants and the fate of nutrients when applied to soil. *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of sub-Saharan Africa*, Addis Ababa, Ethiopia, ILCA (International Livestock Centre for Africa).

Sonneveld, B. G. J. S. et M. A. Nearing (2002). A non-parametric/parametric analysis of the universal soil loss equation. C. f. W. F. S.-W.-. 05.

Stangel, P. J. (1995). Nutrient cycling and its importance in sustaining crop-livestock systems in sub-Saharan Africa: An overview. In: *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed farming systems of sub-Saharan African*. J. M. Powell, S. Fernandez-Rivera, T. O. Williams et C. Renard. Addis Ababa, Ethiopia, International Livestock Centre for Africa. **II**: 568.

Stephenné, N. et E. F. Lambin (2001). "A dynamic simulation model of land-use changes in Sudano-sahelian countries of Africa (SALU)." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **85**(1-3): 145-161.

Sterk, G., L. Herrmann et A. Bationo (1996). "Wind-blown nutrient transport and soil productivity changes in southwest Niger." *Land Degradation & Development* **7**(4): 325-335.

Sterk, G., A. Stein et L. Stroosnijder (2004). "Wind effects on spatial variability in pearl millet yields in the Sahel." *Soil and Tillage Research* **76**(1): 25-37.

Stocking, M. A. (2003). "Tropical Soils and Food Security: The Next 50 Years." *Science* **302**.

Stokes, M. E., C. S. Davis et G. G. Koch (2000). *Categorical Data Analysis Using the SAS® System*, Second Edition. Cary, NC, John Wiley & Sons.

Stone, R. P. et D. Hilborn. (2000). "Fiche technique : Equation universelle des pertes en terre (USLE)." Année d'accès, 2007, page web: <http://www.omafra.gov.on.ca>.

Stoorvogel, J. J. (1995). "Linking GIS and Models : structure an operationalisation for a costa Rica case study." *Netherlands Journal of Agricultural Science* **43**: 19-29.

Stoorvogel, J. J., M. Bonzi et P. Gicheru. (1999). "Spatial variation in soil nutrient stocks in Sub-Saharan farming systems." Année d'accès, 2003, page web: <http://www.nutmon.org/files/73c70fce5506674c08f4db80ff320b67.pdf>.

Stoorvogel, J. J., B. H. Janssen et N. Van Breemen (1997). "The nutrient budgets of a watershed and its forest ecosystem in the Taï National Park in Côte d'Ivoire." *Biogeochemistry* **37**(2): 159-172.

Stoorvogel, J. J. et E. M. A. Smaling (1990a). Assessment of soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa :1983-2000, Volume I - Main report. Wageningen (The Netherlands), The WINAND STARING CENTRE for Integrated land, Soil and Water Research: 137.

Stoorvogel, J. J. et E. M. A. Smaling (1990b). Assessment of soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa :1983-2000, Volume II - Nutrients balances per crop and per Land Use Systems. Wageningen (The Netherlands), The WINAND STARING CENTRE for Integrated land, Soil and Water Research: 137.

Stoorvogel, J. J. et E. M. A. Smaling (1990c). Assessment of soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa:1983-2000, Volume III - Literature review and description of Land Use Systems. Wageningen (The Netherlands), The WINAND STARING CENTRE for Integrated land, Soil and Water Research: 162.

Stoorvogel, J. J. et E. M. A. Smaling (1998). "Research on soil fertility decline in tropical environments: integration of spatial scales." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **50**(1): 151-158.

Stoorvogel, J. J., E. M. A. Smaling et B. H. Janssen (1993a). "Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **35**(3): 227-235.

Stoorvogel, J. J., E. M. A. Smaling et P.-E. Jansson (1993b). "Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales: I. Supra National Scale." *Fertilizer Research* **35**: 237-250.

Stoorvogel, J. J., N. Van Breemen et B. H. Jassen (1997). "The nutrient input by Harmattan dust to a forest ecosystem in Côte d'Ivoire, Africa." *Biogeochemistry* **37**(2): 145-157.

