

Dynamique de la matière organique à l'échelle d'un terroir agro-pastoral de savane ouest-africaine (Sud-Sénégal)

-
Organic matter dynamics in mixed-farming systems
of the West African savanna : a village case study from south
Senegal

T H È S E

présentée par

Raphaël Manlay

pour obtenir le grade de Docteur de l'ENGREF

Spécialité : Sciences de l'Environnement

Soutenue publiquement le 3 mai 2000

à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts
Centre de Montpellier

devant le jury composé de :

M. Jean-Claude Remy - Rapporteur
M. Didier Richard - Rapporteur
M. Christian Feller - Directeur de Thèse
M. James Aronson - Examineur
M. Christian Floret - Examineur
Mme Anne-Marie Izac - Examinatrice
M. Claude Millier - Examineur

Les travaux décrits dans ce document ont été réalisés, entre 1996 et 2000 dans le cadre du projet "La Jachère en Afrique Tropicale", avec le soutien de l'Union Européenne et de l'IRD. Ils ont fait l'objet d'une thèse soutenue le 3 mai 2000, à l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts au centre de Montpellier, sous le titre : "Dynamique de la Matière Organique dans un Terroir Agropastoral de Savane Ouest Africaine (Sud Sénégal)"

<http://www.ird.sn/act-rech/ur4/jachere>

Cette thèse est consultable en Anglais : <http://www.engref.fr>

L'auteur est joignable par courrier électronique : manlay@engref.fr

REMERCIEMENTS

Le travail rapporté ici est autant le fruit d'un labeur personnel que d'un effort d'équipe. Ceci est dû non seulement au caractère holistique du sujet, mais aussi aux grandes qualités humaines des nombreuses personnes plus ou moins directement impliquées dans le projet.

Je suis particulièrement reconnaissant au Dr Christian Feller qui a accepté de diriger cette thèse. Malgré la distance et ses contraintes professionnelles, il m'a toujours offert son soutien scientifique et a veillé au bon déroulement de ce travail. En tant que scientifique du sol, il a misé sur ce projet pluridisciplinaire qui a bénéficié de sa grande ouverture d'esprit. Le Dr Christian Floret a été son homologue au Sénégal pour superviser ce travail. Je lui exprime mes remerciements pour sa confiance en ce projet et pour sa contribution scientifique, humaine et matérielle nécessaire pour la réalisation de cette thèse. Lui et le Dr Roger Pontanier m'ont accueilli dans l'équipe du Programme de Recherche sur la Jachère en Afrique de l'Ouest. Je suis très reconnaissant au Dr Pontanier pour cela, pour le suivi de mon travail - et en particulier pour la description des sols et des débats animés mais féconds - et pour sa bienveillance. Je suis aussi profondément redevable au Dr Claude Millier, sans qui cette thèse n'aurait pu être entreprise. En qualité de responsable administratif, il a toujours soutenu ma mise à disposition de l'IRD ; en tant que scientifique, il a beaucoup aidé au montage du sujet, à l'analyse des données et à la modélisation, et m'a apporté un fort soutien moral.

Je remercie beaucoup le Dr Dominique Masse pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail ; ses connaissances scientifiques, son bon sens, sa patience et son accueil chaleureux ont été absolument essentiels. Je suis également fortement reconnaissant au Dr Maguette Kaïré pour m'avoir aimablement permis d'utiliser certains de ses résultats sur la biomasse et la productivité ligneuse. Je remercie profondément les Drs Alexandre Ickowicz et Didier Richard. Ils ont fourni la plupart des données concernant les flux organiques relatifs à l'élevage, ont patiemment comblé mes lacunes en sciences animales et relu la plupart de ce travail. La première partie de ce travail doit beaucoup au Dr Jean-Luc Chotte, qui a fourni la plupart des analyses en carbone et azote du sol. Je lui suis très redevable pour sa critique du manuscrit.

Le travail de terrain a été essentiel pour cette thèse. Elle n'aurait pu être réalisée sans la volonté des habitants de Sare Yorobana, qui nous ont témoigné beaucoup de courage et de gentillesse. Je pense en particulier à Tidiane Baldé et Isa M'Balo. J'exprime aussi mes meilleurs remerciements à Baïdy Ly, Laurent Courbois, David Dupressoir et Kristine da Silva Conceição, qui m'ont beaucoup aidé pour le travail de terrain et de laboratoire ; je remercie Kokou Abotsy et Oumou Diao pour leur énorme travail de cartographie, ainsi que Vincent Guillotin et Olivier Garbe. Le Dr Jean

Usengumuremyi et Estelle Loupiac ont effectué avec soin beaucoup des analyses de données géographiques concernant l'élevage ; je les en remercie. Je suis également très redevable à l'équipe technique du laboratoire du Projet de recherche sur la jachère en l'Afrique de l'Ouest. Je pense particulièrement à Ndeye Fatou Fall et Awa Diatta pour leur efficacité et leur gentillesse inégalables ; elles m'ont vraiment appris à apprécier combien il est plaisant de travailler avec des collègues de bonne humeur. Je suis aussi profondément reconnaissant à Joël Fardoux, Gilles Ciornei, Jean-Yves Laurent et Dominique Friot pour les analyses de laboratoire.

Des remerciements spéciaux sont adressés à Patrick Dugué, dont les travaux de recherche au Nord Cameroun ont largement inspiré le programme initial de la thèse, et qui a fait une critique constructive de ce travail. L'interprétation écologique de la fertilité des agrosystèmes réalisée ici doit beaucoup aux débats critiques avec les Prs Gilles Lemieux, Michel Godron et Dave Perry. Je leur suis très reconnaissant, ainsi qu'au Dr Martial Bernoux, qui a aimablement accepté de corriger une partie du travail présenté ici, et au Dr Christophe Cambier pour son travail de modélisation qui a apporté un support conceptuel à cette thèse.

Je suis très reconnaissant aux Drs Michel Grouzis, Frédéric Do, Georges De Noni et Régis Peltier pour leur accueil dans leurs Laboratoires et Départements. Je remercie l'équipe de l'ENGREF et du Laboratoire de Comportement des Sols Cultivés de l'IRD de Montpellier pour leur soutien et leur gentillesse. Mes pensées vont vers Françoise Mary, Geneviève Reynaud et Anne-Lise Viala. Meilleurs remerciements à Marie-Christine Larré-Larrouy, Josiane Seghieri, Bernard Barthes, Laurent Thuries et Tiphaine Chevallier pour leur aide et leur bonne humeur !

Ce travail doit beaucoup aux discussions avec le personnel de la Société des Fibres Textiles et des services sénégalais de météorologie, d'agriculture et du recensement de Kolda et Dakar, qui ont aussi fourni certaines des données utilisées ici.

Je suis très redevable à Marie-Josèphe et Sébastien Manlay, qui ont aimablement corrigé la version anglaise de ce travail. Stéphanie Aulong a assuré sa traduction en français.

RESUME

La matière organique (MO) remplit de multiples fonctions dans les systèmes agro-pastoraux de savane d'Afrique de l'Ouest. Elle fournit de l'énergie, des éléments minéraux et des matériaux de construction aux paysans et aux animaux. Grâce à la jachère et à la fumure animale, elle assure l'entretien du système par des mécanismes biologiques. Dans la région, la disponibilité en MO peut être utilisée comme un indicateur de durabilité des systèmes de production traditionnels, car malgré une population croissante, les rendements progressent peu en raison d'un faible accès aux intrants chimiques. Les bilans du carbone (C), de l'azote (N) et du phosphore (P_t ; total dans la plante, disponible dans le sol et noté P_{OD}) ont donc été établis pour un terroir agro-pastoral dans le Sud du Sénégal afin d'en estimer la viabilité à différentes échelles, de la parcelle au village.

Le terroir choisi est organisé en auréoles, avec une intensification croissante des pratiques de la périphérie vers le village. Trois grandes unités de gestion des terres ont pu être mises en évidence : (1) l'auréole des champs de brousse, soumise à l'agriculture semi-permanente, (2) l'auréole des champs de case, en culture continue grâce à la fumure organique, (3) un bas-fond rizicole périodiquement inondé. Les sols étaient sableux ferrugineux (Lixisols), sauf en bas-fond (Gleysols). La densité de population humaine était de 33 habitants km^{-2} , celle de bovins de 51 unités de bétail tropical km^{-2} .

Une approche parcellaire indique que les stocks dans le système sol-plante (jusqu'à 40 cm de profondeur) étaient de 27,8 tC, 2,03 tN et 17,3 kgP ha^{-1} dans les champs de brousse en arachide et s'élevaient à 54,7 tC, 2,63 tN et 43,5 kgP ha^{-1} dans les jachères âgées de plus de 10 ans, la majorité de l'augmentation ayant lieu dans la biomasse végétale. Dans le sol, la croissance rapide des stocks durant la première année de jachère (20 %) fut suivie par une stagnation (C, N) voire une régression (P). Dans six parcelles de céréales de case, les stocks mesurés étaient supérieurs à ceux des parcelles de cultures de brousse et s'élevaient à 29,9 tC, 2,30 tN et 83 kgP ha^{-1} . L'augmentation des stocks de P_{OD} fut significative à toutes les profondeurs et dans toutes les parcelles. Ce ne fut pas le cas pour le carbone et l'azote, dont la teneur ne s'améliora significativement que dans l'horizon 0-10 cm, et principalement dans les parcelles jouxtant les concessions et recevant les apports de MO minéralement les plus riches. Les stocks de C, N et P les plus élevés furent mesurés dans les rizières, aux sols à texture fine. Un modèle conceptuel a été proposé pour interpréter la faible réponse des stocks de carbone des sols sableux à la jachère et à la fumure, en réévaluant le rôle biologique et thermodynamique joué par le carbone grâce à son recyclage. Dans les sols tropicaux sableux de la zone, la biosphère contrôle fortement les propriétés physiques du sol et la disponibilité en éléments minéraux pour la plante. Les systèmes racinaires

pérennes, ou les apports de fumure organique exogène, sont nécessaires pour maintenir l'intégrité fonctionnelle de l'écosystème sol, car ils fournissent au biote l'énergie et les nutriments nécessaires à son entretien.