Stroosnijder, L., N. de Ridder et P. Kiepe (2001). Interventions by land users in Sahelian villages. 3. Nutrient balances in Sahelian villages. - Advances in GeoEcology 33. In: Agro-silvo-pastoral Land Use in Sahelian Villages. CATENA. Reichskirchen, Germany, Verlag: 213-225.

Stuth, J., A. Jama et D. Tolleson (2003). "Direct and indirect means of predicting forage quality through near infrared reflectance spectroscopy." *Field Crops Research* **84**(1-2): 45-56.

Tan, G. et R. Shibasaki (2003). "Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration." *Ecological Modelling* **168**(3): 357-370.

Team, R. D. C. (2005). R: A language and environment for statistical computing. R. F. f. S. Computing. Vienna, Austria.

Teh, C. B. S. (2006). Introduction to mathematical modeling of crop growth: How the equations are derived and assembled into a computer program. Boca Raton, Florida, BrownWalker Press, Boca Raton, Florida.

Thebaud, B. (1999). Gestion de l'espace et crise pastorale au Sahel: étude comparative du Niger oriental et du Yagha Burkinabé. Paris, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales. **Thèse de doctorat:** 479.

Thébaud, B. et S. Batterbury (2001). "Sahel pastoralists: opportunism, struggle, conflict and negotiation. A case study from eastern Niger." *Global Environmental Change* **11**(1): 69-78.

Thornton, P. K., J. van de Steeg, A. Notenbaert et M. Herrero (2009). "The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know." *Agricultural Systems* **101**(3): 113-127.

Tidjani, A. (2004). Inventaire des haies vives dans le terroir de Tigo (Fakara). Centre régional d'enseignement spécialisé en agriculture (CRESA). Niamey, Université Abdou Moumouni. **D.E.S.S:** 49.

Tiffen, M. (2006). "Urbanization: Impacts on the evolution of 'mixed farming' systems in sub-Saharan Africa." *Experimental Agriculture* **42**(3): 259-287.

Tittonell, P., P. A. Leffelaar, B. Vanlauwe, M. T. van Wijk et K. E. Giller (2006). "Exploring diversity of crop and soil management within smallholder African farms: A dynamic model for simulation of N balances and use efficiencies at field scale." *Agricultural Systems* **91**(1-2): 71-101.

Tittonell, P., M. T. van Wijk, M. Herrero, M. C. Rufino, N. de Ridder et K. E. Giller (2009). "Beyond resource constraints - Exploring the biophysical feasibility of options for the intensification of smallholder crop-livestock systems in Vihiga district, Kenya." *Agricultural Systems* **101**(1-2): 1-19.

Tittonell, P., B. Vanlauwe, P. A. Leffelaar, K. D. Shepherd et K. E. Giller (2005). "Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya: II. Within-farm variability in resource allocation, nutrient flows and soil fertility status." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **110**(3-4): 166-184.

Tittonell, P., S. Zingore, M. T. van Wijk, M. Corbeels et K. E. Giller (2007). "Nutrient use efficiencies and crop responses to N, P and manure applications in Zimbabwean soils: Exploring management strategies across soil fertility gradients." *Field Crops Research* **100**(2-3): 348-368.

Toutain, B. (2001). Le risque en pastoralisme : quelques considérations pour orienter les actions de développement. *Elevage et gestion de parcours au Sahel, implications pour le développement.*

Traoré, S., L. Thiombiano, J. R. Millogo et S. Guinko (2007). "Carbon and nitrogen enhancement in Cambisols and Vertisols by Acacia spp. in eastern Burkina Faso: Relation to soil respiration and microbial biomass." *Applied Soil Ecology* **35**(3): 660-669.

Tufféry, S. (2010). Data mining et statistique décisionnelle: l'intelligence des données, Editions Technip.

Turner, M. (1993). Overstocking the Range: A Critical Analysis of the Environmental Science of Sahelian Pastoralism, Clark University. **69:** 402-421.

Turner, M. (1995a). GIS Development to Support the Spatial Modelling of Livestock-Mediated Nutrient Transfers in SAWA: Final Report of Activities. ILRI. Niamey, Niger: 18.