Par intégration d'échelle, les stocks moyens contrôlables par la gestion des terres par l'homme furent estimés à 29,7 tC, 1,52 tN et 28,6 kgP ha⁻¹ (horizon 0-20 cm considéré pour le stock du sol) en 1997. Le carbone était stocké principalement dans le sol (50 %), la biomasse aérienne ligneuse (22 %) et les souches (8 %). Les récoltes, l'élevage et la collecte de bois ont représenté respectivement 27, 59 et 14 % des prélèvements de carbone dans l'espace approprié par le village. Les animaux ont assuré 79 à 85 % des restitutions de C, N et P aux parcelles. Par ce système de flux, des quantités importantes de carbone sont apportées aux champs de case (3,8 tC ha⁻¹ an⁻¹), et les pertes d'azote et de phosphore du système furent estimées à seulement 4 kgN et 1 kgP ha⁻¹ an⁻¹, ce qui indique que le terroir est proche de l'équilibre minéral.

Dans les conditions actuelles de croissance démographique, la perte de carbone pourrait cependant atteindre 0,38 tC ha⁻¹ an⁻¹ durant les trois prochaines décennies, tandis que les flux de carbone liés à l'élevage et aux récoltes doubleraient dans le même temps. La viabilité du système pourrait donc être remise en question durant les prochaines années, si aucune intensification des pratiques n'a lieu.

MOTS CLES

Azote, biomasse, carbone, élevage, fertilité, flux, fumier, jachère, matière organique, phosphore, plante, Sénégal, sol, stock, terroir agro-pastoral

ABSTRACT

Organic matter (OM) is a multi-purpose tool in smallholder mixed-farming systems of West African savannas (WAS). It provides people and animals with energy, nutrients and construction materials. Its cycling also ensures the biological maintenance of the system, mainly through fallowing and manuring. In the WAS, population grows faster than yields of food crops. Since access to industrial inputs will remain low in the coming years, OM availability can be used as an indicator of sustainability of local farming systems. Carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P ; total in plant, available in soil and noted P_{OD}) budgets were thus quantified in a tropical mixed-farming system of southern Senegal to assess its viability from the plot to the village levels.

The village territory of the study showed a ring-like, compound-centred organisation. Growing intensification of fertilization and cropping practices, from the periphery to the compounds, led to the distinction of (1) a plateau bush ring under shifting cultivation (2) a compound ring under continuous cultivation receiving manure from night corralling and household wastes (3) lowland, seasonally flooded, rice fields. Soils were sandy Lixisols, except in the lowland (Gleysols). Human and livestock densities were respectively 33 inhabitants and 51 tropical livestock units km^{-2} .

According to the plot study set at the beginning of the rainy season, amounts in plant and soil (down to 40 cm deep) increased from 27.8 tC, 2.03 tN and 17.3 kgP ha^{-1} in groundnut crops of the bush ring to 54.7 tC, 2.63 tN and 43.5 kgP ha^{-1} in fallows aged more than 10 years. Plant biomass accounted for nearly all of the rise. In soil, fast increase within the very first year (+20 %) was followed by stagnation (C, N) or even decrease (P_{OD}) of stocks. In six more or less manured cereal fields of the compound ring, stocks were 29.9 tC, 2.30 tN and 83 kgP ha^{-1} . Large increase of soil P_{OD} stocks in comparison to cropped bush fields was recorded at all depths and in all plots. Although significant, increases of soil C and N stocks were restricted to the 0-10 cm layer, and occurred mainly in fields adjoining farmyards, which received organic inputs with highest chemical inputs. Highest C, N and P amounts were found in lowland rice fields as a result of soil fine texture. To account for the weak response of local sandy soils to management, a plant-soil conceptual model, reassessing the thermodynamical signification of soil organic carbon cycling was proposed. In these tropical sandy soils, biota strongly controls soil physical properties and nutrient availability to plant. Perennial rooting systems, or manure exogenous inputs, are thus needed to sustain the ecosystem structural and functional integrity, since they fuel the soil biota with C-mediated energy and nutrients.

Integrative estimates for manageable stocks of the whole village territory were 29.7 tC, 1.52 tN and 28.6 kgP ha^{-1} (soil stocks : 0-20 cm layer

considered only) in 1997. Main C pools were soil (52 %), woody above-ground biomass (22 %) and stumps (8 %). Crop harvest, livestock, and wood and straw collecting were responsible for respectively 27, 59 and 14 % of the C outflows from the area exploited by the village. Livestock accounted for 79-85 % of the C, N and P returns to the soil. As result of these transfers large C inputs were brought to the compound ring ($3.8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$). N and P depletion of the system amounted to 4 kgN and $1 \text{ kgP ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$, suggesting that the system was close to nutrient balance.

Under current demographic growth rate, simulated C depletion of the village farming system may reach $0.38 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ during the next three decades ; meanwhile ; meanwhile C flows related to livestock activity and crop and wood harvest should double. The viability of the system might thus be called into question within the next few years, if practices of cropping and animal husbandry are not intensified.

KEY WORDS

Biomass, carbon, fallow, fertility, flux, livestock, manure, mixed-farming system, nitrogen, organic matter, phosphorus, plant, Senegal, soil, stock

A mes parents
Aux habitants de Sare Yorobana

AVANT-PROPOS

Ce travail a été réalisé dans le cadre des projets "Raccourcissement du Temps de Jachère, Biodiversité et Développement Durable en Afrique Centrale et de l'Ouest" (TS3-CT93-0220, DG12 HSMU) et "Amélioration et Gestion de la Jachère en Afrique de l'Ouest" (Projet n° 7 ACP RPR 269, DG8) de l'Union Européenne. Ces projets ont été menés depuis 1994 au Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Mali, Niger et Sénégal. Au Sénégal, ces programmes ont fédéré un réseau de recherche et développement ; ils se sont concentrés essentiellement sur la compréhension du fonctionnement de l'écosystème jachère et des systèmes de production alternatifs (activités de recherche), et sur l'introduction de techniques vulgarisables grâce à des contrats avec les organisations rurales (activités de développement). Dans ce pays, le réseau implique à la fois des partenaires locaux tels que l'Institut Sénégalais de Recherche Agricole (ISRA) et des institutions françaises comme l'Institut pour la Recherche en Développement (IRD, ex-ORSTOM, à l'origine de ce projet), et le Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD, France).

Le travail de terrain réalisé au cours de cette thèse s'est déroulé à Sare Yorobana, le plus humide des deux sites choisis par l'équipe de l'IRD pour ses expérimentations au Sénégal. Des études diachroniques et synchroniques ont été -et sont toujours- conduites dans les deux sites. Certaines des mesures synchroniques visant à caractériser les dynamiques des jachères naturelles (chronoséquences) sont relatées dans ce document. Les expérimentations diachroniques ont été mises en place afin d'évaluer l'impact de l'introduction ou de l'élimination de groupes écologiques fonctionnels (arbres, macrofaune du sol, herbacées pérennes, espèces ligneuses fixatrices d'azote) sur les indicateurs de propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol, de biodiversité et de productivité des plantes (1994-1998), ainsi que sur leur effet sur les cultures post jachère (1998-2001).

Au Sénégal et en France, le Programme pour l'"Amélioration de l'Alimentation du Bétail Tropical" (dirigé par le Département EMVT du CIRAD) a apporté un soutien scientifique important à ce travail. Ce Programme est engagé dans l'étude des pratiques traditionnelles d'élevage extensif des petits ruminants et du cheptel bovin en Afrique de l'Ouest, ainsi que dans l'adoption de pratiques nouvelles pour l'amélioration de l'état sanitaire des animaux, de leur productivité et du revenu des éleveurs. Au Sénégal, ces études ont débuté dans le village de Sare Yorobana au milieu des années 1980 ; elles ont fourni toutes les données relatives à l'élevage utilisées dans cette thèse (Chapitres 4 et 5).

L'Institut Sénégalais pour la Recherche Agronomique (ISRA) a été le partenaire local pour ce travail. Sa contribution scientifique a été essentielle, notamment grâce au travail du Dr M. Kaïté sur les dynamiques de la biomasse ligneuse tout au long de la succession cultures - jachère

(Chapitre 1). L'ISRA a aussi fourni un très grand soutien matériel concernant le travail de terrain.

Une part importante des analyses en laboratoire a été financée par l'Action incitative inter-institutionnelle ORSTOM-CNRS-CIRAD-INRA "Biofonctionnement des sols tropicaux et gestion durable des terres".

Les analyses de végétaux et de sols ont été réalisées au laboratoire du Programme de Recherche sur la Jachère en Afrique de l'Ouest de l'IRD, et aux laboratoires d'analyses physico-chimiques de l'IRD de Dakar et de Montpellier et du CIRAD de Montpellier.

L'Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts (ENGREF) est une *"école d'application de l'Ecole polytechnique et de l'Institut national agronomique Paris-Grignon dans sa mission initiale, chargée de former les Ingénieurs du Génie Rural des Eaux et des Forêts ; elle a maintenant élargi ses formations, seule ou en partenariat (formations de 3^{ème} cycle). (...) L'ENGREF est habilitée à délivrer le doctorat dans ses domaines de compétences et développe des collaborations scientifiques avec de nombreux partenaires extérieurs"* (ENGREF, 2000). Le corps du GREF offre annuellement l'opportunité à une dizaine de ses étudiants d'entreprendre une thèse de doctorat. L'étudiant est alors mis à disposition d'un laboratoire de l'ENGREF ou d'un autre institut de recherche (ici l'IRD), par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche qui finance ainsi une partie du travail de recherche effectué.

J'adresse des remerciements particuliers aux membres du jury de thèse qui ont aimablement accepté d'évaluer ce travail et participé à sa soutenance ; certains d'entre eux ont effectué un long voyage pour cette occasion.

La rédaction de cette thèse a été achevée à Montpellier (France), à l'IRD (Laboratoire d'Etude du Comportement des Sols Cultivés) et à l'ENGREF (Département Foresterie Rurale et Tropicale).

Contacts :

. CIRAD-EMVT - Programme pour l'Amélioration de l'Alimentation du Bétail Tropical : Dr Alexandre Ickowicz - CIRAD - LNERV - BP 2057 - Dakar - Sénégal - ☎ : (221) 832 08 21 - Fax : (221) 821 18 79 - ✉ : ickowicz@telecomplus.sn .

. ENGREF - Département Foresterie Rurale et Tropicale : Régis Peltier - ENGREF - BP 5093 - 34033 Montpellier Cedex 1 - France - ☎ : (33) 467 047 120 - Fax : (33) 467 047 101 - ✉ : peltier@engref.fr .

. ENGREF - Directeur Scientifique : Dr Claude Millier - ENGREF - 19, avenue du Maine - 75732 Paris Cedex - France - ☎ : (33) 145 498 918 - Fax : (33) 145 498 827 - ✉ : millier@engref.fr .

. IRD - Laboratoire d'Etude du Comportement des Sols Cultivés : Dr Georges De Noni - IRD - 911, avenue Agropolis - BP 5045 - Montpellier - France - ☎ : (33) 467 416 100 - Fax : (33) 467 547 800 - ✉ : denoni@mpl.ird.fr .

. IRD - Programme de Recherche sur la Jachère en Afrique de l'Ouest: Dr
Christian Floret - IRD - BP 1386 - Dakar - Sénégal - ☎ : (221) 832 34 80 -
Fax : (221) 832 26 98 - ✉ : floret@ird.sn .

. ISRA - Programme de Recherche sur la Jachère en Afrique de l'Ouest: Dr
Malaïny Diatta - ISRA - BP 1999 - Kaolack - Sénégal - ☎ : (221) 832 34 80 -
Fax : (221) 996 11 52 - ✉ : diatta@ird.sn .

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	3
RÉSUMÉ	3
ABSTRACT	7
AVANT-PROPOS	11
TABLE DES MATIÈRES	15
CHAPITRE 0. INTRODUCTION	21
0.1. Polyvalence du carbone dans l'écosystème	21
0.1.1. Le sixième élément	21
0.1.2. Rôle statique du carbone organique	21
0.1.3. Rôle dynamique du carbone organique	22
0.1.4. Rôle du carbone dans l'écosystème Terre	22
0.2. Spécificité du rôle de la matière organique dans le fonctionnement des systèmes agropastoraux traditionnels en Afrique subsaharienne	22
0.2.1. La biomasse végétale : un outil à usages multiples	22
0.2.2. Statut organique et qualité du sol	23
0.2.3. Pertinence de la disponibilité en matière organique comme indicateur de viabilité des systèmes de production ouest-africains	24
0.3. La raréfaction croissante de la ressource organique dans les systèmes agricoles des savanes ouest-africaines, conséquence de changements climatiques et anthropiques	25
0.3.1. Croissance démographique et changement d'utilisation de l'espace	25
0.3.2. Déséquilibre entre offre et besoin en matière organique	25
0.3.3. Agriculture traditionnelle ouest-africaine, séquestration du carbone et changement global	26
0.4. Objectifs de l'étude	27
0.4.1. Hypothèses de travail : le carbone, un attribut vital de l'écosystème villageois	27
0.4.2. Une approche spatiale intégratrice	27
0.4.3. Choix du site d'étude	28
0.4.4. Organisation de la thèse	29

PARTIE I. STATUT ORGANIQUE DES AGROÉCOSYSTÈMES D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE : APPROCHE PARCELLAIRE	31
CHAPITRE 1. DISTRIBUTION DU CARBONE, DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE DANS LES AGROÉCOSYSTÈMES D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE - I. LA COMPOSANTE VÉGÉTALE SOUS CULTURE SEMI-PERMANENTE.....	33
1.1. Introduction.....	37
1.2. Méthodes.....	40
1.2.1. Caractéristiques du site.....	40
1.2.2. Echantillonnage	42
1.2.3. Analyses végétales	44
1.2.4. Etude du devenir de la biomasse végétale aérienne post-jachère.....	44
1.2.5. Analyse des données	45
1.3. Résultats	46
1.3.1. Tendances générales.....	46
1.3.2. Ajustement des dynamiques temporelles du carbone, de l'azote et du phosphore dans la biomasse végétale au modèle logistique pendant la jachère	48
1.3.3. Analyses statistiques	51
1.3.4. Dynamique post-jachère de la biomasse végétale aérienne.....	53
1.4. Discussion	54
1.4.1. La jachère comme écosystème productif	55
1.4.2. Rôle de la biomasse végétale dans le maintien de la fertilité des agroécosystèmes.	56
1.5. Conclusion.....	58
CHAPITRE 2. DISTRIBUTION DU CARBONE, DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE DANS LES AGROÉCOSYSTÈMES D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE - II. LA COMPOSANTE SOL SOUS CULTURE SEMI-PERMANENTE	61
2.1. Introduction.....	65
2.2. Méthodes.....	67
2.2.1. Caractéristiques du site.....	67
2.2.2. Echantillonnage	68
2.2.3. Analyses de sol.....	69
2.2.4. Décomposition in situ de racines	71
2.2.5. Analyses des données	71

2.3. Résultats	72
2.3.1. Propriétés du sol et mise en jachère	72
2.3.2. Qualité de la matière organique du sol	77
2.3.3. Modes de stockage du carbone, de l'azote et du phosphore assimilable du sol pendant la succession culture-jachère	79
2.3.4. Dynamique post-jachère de la biomasse racinaire.....	82
2.4. Discussion	83
2.4.1. Tendances générales de la dynamique du carbone, de l'azote et du phosphore assimilable dans le sol	83
2.4.2. Influence des propriétés intrinsèques du sol	84
2.4.3. Bilan minéral du système culture-jachère.....	85
2.4.4. Statut organique du sol après abandon des cultures	85
2.4.5. La jachère, un outil pour rétablir le contrôle biologique de la fertilité de l'écosystème	87
2.4.6. La gestion de la jachère en Afrique de l'Ouest dans une perspective de changement global	88
CHAPITRE 3. DISTRIBUTION DU CARBONE, DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE DANS LES AGROÉCOSYSTÈMES D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE - III. LES COMPOSANTES PLANTE ET SOL SOUS CULTURE CONTINUE.....	91
3.1. Introduction.....	95
3.2. Méthodes.....	97
3.2.1. Caractéristiques du site.....	97
3.2.2. Echantillonnage	99
3.2.3. Analyses végétales et pédologiques	100
3.2.4. Analyses des données.....	101
3.3. Résultats	102
3.3.1. Stocks de carbone, d'azote et de phosphore dans la biomasse des champs cultivés	102
3.3.2. Stocks de carbone, d'azote et de phosphore dans le sol des champs en culture	105
3.3.3. Statut organique du sol en relation avec les autres propriétés du sol.....	106
3.3.4. Influence de l'intensité de culture sur le statut organique et les autres propriétés du sol	108
3.3.5. influence de la gestion des apports organiques sur le statut organique du sol	113

3.4. Discussion	115
3.4.1. La biomasse des cultures, un outil à usages multiples pour l'agriculture.....	115
3.4.2. Gestion des terres et propriétés du sol	116
3.4.3. Une approche à l'échelle du village : complémentarité agroécologique des systèmes de culture continue et semi-permanente	118
3.4.4. Considérations méthodologiques : pertinence de la matière organique du sol comme indicateur de la qualité du sol et de la durabilité agricole.....	119
3.4.5. Gestion de la matière organique dans les systèmes de culture des savanes et cycle global du carbone.....	122
PARTIE II. STATUT ORGANIQUE DES AGROÉCOSYSTÈMES D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE : APPROCHE TERROIR	125
CHAPITRE 4. BILANS SPATIALISÉS DE CARBONE, D'AZOTE ET DE PHOSPHORE À L'ÉCHELLE D'UN TERROIR DE SAVANE OUEST-AFRICAINE - I. LES STOCKS	127
4.1. Introduction.....	131
4.2. Méthodes.....	133
4.2.1. Caractéristiques du site.....	133
4.2.2. Caractérisation du système de production.....	135
4.2.3. Evaluation des stocks de carbone, d'azote et de phosphore à l'échelle du terroir villageois	136
4.2.4. Prédiction de l'évolution du statut du carbone dans le village	138
4.3. Résultats	140
4.3.1. Organisation spatiale des systèmes de production	140
4.3.2. Organisation sociale.....	144
4.3.3. Stockage de matière sèche, de carbone, d'azote et de phosphore à l'échelle du village.....	146
4.3.4. Perspectives sur les futurs stocks de carbone	153
4.4. Discussion	156
4.4.1. Organisation sociale et dynamique du système de production	156
4.4.2. Interrelations entre les fonctions agroécologiques des systèmes de gestion de l'espace et leur statut en carbone, en azote et en phosphore en début de saison sèche	157
4.4.3. Une capacité de stockage du carbone du système de production villageois actuellement limitée	151
4.4.4. Evolution future des stocks de carbone	160
4.4.5. Considérations méthodologiques sur l'estimation des bilans de carbone et d'éléments minéraux à l'échelle du village.....	162