Turner, M. (1995b). Herd management strategies and their effect on nutrients transfers in Western Niger : Final report of activities. I.-. Niger.

Turner, M. (1999a). "Labor Process and the Environment: The Effects of Labor Availability and Compensation on the Quality of Herding in the Sahel." *Human Ecology* **27**(2): 267-296.

Turner, M., D., et P. Hiernaux (2002). "The use of herders' accounts to map livestock activities across agropastoral landscapes in Semi-Arid Africa." *Landscape Ecology* **17**: 367-385.

Turner, M. et P. Hiernaux (2008). "Changing Access to Labor, Pastures, and Knowledge: The Extensification of Grazing Management in Sudano-Sahelian West Africa." *Human Ecology* **36**(1): 59-80.

Turner, M., P. Hiernaux et E. Schlecht (2005). "The Distribution of Grazing Pressure in Relation to Vegetation Resources in Semi-arid West Africa: The Role of Herding." *Ecosystems* **8**(6): 668-681.

Turner, M. D. (1992). Living on the edge: Fulssse herding practices and the relationship between economy and ecology in the inland Niger Delta of Mali. United States -- California, University of California, Berkeley.

Turner, M. D. (1995c). The sustainability of rangeland to cropland nutrient transfer in semi-arid West Africa: Ecological and social dimensions neglected in the debate. In: J. M. Powell, S. Fernández-Rivera, T. O. Williams et C. Renard (Eds), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed farming systems of sub-Saharan African.*, Addis Ababa, Ethiopia, 22-26 November 1993, International Livestock Centre for Africa, 568.

Turner, M. D. (1999b). "Merging Local and Regional Analyses of Land-Use Change: The Case of Livestock in the Sahel." *Annals of the Association of American Geographers* **89**(2): 192-219.

Turner, M. D. (1999c). "Spatial and temporal scaling of grazing impact on the species composition and productivity of Sahelian annual grasslands." *Journal of Arid Environments* **41**(3): 277-297.

Turner, M. D. (2003). "Methodological reflections on the use of remote sensing and geographic information science in human ecological research." *Human Ecology* **31**(2): 255-279.

Turner, M. D. (2004). "Political ecology and the moral dimensions of "resource conflicts": the case of farmer-herder conflicts in the Sahel." *Political Geography* **23**(7): 863-889.

Turner, M. D. (2009). "Capital on the move: The changing relation between livestock and labor in Mali, West Africa." *Geoforum* **40**(5): 746-755.

Turner, M. D. et T. O. Williams (2002). "Livestock Market Dynamics and Local Vulnerabilities in the Sahel." *World Development* **30**(4): 683-705.

Tychon, B. (1993). Etude du transfert d'eau et d'azote dans les sols d'un micro-bassin agricole. Arlon, Fondation Universitaire Luxembourgeoise. **Doctorat en Sciences de l'Environnement**.

Tychon, B., P. V. Borght et L. W. De Backer (1999). "Water and nitrogen transfer study through soils of a small agricultural water catchment." *Water Science and Technology* **39**(12): 69-76.

UNEP (2002). Global environmental outlook 2002. Nairobi (Kenya), United Nations Environment Programme.

Van den Bosch, H., H. De Jager et A. J. Vlaming (1998). "Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON): II. Tool development." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **71**(1-3): 49-62.

Van den Bosch, H., J. N. Gitari, V. N. Ogaro, S. Maobe et J. Vlaming (1998). "Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON): III. Monitoring nutrient flows and balances in three districts in Kenya." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **71**(1-3): 63-80.

Van Duivenbooden, N. (1996). La durabilité exprimée en termes d'éléments nutritifs. Bamako, Bamako : Institut d'Economie Rurale ; Wageningen : AB-DLO: 268.

Vancolen, S. (2004). La régression PLS. Groupe de Statistique, Université de Neuchâtel. **Diplôme Postgrade en Statistique:** 28.

Vanderlinde, J.-P. (2002). Property rights, risk and development: Community-level range management in Niger. Canada, York University (Canada).