CHAPITRE 5. BILANS SPATIALISÉS DE CARBONE, D'AZOTE ET DE PHOSPHORE À L'ÉCHELLE D'UN TERROIR DE SAVANE OUEST-AFRICAINE - II. LES FLUX	165
5.1. Introduction.....	169
5.2. Méthodes.....	171
5.2.1. Caractéristiques du site.....	171
5.2.2. Quantification et spatialisation des flux de carbone, d'azote et de phosphore.....	172
5.2.3. Prévion des flux de carbone	174
5.3. Résultats	175
5.3.1. Flux actuels de carbone, d'azote et de phosphore.....	175
5.3.2. Prédiction des futurs flux sortants de carbone	186
5.4. Discussion	187
5.4.1. Contrôle des flux par les stocks : les transferts liés à l'élevage	187
5.4.2. Contrôle des flux par les stocks : parcage nocturne et rendement en céréales	188
5.4.3. Bilan global de carbone et des éléments minéraux de l'agroécosystème villageois	189
5.4.4. Tendances futures de la gestion des ressources en carbone.....	192
CHAPITRE 6. DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION.....	195
6.1. Bases agroécologiques de la viabilité des systèmes agropastoraux actuels de Sare Yorobana	195
6.1.1. Stockage du carbone et des éléments minéraux.....	195
6.1.2. Flux et cycles	196
6.1.3. Diversité fonctionnelle et spatiale.....	198
6.1.4. Disponibilité en terre et en animaux.....	199
6.1.5. Efficacité	199
6.1.6. Conclusion sur le système actuel.....	200
6.2. Tendances futures de l'évolution du système de production de Sare Yorobana	200
6.2.1. Alternatives techniques de gestion	201
6.2.2. Déterminants humains locaux	202
6.2.3. Sare Yorobana dans une perspective globale	203
6.3. Limites de l'étude et orientations de la recherche	205
6.3.1. Quelques facteurs non pris en compte influençant la viabilité du système ...	205
6.3.2. Besoins en recherche agroécologique	206
6.3.3. Recherche exploratoire	207

RÉFÉRENCES	209
ABRÉVIATIONS	237
TABLE DES TABLEAUX	239
TABLE DES FIGURES	243
ANNEXES	247

INTRODUCTION

0.1. POLYVALENCE DU CARBONE DANS L'ECOSYSTEME

0.1.1. Le sixième élément

Chimiquement, le carbone (C) est le sixième élément de la table périodique et le sixième élément le plus abondant dans l'univers, mais seulement le dix-neuvième de la croûte terrestre en terme de masse (The New Encyclopaedia Britannica, 1990). Cependant, le carbone est le seul des éléments chimiques dont *"les atomes possèdent la capacité quasi infinie de s'unir entre eux pour former de longues chaînes"* (caténation), ou de s'unir avec d'autres éléments. Les quatre liaisons de l'atome de carbone constituent un tétraèdre qui permet aux molécules à squelette carboné d'adopter des configurations spatiales tridimensionnelles infinies ; il en résulte des structures organisées et stables capables de stocker et d'échanger facilement des éléments minéraux, de l'énergie et de l'information.

0.1.2. Rôle statique du carbone organique

La majeure partie du carbone de la biomasse vivante est stockée dans les parois cellulaires végétales. Son rôle est alors de soutenir physiquement l'architecture végétale et de canaliser l'énergie, les nutriments et l'eau (Mohr et Schopfer, 1995).

Dans le sol, le carbone organique est essentiellement constitué, en terme de masse, d'un important continuum non vivant de composés organiques issus de résidus végétaux provenant de la décomposition des litières du sol et du sous-sol, des exudats des racines et des déjections de la faune et des micro-organismes, et de composés humiques liés à des particules minérales fines ; l'ensemble forme le complexe organo-minéral (Bonneau et Souchier, 1994). Ce complexe joue de multiples rôles statiques dans le sol : stockage et échange d'éléments minéraux, contribution à la capacité d'échange cationique, amélioration de l'agrégation, de la porosité et du régime hydrique du sol (Tiessen *et al.*, 1994 ; Syers et Craswell, 1995 ; Kay, 1998).

0.1.3. Rôle dynamique du carbone organique

Grâce à la capacité du carbone à se lier à d'autres éléments à un coût énergétique faible, la matière organique est également essentielle pour le recyclage des nutriments du système sol-plante (Begon *et al.*, 1998). Le transfert d'énergie dans et entre les organismes vivants est aussi un rôle dynamique et écologique majeur du carbone (Lamotte et Bourlière, 1978 ; Begon *et al.*, 1998). Un flux constant d'énergie et donc de carbone à travers les êtres vivants (Mohr and Schopfer, 1995) et les systèmes (Odum, 1969 ; Perry *et al.*, 1989) est nécessaire pour la conservation de leur structure et de leur fonctionnement, car les êtres et les communautés biologiques sont des systèmes thermodynamiques ouverts maintenus loin de l'équilibre (Toussaint et Schneider, 1998 ; Straskraba *et al.*, 1999). Ceci s'applique aussi au sol, dans lequel les apports de carbone de la litière sont à l'origine de chemins trophiques complexes impliquant une redistribution en énergie et en éléments minéraux à des niveaux trophiques successifs (Anderson, 1995 ; Neher, 1999).

0.1.4. Rôle du carbone dans l'écosystème Terre

Sur les 45000 Gt de carbone ($1 \text{ Giga} = 10^9$) intervenant dans les cycles biogéochimiques de la Terre, 2000 à 2200 sont stockés dans la biosphère terrestre, dont 610 à 640 résideraient dans la végétation, et le reste dans la matière organique du sol et les déchets (Eswaran *et al.*, 1993 ; Schimel, 1995 ; Cao et Woodward, 1998).

Bien que modeste par sa contenance en carbone (750 GtC), le réservoir atmosphérique suscite de plus en plus l'attention des scientifiques, du fait de l'augmentation annuelle de 3,2 GtC survenue durant les années 1980, résultant d'émissions anthropiques de carbone fossile ($5,56 \text{ Gt an}^{-1}$) et de la déforestation tropicale ($1,6 \text{ Gt an}^{-1}$) (Houghton, 1995 ; Schimel, 1995). Et les formes gazeuses du carbone (CO_2 , CH_4 principalement) contribuent pour plus de la moitié au forçage radiatif dans l'atmosphère lié aux gaz à effet de serre émis par les activités humaines (Lambert, 1992).

0.2. SPECIFICITE DU ROLE DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LE FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES AGROPASTORAUX TRADITIONNELS EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE

0.2.1. La biomasse végétale : un outil à usages multiples

La biomasse végétale locale procure l'essentiel des besoins des agriculteurs dans les systèmes de production traditionnels d'Afrique tropicale :

- (1) tant que la production vivrière couvre les besoins métaboliques des populations humaines, l'autoconsommation alimentaire est la règle dans les systèmes de production ouest-africains (Kowal et Kassam, 1978),
- (2) l'alimentation du bétail repose uniquement sur la production endogène de fourrage, excepté lorsque la complémentation (résidus industriels tels que tourteaux d'arachide ou de coton) est organisée par les structures d'encadrement technique (Ruthenberg, 1971 ; Powell et Williams, 1994),
- (3) quatre vingt dix pour cent de la consommation domestique d'énergie de l'Afrique subsaharienne (ASS) provient du bois de feu (Bremen et Kessler, 1995).

0.2.2. Statut organique et qualité du sol

La plupart des sols des savanes ouest-africaines (SOA) sont situées sur des roches mères granitiques ou métamorphiques du Précambrien ancien, ou sur des sédiments clastiques consolidés (Menaut *et al.*, 1985 ; Bertrand, 1998). En conséquence, ces sols ont subi une érosion et un lessivage prolongé, privant leurs horizons supérieurs diminuant leur contenu en nutriments et en éléments fins. Ainsi, la plupart des sols présentent aujourd'hui un statut chimique pauvre et une texture grossière en surface, sauf en bas de pente argileux.

Parallèlement, l'ASS héberge 10 % de la population mondiale mais a participé pour moins de 1 % à la consommation mondiale en engrais chimiques durant la dernière décennie (FAO, 1998a ; UNDP, 1999). Ceci suggère que les paysans sont encore loin de pouvoir utiliser massivement des intrants exogènes massifs pour surmonter les contraintes locales intrinsèques des sols (Naseem et Kelly, 1999), d'où la nécessité d'un recyclage rigoureux des nutriments locaux.

Dans ces conditions, la matière organique du sol (MOS) est capitale pour assurer les propriétés de ces sols sableux tropicaux telles que (Jones et Wild, 1975 ; Coleman *et al.*, 1989 ; Pieri, 1989 ; van Wambeke, 1991 ; Swift et Wooster, 1993 ; Feller, 1995a ; Asadu *et al.*, 1997) :

- la capacité d'échange cationique (CEC). Du fait du faible taux d'argile et de la nature de l'argile prédominante (kaolinite), l'essentiel de la CEC du sol repose sur la matière organique du sol,
- la disponibilité en nutriments (N et P), susceptibles d'être protégés du lessivage dans les débris végétaux,
- l'approvisionnement en énergie de la faune et de la microflore du sous-sol, qui assiste la MOS dans la plupart de ses fonctions et contrôle directement les autres propriétés du sol telles que sa porosité, sa stabilité, et la disponibilité en nutriments.

0.2.3. Pertinence de la disponibilité en matière organique comme indicateur de viabilité des systèmes de production ouest-africains

0.2.3.1. Considérations conceptuelles

Les systèmes agropastoraux des SOA sont -et devraient le rester pendant plusieurs années-, des systèmes autarciques puisque leur dynamique est fondée sur la *"maintenance biologique"*, *"le produit des propriétés de l'écosystème"* (Izac, 1997a). Dans ces systèmes, une *"maintenance de substitution"* (activités de gestion) telle que la fumure, les soins aux cultures et aux animaux, joue un rôle vital, mais reste très dépendante d'une bonne maintenance biologique. Cette dernière est assurée par le *"biote de ressource"* défini par Swift et Anderson (1994) comme *"l'ensemble des organismes contribuant de façon positive à la productivité du système sans toutefois générer de produit directement utilisable par l'exploitant"*. Ces auteurs distinguent aussi le *"biote de production"* qui englobe les *"cultures, les végétaux et le bétail produisant de la nourriture, les fibres et autres produits pour l'autoconsommation, l'usage ou la vente"*. Dans les systèmes agropastoraux locaux à faibles intrants, la différence entre les biotes de production et de ressource n'est pas toujours évidente ; par exemple, le bétail appartient clairement aux deux biotes à la fois, puisqu'il fournit non seulement de la viande et des produits laitiers, mais aussi du fumier.

0.2.3.2. La matière organique : une ressource et un indicateur

La matière organique (MO) produite dans les systèmes agricoles des SOA n'est pas simplement destinée à la satisfaction des besoins alimentaires et monétaires des agriculteurs. Dans cette zone, la gestion de la fertilité des sols repose essentiellement sur les pratiques de jachère et de fumure. Ces pratiques organiques constituent à la fois des processus de transferts verticaux (jachère) et horizontaux (fumure) de carbone et de nutriments. (Floret *et al.*, 1993 ; Powell and Williams, 1994). Elles garantissent le recyclage biologique d'une énergie de grande qualité et d'éléments minéraux nécessaires aux biotes de ressource et de production (hommes, animaux, végétaux et sol). La matière organique peut, donc, être considérée comme une ressource, *"forme de l'énergie et (ou) de la matière qui est indispensable au fonctionnement des organismes, des populations et des écosystèmes"* (Ramade, 1981).

Dans les écosystèmes, les schémas de recyclage du carbone apportent beaucoup d'informations sur la santé des écosystèmes (productivité et stabilité) (Odum, 1969). Par exemple, dans le cadre de l'écologie de la restauration, Aronson *et al.* (1993) retiennent trois attributs vitaux des écosystèmes liés au cycle du carbone : la productivité de la biomasse, le stockage de la biomasse et le taux de MOS. Puisque le fonctionnement des systèmes de production des SOA repose sur leurs propres ressources, et selon tout ce qui précède, la disponibilité et l'usage de la matière

organique peuvent être considérés comme des indicateurs de la santé des agroécosystèmes locaux et, dans une perspective plus dynamique, de leur viabilité, c'est-à-dire de leur capacité à procurer des produits (nourriture, fourrage, bétail, bois, ...) et des moyens de production (bétail, fumier, ordures ménagères) à un niveau donné, pour une situation donnée, pendant une période de plusieurs années.

0.3. LA RAREFACTION CROISSANTE DE LA RESSOURCE ORGANIQUE DANS LES SYSTEMES AGRICOLES DES SAVANES OUEST-AFRICAINES, CONSEQUENCE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ANTHROPIQUES

0.3.1. Croissance démographique et changement d'utilisation de l'espace

Avec moins de 40 hab. km⁻², l'ASS reste un continent faiblement peuplé (Ker, 1995). Cependant, le taux de croissance démographique y est le plus élevé du monde (2,8 % entre 1970 et 1995, UNDP 1999). La réponse des populations rurales à cette évolution s'est généralement déroulée en trois étapes, illustrées à travers l'histoire de l'agriculture dans le monde (Mazoyer et Roudard, 1997), et confirmées par des études de cas en ASS (Vierich et Stoop, 1990 ; Lericollais et Milleville, 1993 ; Meertens *et al.*, 1996 ; Fanchette, 1999b) :

- extension des cultures aux dépens des jachères, des savanes et des forêts,
- exode vers les centres urbains et les aires moins peuplées,
- intensification des techniques culturales (engrais, intégration accrue de l'agriculture et de l'élevage, et agroforesterie...).

Chaque phase correspond plus ou moins à un seuil de disponibilité plus élevé en main d'œuvre et déclinant en terres. Ce modèle général linéaire de l'évolution de l'utilisation des terres montre bien sûr des variations dues à des facteurs locaux et régionaux de disponibilité des terres ; mais il s'est avéré pertinent pour la plupart des SOA (Pieri, 1989).

0.3.2. Déséquilibre entre offre et besoin en matière organique

Au Sénégal, comme dans les autres régions de SOA à climat tropical sec, le changement d'utilisation des terres a nuit à la disponibilité de la matière organique, quelque soit sa forme, du fait (1) de la diminution des temps et des surfaces en jachère, (2) du recul des terres marginales (3) de la

croissance des exportations des cultures (gousses d'arachide et feuillage) (4) de la baisse de la teneur en MOS due à une intensification croissante des cultures, à une réduction des restitutions organiques au sol, à une augmentation de l'érosion et de l'oxydation résultant du fonctionnement thermohydrigue des sols et des pratiques de labour (Pieri, 1989 ; Floret *et al.*, 1993 ; Ker, 1995).

Les conséquences ne se traduisent pas seulement par la baisse de la disponibilité de la biomasse, mais aussi par le risque de perdre les moyens de production de celle-ci, puisque les possibilités de pratique de la jachère et de la fumure sont remises en question par le changement d'utilisation des terres. Cette crise organique est exacerbée par l'impasse dans laquelle l'ASS a été placée par l'application des programmes d'ajustement structurel. La suppression des subventions sur les engrais a conduit à une chute de la consommation d'engrais et à une agriculture de type minier en Afrique de l'Ouest (van der Pol, 1992 ; Mwangi, 1997). Pour cette raison, les programmes de recherche et de développement agricole se sont concentrés sur les moyens d'augmenter les cultures vivrières en utilisant les pratiques de fertilisation endogènes, à savoir le recyclage de la matière organique produite sur place, de l'échelle de la parcelle à celle du village (Pieri, 1989 ; Bekunda et Woome, 1996 ; Defoer *et al.*, 1998 ; Dugué, 1998a ; Woome *et al.*, 1998 ; Bosma *et al.*, 1999 ; Dugué, 2000).

0.3.3. Agriculture traditionnelle ouest-africaine, séquestration du carbone et changement global

Prendre en compte l'impact possible de l'utilisation des terres dans les SOA sur les changements globaux pour définir de nouvelles pratiques pertinentes de culture et d'élevage peut sembler théorique et critiquable à première vue. La satisfaction des besoins en terres et l'accroissement dû niveau de vie minimum doivent, en effet, être au centre des priorités réelles de toute politique locale de développement. Cependant, selon ce qui précède, et comme le montrent Woome *et al.* (1998) par des études de cas en Afrique Centrale et de l'Est, l'amélioration du stockage du carbone devrait aider à maintenir des systèmes de production et à rehausser le niveau de vie des petits exploitants africains.

D'un autre côté, il est maintenant reconnu que les trajectoires d'évolution des systèmes de production, y compris des systèmes de subsistance, sont profondément influencées par des facteurs contextuels indépendants du contrôle des paysans, comme les politiques d'investissement rural, la disponibilité de technologies et d'intrants adaptés. Il est presque acquis que l'établissement d'un marché de permis de pollution sera un outil préférentiel afin de contrôler les émissions de gaz à effet de serre (Frommel, 1999). De telles dispositions influenceront sans doute significativement les pratiques paysannes en Afrique, en supposant que des incitations économiques soient proposées aux agriculteurs les plus pauvres pour qu'ils adoptent des pratiques de séquestration du carbone (Izac et Swift, 1994).

0.4. OBJECTIFS DE L'ETUDE

0.4.1. Hypothèses de travail : le carbone, un attribut vital de l'écosystème villageois

Le travail présenté ici est une contribution à (1) l'évaluation de la dépendance de la viabilité des systèmes agropastoraux extensifs des SOA vis à vis de leur dynamique écologique, (2) la prévision des tendances d'évolution de ces systèmes soumis à des contraintes basiques telles que la pression démographique et le contrôle par les dynamiques écologiques.

Pour cela, nous nous sommes intéressés en particulier à la dynamique de la ressource en matière organique à la fois dans le sol et dans la plante, dans un village du sud du Sénégal. Bien que les bilans organiques présentés ici, menés à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du village, aient été tout d'abord estimés en terme de matière sèche (matière organique fraîche moins le contenu en eau, noté MS) et de matière organique (MS hors cendre), nous avons essayé d'exprimer les bilans organiques en masse de carbone grâce à une mesure presque exhaustive du taux de carbone de chaque composante, et aux données bibliographiques disponibles. Bien que moins opérationnelle qu'un bilan en MS (la plupart des manuels techniques relatifs aux cultures, à l'élevage et à la foresterie se réfèrent à des quantités de MS), une telle conversion en équivalent carbone est nécessaire avant toute quantification des échanges entre les différents compartiments organiques. En effet, le taux de cendres varie beaucoup selon les réservoirs de carbone, selon la présence de terre et de poussière (racines, fumier bovin), et la teneur en éléments "biologiquement inertes" (silice), qui peuvent représenter une part significative du produit organique.

Selon ce qui précède, de multiples rôles de la matière organique sont impliqués dans la préservation des composantes biologiques des systèmes de production. Ainsi, la qualité de la MO doit aussi être prise en compte dans les bilans en carbone. C'est pourquoi des bilans ont aussi été réalisés pour l'azote (N) et le phosphore (P), la disponibilité de chacun des éléments étant l'obstacle chimique principal pour l'intensification de l'agriculture dans les SOA (Jones and Wild, 1975 ; Bekunda *et al.*, 1997).

Après l'étude des dynamiques du carbone, de l'azote et du phosphore, nous avons dû négliger le rôle d'autres variables telles que la biodiversité et les contraintes hydriques afin d'évaluer la productivité et la viabilité des systèmes de production ; ceci est discuté dans les chapitres suivants et dans la conclusion générale de ce travail.

0.4.2. Une approche spatiale intégratrice

Dans un premier temps (Partie I), nous étudions le statut biologique des principaux agroécosystèmes du village en matière d'utilisation des terres et de gestion de la fertilité. Les principaux systèmes analysés ont été les

jachères (11 parcelles), les cultures de rente après défriche - brûlis (six parcelles), et les cultures vivrières pluviales sous culture continue (deux parcelles). Cette approche parcellaire a été motivée par deux objectifs. Le premier a été de comprendre comment les composantes organiques interagissent entre elles, coopèrent pour produire une biomasse utile, contrôlent la qualité du sol, et dépendent des propriétés intrinsèques du sol.

Le second objectif a été d'établir des bilans précis de carbone, d'azote et de phosphore à l'échelle du terroir villageois (Partie II), en reliant des variables facilement mesurables (temps de jachère, rendement, intensité des cultures, gestion de la fertilité, tenure foncière) à des estimations pour les autres réservoirs organiques.

Le recours à l'échelle villageoise a aussi servi à améliorer l'évaluation de la viabilité des systèmes de production (Pieri, 1989 ; Landais et Lhoste, 1993 ; Izac and Swift, 1994), car (1) les systèmes de gestion de l'espace sont interconnectés du point de vue minéral, (2) la tenure foncière et la gestion des terres sont souvent sous le contrôle de la communauté dans les sociétés d'Afrique de l'Ouest, spécialement au niveau des lignages et des villages. Mais il faut retenir que l'intégration de plusieurs échelles nécessitent des simplifications des facteurs descriptifs et des déterminants de la dynamique de la matière organique à l'échelle de la parcelle.