Visser, S. M. (2004). Modelling nutrient erosion by wind and water in northern Burkina Faso. [S.l., s.n.]. **Met samenvatting in het Engels, Nederlands en Frans**.

Visser, S. M., J. K. Leenders et M. Leeuwis (2003). "Farmers' perceptions of erosion by wind and water in northern Burkina Faso." *Land Degradation & Development* **14**(1): 123-132.

Visser, S. M. et G. Sterk (2007). "Nutrient dynamics - wind and water erosion at the village scale in the Sahel." *Land Degradation & Development* **18**(5): 578-588.

Visser, S. M., G. Sterk et D. Karssenberg (2005). "Wind erosion modelling in a Sahelian environment." *Environmental Modelling & Software* **20**(1): 69-84.

Visser, S. M., L. Stroosnijder et W. J. Chardon (2005). "Nutrient losses by wind and water, measurements and modelling." *CATENA* **63**(1): 1-22.

Vitousek, P. M., R. Naylor, T. Crews, M. B. David, L. E. Drinkwater, E. Holland, P. J. Johnes, J. Katzenberger, L. A. Martinelli, P. A. Matson, G. Nziguheba, D. Ojima, C. A. Palm, G. P. Robertson, P. A. Sanchez, A. R. Townsend et S. Zhang (2009). "Nutrient Imbalances in Agricultural Development." *Science* **324**: 1519-1520.

Vlaming, J. (2006). "MonQI: Monitoring for Quality Improvement, Concepts, methodologies and tool development." Année d'accès, 2007, page web: <http://www.monqi.org/>.

Vlaming, J., H. Van den Bosch, M. S. v. Wijk, A. De Jager, A. Bannink et H. Van Keulen (2001). Monitoring nutrients flows and economics performance in tropical farming systems (NUTMON) - Part 1: Manual for the NUTMON - Toolbox. Wageningen, Alterra: 186 et Annexes.

Voiron, C. et J.-P. Chery (2005). Espace géographique, spatialisation et modélisation en Dynamique des Systèmes. In:(Eds),Actes du 6ème Congrès Européen de Science des Systèmes, Paris.

Voortman, R. L., J. Brouwer et P. J. Albersen (2002). Characterization of Spatial Soil Variability and its effect on millet Yield on Sudano Sahelian coversands in SW Niger, Centre for World Food Studies.

Voortman, R. L., J. Brouwer et P. J. Albersen (2004). "Characterization of spatial soil variability and its effect on Millet yield on Sudano-Sahelian coversands in SW Niger." *Geoderma* **121**(1-2): 65-82.

Wade, T. G., B. W. Schultz, J. D. Wickham et D. F. Bradford (1998). "Modeling the potential spatial distribution of beef cattle grazing using a Geographic Information System." *Journal of Arid Environments* **38**(2): 325-334.

Wane, A. (2006a). Review of the literature on pastoral economics and marketing: West Africa, WISP - World initiative for sustainable production, GEF, UNDP, IUCN.

Wane, A. (2006b). Review of the literature on Pastoral Economics and Marketing:West Africa. WISP. UICN, UICN: 22.

Weynants, M. (2005). Caractérisation des propriétés hydrodynamiques et étude de la possibilité d'agrégation de trois types de sols au Fakara, Niger. Faculté d'ingénierie biologique agronomique et environnementale. Louvain-la-Neuve, Université Catholique de Louvain. **bio-ingénieur:** 102.

Wezel, A. et J. Haigis (2002). "Fallow cultivation system and farmers' resource management in Niger, West Africa." *Land Degradation & Development* **13**(3): 221-231.

Wezel, A., J. L. Rajot et C. Herbrig (2000). "Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger." *Journal of Arid Environments* **44**(4): 383-398.

Wezel, A. et E. Schlecht (2004). "Inter-annual variation of species composition of fallow vegetation in semi-arid Niger." *Journal of Arid Environments* **56**(2): 265-282.

Wezel, A. et G. Schmelzer (2002). "Changes in the floristic structure of a protected fallow site in the sahel." *Etudes sur la flore et la vegetation du Burkina Faso et des pays avoisinants* **6**: 3.