Pour en terminer avec l'organisation de cette étude, nous pensons que la modélisation informatique pouvait être utilisée comme un moyen de formaliser des connaissances de terrain et de prévoir les trajectoires possibles d'évolution des systèmes de production. Un premier essai est présenté dans la seconde partie du travail, utilisant des relations empiriques entre la densité de population, la disponibilité en animaux, les besoins alimentaires et monétaires et enfin la gestion des terres ; ceux-ci, en retour, pilotent les stocks et les flux de carbone qui sont susceptibles de se produire dans les prochaines années dans les SOA.

0.4.3. Choix du site d'étude

Ce travail a été conduit dans le village de Sare Yorobana, appartenant à l'arrondissement de Dioulacolon, département de Kolda, région de Haute-Casamance, République du Sénégal. Ses coordonnées sont : 12°49'N 14°53'O (voir Figure 0.1).

Ce village a été choisi principalement parce qu'il est le site d'étude de deux autres programmes de recherche, zootechnique et agroécologique, déjà en place depuis plusieurs années (voir Avant-Propos). D'importantes quantités de données provenant de différentes disciplines étaient nécessaires pour ce travail et beaucoup ont été fournies par les deux programmes. La région en elle-même possède deux autres qualités pour l'étude des évolutions actuelles et futures de la dynamique de la MO dans les systèmes agropastoraux africains. Tout d'abord, les agriculteurs de Haute-Casamance sont des éleveurs Peulh qui se sont fixés depuis plusieurs décennies et se sont

consacrés à la fois à l'agriculture et à l'élevage, intégrant fortement ces deux activités dans leurs systèmes de production. Enfin, il existe encore dans ce village de grandes surfaces de terres cultivables et de parcours ; cette région peut donc être considérée comme représentative des régions rurales surpeuplées de la ceinture des SOA ; elle constitue aussi un bon point de départ pour l'étude de l'évolution des systèmes de production traditionnels sur plusieurs décennies (dans une perspective de modélisation exploratoire).

0.4.4. Organisation de la thèse

Le travail présenté ici a été soumis (Partie I), ou va l'être (Partie II), pour publication dans des revues scientifiques d'agroécologie. C'est pourquoi les chapitres ont été présentés de la façon la plus autonome possible ; des redondances n'ont pu être évitées essentiellement au niveau des informations contenues dans les chapitres "Introduction" et "Méthodes". Pour la même raison, certaines données ont dû être présentées de façon synthétique, d'où de nombreuses références aux données complètes, relatées dans les annexes.

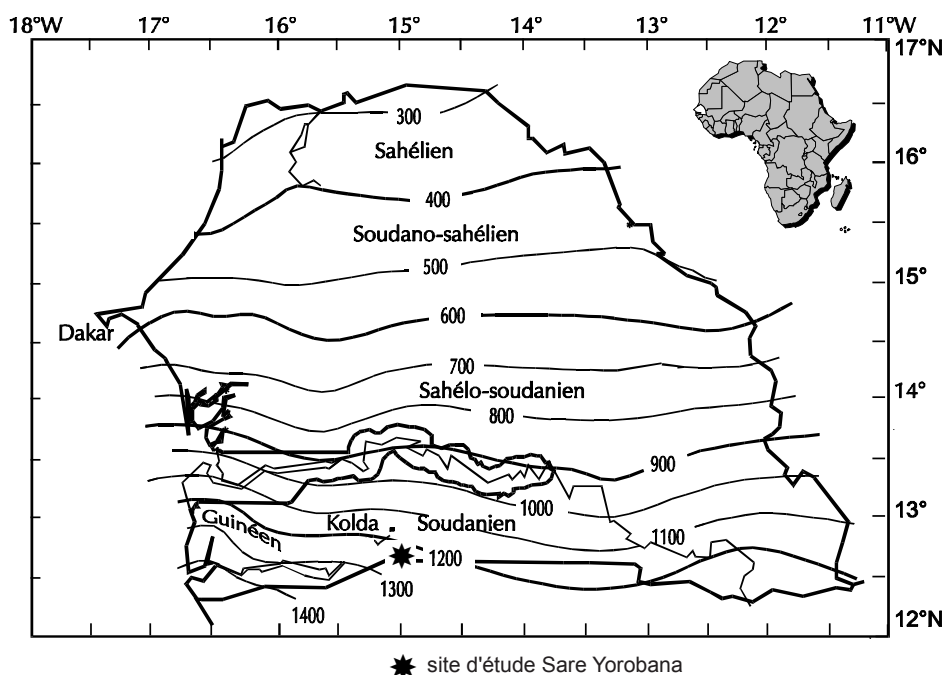


Figure 0.1 Localisation du site de Sare Yorobana (12°49'N 14°53'O) au Sénégal, Afrique de l'Ouest.

A person wearing a patterned headwrap and a long, light-colored robe is walking through a field of tall, dry grass. The person is seen from the side, moving towards the left. The background is a vast field of similar grass under a bright sky.

PARTIE I.

STATUT ORGANIQUE DES AGROECOSYSTEMES D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE :

APPROCHE PARCELLAIRE

CHAPITRE 1.

DISTRIBUTION DU CARBONE, DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE DANS LES AGROÉCOSYSTÈMES D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE

I - LA COMPOSANTE VEGETALE SOUS CULTURE SEMI-PERMANENTE



Jachère de 15 ans à Sare Yorobana

CHAPITRE 1.

DISTRIBUTION DU CARBONE, DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE DANS LES AGROÉCOSYSTÈMES D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE

I . LA COMPOSANTE VEGETALE SOUS CULTURE SEMI-PERMANENTE

Accepté dans "Agriculture Ecosystems & Environment"

Raphaël J. MANLAY ^{a,b}, Maguette KAIRÉ ^c, Dominique MASSE ^a, Gilles CIORNEI ^a et Christian FLORET ^a

^a IRD, BP1386, Dakar, Sénégal

^b mis à disposition par l'ENGREF, BP 5093, 34033 Montpellier Cedex 1, France

^c ISRA, BP2312 Dakar, Sénégal

RESUME

La distribution de la matière sèche (MS), du carbone (C), de l'azote (N) et du phosphore (P) dans la biomasse végétale de l'agriculture semi-permanente des savanes du Sud du Sénégal, a été quantifiée au moyen d'une chronoséquence de 25 parcelles d'arachide et de jachères âgées de 1 à 26 ans. Les stocks dans les cultures sont de 14,7 tMS, 5,5 tC, 106 kgN et 5,9 kgP par hectare. Ils augmentent jusqu'à 48 tMS, 17,7 tC, 231 kgN et 19,6 kgP dans les jachères âgées de 1 à 9 ans. Un seuil est atteint après 10 ans de jachère. Au-delà de ce seuil, les stocks de biomasse restent stables. Les plus vieilles jachères stockent 79,2 tMS, 29 tC, 333 kgN et

33,8 kgP. Des augmentations importantes dans le compartiment ligneux sont enregistrées pendant la première année de jachère, et ont lieu aux dépens de la strate herbacée. L'allocation de carbone et de nutriments à la biomasse souterraine n'intervient que plus tard, comme en témoignent les modèles logistiques et l'évolution du rapport tige/racine. Des simulations indiquent que des pertes abondantes de nutriments apparaissent au moment de la coupe, tant du fait du brûlis que de l'exportation du bois.

Les stocks en biomasse ligneuse et herbacée restant stables dans les jachères de plus de 10 ans, les jeunes jachères présentent des productivités plus intéressantes pour le bois et le fourrage. Cependant, du fait que cette productivité repose sur une grande capacité de repousse des espèces ligneuses locales, et que cette capacité ne peut être maintenue que grâce à de longues périodes de jachère, une amélioration de la gestion des jachères, ou une substitution par des techniques agroforestières devraient s'efforcer de préserver les systèmes racinaires pérennes dans les systèmes de culture-jachère des savanes ouest-africaines.

MOTS CLE

Biomasse végétale, Carbone, Azote, Phosphore, Racine, Savane, Sénégal, Culture semi-permanente

1.1. INTRODUCTION

Des températures et un ensoleillement favorables permettent une productivité primaire nette potentielle élevée en milieu tropical. Cependant, des contraintes comme la propagation des adventices, et la vitalité des nuisibles et des maladies freinent sérieusement l'efficacité de l'agriculture tropicale (Ruthenberg, 1971). Dans la ceinture des savanes ouest-africaines, d'autres obstacles biophysiques à l'agriculture et à l'élevage sont : des précipitations irrégulières et saisonnières, des sols sensibles à l'érosion et pauvres en éléments minéraux (Jones and Wild, 1975 ; Kowal and Kassam, 1978). Une force de travail très faible due à une faible mécanisation, un accès limité aux intrants chimiques et la tenure foncière collective sont les principaux facteurs humains qui, avec les contraintes naturelles, expliquent les choix locaux pour des pratiques agricoles et d'élevage diversifiées et peu exigeantes en travail (Ker, 1995). Excepté dans quelques zones de culture irriguée, la fertilité des sols dans les systèmes de production traditionnels est maintenue par des pratiques essentiellement organiques. Dans la majorité de la sous-région, c'est le rôle traditionnel des pratiques de fumure, de paillage et, dans une moindre mesure, de compostage (Ruthenberg, 1971). Ces techniques se sont révélées adaptées aux zones faiblement peuplées et ont engendré l'organisation spatiale en auréole des villages africains (Pélissier, 1966 ; Ruthenberg, 1971 ; Prudencio, 1993).

Trois principales auréoles sont distinguées (Figure 1.1) :

- (1) l'auréole des savanes ou des forêts, qui n'a jamais été cultivée -du moins pendant plusieurs décennies. Constituant l'auréole la plus éloignée du village, son intégration au système de production est faible, bien que la savane fournisse du bois, et des

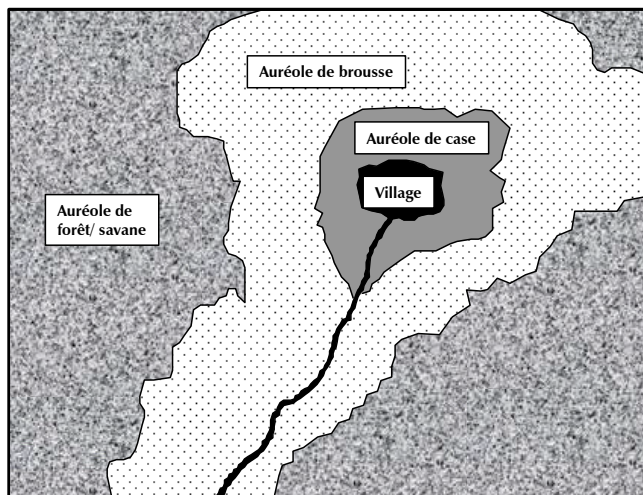


Figure 1.1 Organisation simplifiée en auréoles d'un village agropastoral de la savane ouest-africaine.

parcours indispensables en saison pluvieuse. Au contraire des autres auréoles, cette zone n'est pas l'objet d'une appropriation par le village,

(2) l'auréole de brousse, qui constitue une mosaïque de champs arborés -principalement des cultures de rente- et des friches jeunes à âgées. La fertilité des sols est essentiellement garantie par la jachère. Les jachères peuvent aussi être dues à un déficit en force de travail ou à un semis incomplet,

(3) l'auréole de case, consacrée aux cultures vivrières. Une culture continue intensifiée est rendue possible par la fumure animale des sols (la plupart du temps durant le parcage de nuit du bétail) et par les ordures ménagères pendant la saison sèche.

Pour des raisons locales et globales, il existe un besoin croissant d'évaluation des stocks de carbone, d'azote et de phosphore dans les agroécosystèmes de savanes d'Afrique de l'Ouest, et qui concerne les caractéristiques des sols et la gestion des terres.

À l'échelle locale, et depuis quelques décennies, la dynamique démographique rurale, les politiques foncières et les innovations techniques impliquent une modification des pratiques traditionnelles. Alors que l'auréole de savane a presque disparu, l'auréole de brousse s'est fortement réduite en raison de besoins croissants en terre, et a été remplacée par des cultures continues. Bien que cette tendance ne doive pas s'inverser dans les prochaines années, il est généralement admis que les jachères améliorées à usages multiples continueront à jouer un rôle dans les systèmes de production de savane, tandis que l'intensification dans l'auréole de case se fera par une meilleure intégration de l'agriculture et de l'élevage et par l'adoption de pratiques agroforestières.

Beaucoup de politiques agricoles africaines mises en place durant les 30 dernières années ont abouti à un accroissement faible et non durable de la production, en raison de connaissances incomplètes sur les fondements écologiques de la fertilité des écosystèmes tropicaux, spécialement dans les savanes (Brown et Thomas, 1990). Une meilleure compréhension des modèles agroécologiques de conservation de la fertilité dans les systèmes de cultures semi-permanentes et continues est une condition préalable à l'adoption de toute innovation technique.

L'hypothèse sous-tendant notre travail est que cette compréhension repose principalement sur l'étude des cycles du carbone, de l'azote et du phosphore contenus dans la matière organique. L'accent sera mis sur la dynamique de la matière organique et du carbone. En effet, dans les systèmes de production largement autarciques, la matière organique fournit aux agriculteurs de la nourriture, du bois, et du fourrage (Floret *et al.*, 1993). C'est aussi sa gestion qui assure la durabilité des agroécosystèmes. Dans les sols subsahariens sableux fortement lessivés, les propriétés chimiques, physiques et biologiques dépendent de la matière organique du sol (de Ridder et van Keulen, 1990). L'azote et le phosphore ont aussi été inclus dans cette étude, car ces éléments sont les facteurs chimiques les plus limitants de

la productivité des plantes dans les savanes africaines (Jones and Wild, 1975). En outre, le cycle de l'azote est étroitement lié à celui de la matière organique et il est aussi un déterminant de la qualité du carbone impliqué dans le système plante-sol. Ce travail faisait partie intégrante d'une tentative visant à évaluer les stocks et les flux actuels et futurs de carbone à l'échelle de l'agroécosystème villageois (Chapitre 4 et 5), il fournit aussi des modèles paramétrés de la dynamique du carbone dans les principaux compartiments organiques des agroécosystèmes de cette écozone de savane. La biomasse végétale produite dans des systèmes de culture-jachère en savane ouest-africaine n'est pas seulement une source en fibres et en énergie pour les agriculteurs et leur bétail. A cause de la pauvreté chimique des sols locaux, la fertilité des sols est très liée à la dynamique de la végétation ; cette dynamique permet l'accumulation stable d'éléments minéraux, contrôle la disponibilité des nutriments du sol aux plantes, et est à l'origine de schémas de redistribution de l'énergie au biote du sol (Perry *et al.*, 1989 ; Hendrix *et al.*, 1990).

Dans une perspective plus globale, les changements de gestion de l'espace sous les Tropiques auraient été responsables d'un cinquième des rejets totaux anthropogéniques de carbone dans les années 1980 (Schimel, 1995). Au Sénégal, plus de 40 % des émissions de dioxyde de carbone résultent de l'agriculture, des changements de gestion des terres et des forêts (Sokona, 1995). Les revues de Desanker *et al.* (1995) et Tiessen *et al.* (1998) soulignent le manque d'évaluation des disponibilités en carbone dans les écosystèmes tropicaux secs en comparaison des zones humides, et la pauvreté des études en Afrique par rapport aux autres régions sèches du monde. Etant donné le contexte démographique et économique en Afrique de l'Ouest, le contrôle des émissions de gaz à effet de serre n'est sans doute pas une priorité des leaders politiques. Mais la séquestration du carbone par les petites exploitations agricoles africaines est une clé pour une intensification durable et un retour à l'autosuffisance des agriculteurs (Woomer *et al.*, 1998). Evaluer le potentiel de séquestration du carbone dans les agroécosystèmes de la sous-région choisie a ainsi été un autre but de ce travail.

Ce Chapitre est le premier d'une série de trois, destinée à évaluer la distribution du carbone (C), de l'azote (N) et du phosphore (P) dans les auréoles de brousse et de case d'un système agropastoral du Sud Sénégal. Cette partie évalue la distribution du carbone, d'azote et de phosphore dans la biomasse végétale pendant le cycle culture-jachère survenant habituellement dans l'auréole de brousse ; la même évaluation dans les sols est décrite dans le Chapitre 2. Les stocks de C, N et P dans la biomasse végétale et dans les sols, sous culture continue, sont présentés dans le Chapitre 3.

Dans cette étude nous (a) décrivons les modèles de recyclage de la matière sèche (MS), la distribution de C, N et P et étudions les relations

hiérarchiques entre les réservoirs organiques pendant la jachère ; (b) définissons des seuils temporels d'évolution pour la MS, le carbone, l'azote et le phosphore pour chaque composante de la biomasse végétale ; (c) évaluons le devenir de la biomasse végétale aérienne et des nutriments liés après remise en culture.

1.2. METHODES

1.2.1. Caractéristiques du site

L'étude a été conduite de 1993 à 1997 en Haute-Casamance, au Sud-Sénégal. Les parcelles de culture et de jachère ont été installées dans le village de Sare Yorobana (12°49'N - 14°53'O). Le climat est de type soudanien tropical sec. La moyenne annuelle (960 mm) des précipitations a varié entre 570 et 1320 mm durant les 20 dernières années et les pluies se sont réparties entre mai et octobre la température moyenne de 28°C (Figure 1.2) (Service de la Météorologie Nationale, station de Kolda). L'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne a été de 1570 mm entre 1977 et 1988 (Dacosta, 1989).

L'organisation en auréoles du village individualise trois systèmes d'utilisation de l'espace le long de la toposéquence typique, au relief peu marqué :

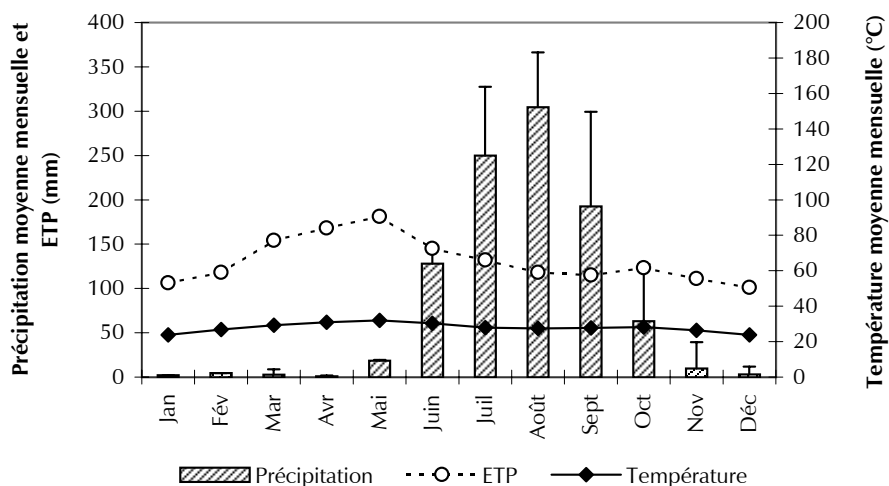


Figure 1.2 Diagramme ombrothermique et potentiel d'évapotranspiration à la station de Kolda, 1978-1997.

Les barres verticales représentent l'erreur type. ETP : potentiel d'évapotranspiration.

Données en Annexe 3.