Wiedower, E., R. Hansen, H. Bissell, R. Ouellette, A. Kouba, J. Stuth, B. Rude et D. Tolleson (2009). "Use of near infrared spectroscopy to discriminate between and predict the nutrient composition of different species and parts of bamboo: application for studying giant panda foraging ecology." *Journal of Near Infrared Spectroscopy* **17**(5): 265-273.

William, T. O., J. M. Powell et S. Fernandez-Riviera (1993a). Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of sub-Saharan Africa Volume II: Technical papers. International Conference International Livestock Centre for Africa (ILCA), Addis Ababa, Ethiopia.

William, T. O., J. M. Powell et S. Fernandez-Riviera (1993b). Manure utilisation, drought cycles and herd dynamics in the Sahel: Implications for cropland productivity. International Conference International Livestock Centre for Africa (ILCA), Addis Ababa, Ethiopia.

Williams, T. O. (1993). "Livestock pricing policy in sub-Saharan Africa: Objectives, instruments and impact in five countries." *Agricultural Economics* **8**(2): 139-159.

Williams, T. O. (1999). "Factors influencing manure application by farmers in semi-arid west Africa." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **55**(1): 15-22.

Williams, T. O. (2003). Turning conflict into collaboration: strategies for sustainable natural resource management in african rangelands. In: N. Allsopp, A. R. Palmer, S. J. Milton, K. P. Kirkman, G. I. H. Kerley, C. R. Hurt et C. J. Brown (Eds), VIIth International Rangelands Congress, Durban, South Africa, 26th July – 1st August 2003, Document Transformation Technologies, 1730-1739.

Williams, T. O., P. Hiernaux et S. Fernandez-Rivera (1999). Crop-Livestock Systems in Sub-Saharan Africa: Determinants and Intensification Pathways. In: Property Rights, Risk, & Livestock Development in Africa. N. McCarthy, B. Swallow, M. Kirk et P. Hazell. Nairobi, Kenya, International Livestock Research Institute (ILRI): 133-151.

Williams, T. O., J. M. Powell et S. Fernández-Rivera (1995). Manure utilisation, drought cycles and herd dynamics in the Sahel: Implications for cropland productivity. In: J. M. Powell, S. Fernandez-Rivera, T. O. Williams et C. Renard (Eds), Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed farming systems of sub-Saharan African, Addis Ababa, Ethiopia, 22–26 November 1993, International Livestock Centre for Africa, 568.

Wilson, R. T. (1991). Small ruminant production and the small ruminant genetic resource in tropical Africa. Animal production and health paper. FAO. Rome, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.

Wint, W. et D. Bourn (1994). Livestock and land-use surveys in Sub-Saharan Africa. An Oxfam Working Paper. Oxfam.

Wint W. et D. Bourn (1994). Anthropogenic and Environmental Correlates of Livestock Distribution in Sub-Saharan Africa. A Comparative Analysis of Livestock Surveys in Mali, Niger, Nigeria, Sudan and Tchad. O. D. Administration. London, UK.

Wischmeier, W. H. et D. S. Dwight, Eds. (1978). Predicting rainfall erosion losses, A guide to conservation planning. Agriculture Handbook. Washington D.C., USDA.

Yamoah, C. F., A. Bationo, B. Shapiro et S. Koala (2002). "Trend and stability analyses of millet yields treated with fertilizer and crop residues in the Sahel." Field Crops Research **75**(1): 53-62.

Zine, S., L. Jarlan, P. L. Frison, E. Mougin, P. Hiernaux et J. P. Rudant (2005). "Land surface parameter monitoring with ERS scatterometer data over the Sahel: A comparison between agro-pastoral and pastoral areas." Remote Sensing of Environment **96**(3-4): 438-452.

Zingore, S., H. K. Murwira, R. J. Delve et K. E. Giller (2007). "Influence of nutrient management strategies on variability of soil fertility, crop yields and nutrient balances on smallholder farms in Zimbabwe." Agriculture, Ecosystems & Environment **119**(1-2): 112-126.