- (1) le plateau de haut de pente. Il est encore recouvert de grandes étendues de "formations boisées avec une strate arborée et un recru arbustif bien développé" (de Wolf, 1998), de savanes et de vieilles jachères. Les combrétacées rejetant de souche sont la composante principale de la végétation ligneuse. Sur le site d'étude, quatre espèces ligneuses dominent, représentant 70 % de la biomasse aérienne ligneuse (BA) : *Combretum geitonophyllum* Diels, *Combretum glutinosum* Perr., *Piliostigma thonningii* (Sch.) Miln.-Redh et *Terminalia macroptera* G. et Perr.. Les champs de brousse en bordure de plateau sont dédiés à un cultivar local d'arachide (*Arachis hypogaea* L.) du type Virginia, généralement en rotation avec du mil si la parcelle est fumée, mais le plus souvent en rotation avec de courtes jachères. Le coton (*Gossypium hirsutum* L.), l'autre principale culture de rente, est aussi représentée dans ce système. Le sol est sableux, ferrugineux (Baldensperger *et al.*, 1967), et appartient aux Lixisols (FAO, 1998b). Une description plus précise est proposée au Chapitre 2 et en Annexe 4. Cette unité de gestion de l'espace englobe la forêt/savane et la plupart de l'auréole de brousse. Toutes les parcelles échantillonnées, sauf trois, appartiennent au plateau (voir Méthodes).
- (2) Le glacis de mi-pente, comportant des sols similaires à ceux du plateau. Il abrite l'auréole de case, et donc les cultures continues de céréales (mil tardif *Pennisetum glaucum* L., maïs *Zea mays* L. et sorgho *Sorghum bicolor* L. Moench).
- (3) Le bas de pente, réservé à la riziculture et aux plantations de palmiers, dont les sols correspondent aux Gleysols (FAO, 1998b) (voir Chapitre 3 pour plus de détails)

Les éleveurs sédentaires Peuls ont adopté une agriculture diversifiée (céréales en cultures pluviales et irriguées, arachide et coton en culture de rente) étroitement associée à l'élevage extensif. Dans l'auréole de brousse, la rotation de l'arachide avec la jachère et parfois avec le mil est assez imprévisible. Le modèle traditionnel de culture dans cette auréole est le suivant. En pratique, la biomasse végétale produite pendant la période de jachère est exportée soit pour le bois de feu, soit pour le fourrage, ou brûlée lors de feux incontrôlés. Une part importante de la biomasse végétale disparaît lors du défrichage de la jachère, à cause du brûlis et de l'exploitation du bois ; seuls les systèmes racinaires sont épargnés (Floret *et al.*, 1993). Le défrichage manuel traditionnel peut être exigeant en travail ; mais les souches ligneuses capables de produire régulièrement des rejets restent en vie pendant plusieurs années avant de dépérir (Bohringer *et al.*, 1996). La défriche des vieilles jachères ou des savanes est généralement suivie par deux à quatre années de culture continue en rotation biennale d'arachide et de céréales (mil, sorgho). Après une rapide perte de la

fertilité du sol (quatre à cinq ans), une culture continue peut être maintenue quelques années supplémentaires si une fumure suffisante est apportée avant la culture de céréales. Cependant, les besoins alimentaires sont habituellement supérieurs à la production de l'auréole de case, et la fumure est insuffisante, de sorte que la rotation biennale d'arachide et de jachère se met en place rapidement, sinon immédiatement, après la défriche. La rotation est maintenue aussi longtemps que la fertilité du sol et la compétition avec les adventices permettent de bons rendements. La parcelle retourne alors à la jachère pendant plusieurs années, la durée dépendant des propriétés du sol, de la force de travail disponible, et de considérations foncières.

1.2.2. Echantillonnage

Afin de gagner du temps, une méthode synchrone a été adoptée : des parcelles de culture et de jachère voisines, de différents âges, peuvent être considérées comme représentatives d'une succession sur une même parcelle, à condition de s'assurer qu'elles ont le même type de sol et ont connu la même gestion au cours du temps (Sanchez, 1987).

Les prélèvements ont été réalisés en début de saison sèche, à un moment très proche du maximum de la biomasse aérienne (BA) végétale.

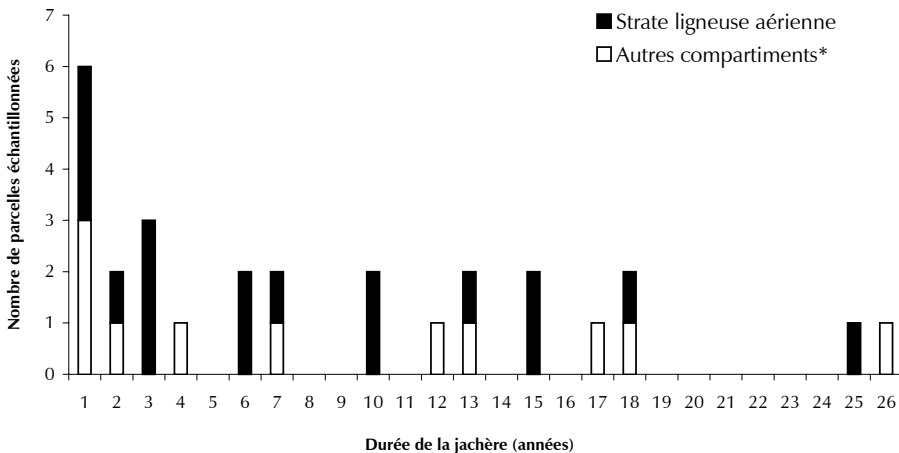


Figure 1.3 Distribution de la durée de jachère mesurée dans les 28 parcelles de jachère échantillonnées.

* y compris le sol (voir Chapitre 2).

En raison de la distribution de la végétation, deux plans d'échantillonnage ont été adoptés, selon l'utilisation de la terre :

- (1) Les parcelles de jachère (JA), âgées de 1 à 26 ans (Figure 1.3) : la BA ligneuse a été estimée sur 17 parcelles (trois échantillons de 900 m² pour chacune des parcelles). La BA ligneuse (tronc -toute branche dont le diamètre est supérieur à 4 cm-, rameau et feuille) et la biomasse des

souches (dans les jachères de plus de 4 ans) ont été évaluées en utilisant une régression basée sur le diamètre des arbres à hauteur de poitrine, c'est à dire à 1,30 m au dessus du sol (Tableau 1.1) (Kaïré, 1999). D'autres variables ont été mesurées tous les mètres dans un parallélépipède de 0,5 m², le long d'un transect de 20 m de long et 0,5 de large, sur 11 autres parcelles différentes mais situées sur le même plateau (sauf la parcelle JA01a, située en haut de glacis) (Annexe 1). La biomasse herbacée a été récoltée, en incluant la biomasse végétale vivante et morte (mais sur pied). La litière a été récoltée comme l'horizon organique figuré A0 (Ø > 2 mm). Les racines fines ont été échantillonnées grâce à une tarière (Ø : 5,6 cm) et tous les 10 cm. Une séparation manuelle, sur le terrain, du sol extrait jusqu'à une profondeur de 40 cm a été utilisée pour récupérer les racines plus grosses, puisque la méthode de la tarière n'est pas adaptée aux racines de plus de 2 mm de diamètre. Dans les jachères de 4 ans ou moins, les souches ont été prélevées en même temps que les racines épaisses.

Tableau 1.1 Coefficients de régression utilisés pour évaluer la biomasse ligneuse de quatre principales espèces ligneuses trouvées à Sare Yorobana.

Espèce	Compartment	a	b	R ²
<i>Combretum</i>	biomasse aérienne	0,283	2,17	0,97
<i>geitonophyllum</i>	- tronc	0,103	2,44	0,97
	- rameau	0,0947	2,15	0,96
	- feuille	0,0682	1,74	0,94
	souche	0,205	1,63	0,89
<i>Combretum</i>	biomasse aérienne	0,149	2,33	0,98
<i>glutinosum</i>	- tronc	0,0965	2,43	0,96
	- rameau	0,0782	2,16	0,91
	- feuille	0,0676	1,99	0,94
	souche	0,175	1,78	0,80
<i>Piliostigma</i>	biomasse aérienne	0,157	2,27	0,97
<i>thonningii</i>	- tronc	0,0898	2,29	0,94
	- rameau	0,0785	1,99	0,96
	- feuille	0,0554	1,79	0,89
	souche	0,149	1,66	0,89
<i>Terminalia</i>	biomasse aérienne	0,0979	2,40	0,96
<i>macroptera</i>	- tronc	0,0966	2,52	0,97
	- rameau	0,0626	2,38	0,97
	- feuille	0,035	2,02	0,92
	souche	0,155	1,69	0,92
Autres	biomasse aérienne	0,172	2,29	
	- tronc	0,0965	2,42	
	- rameau	0,0785	2,17	
	- feuille	0,0566	1,89	
	souche	0,1710	1,69	

Modèle : biomasse (en kgMS) = $a \cdot D^b$ (avec D le diamètre -en cm- à hauteur d'homme).

Biomasse aérienne : n=40 ; tronc, rameau, feuille et souche : n=15.

Autres espèces : paramètres estimés par la moyenne des paramètres des quatre principales espèces.

Tiré de Kaïré (1999).

- (2) Les parcelles d'arachide (notées AR) : six champs ayant été cultivés en arachide en rotation biennale avec une jachère -ou parfois du mil- pendant 4 à 15 ans, et n'ayant jamais reçu d'apports chimiques, ont été choisis en haut de pente : quatre parcelles sur le plateau, deux sur le haut glacis (AR04 et AR06). Dans chacune d'elles, quatre carrés de 16 m² ont été identifiés. Dans chaque carré, la végétation a été coupée afin d'estimer la biomasse végétale, tout en distinguant la strate ligneuse (rejets de souche) et herbacée (mauvaises herbes et arachide). La biomasse de la litière était négligeable, et n'a pas été échantillonnée. Les racines fines ont été prélevées à chaque coin des placeaux. La biomasse des grosses racines a été estimée au moyen d'une régression

établie dans les jachères. Cette régression s'est montrée satisfaisante pour lier la biomasse des racines épaisses mesurée par excavation (a) à celle mesurée par carottage (b) : $a = 1,73 \cdot b + 2,95$ (en tMS ha⁻¹) ; $R^2 = 0,6$; $p\{F_{obs} > F_{th}\} < 0,05$; $n = 9$ (Annexe 5). Trois des six champs d'arachide (AR02, AR03 et AR04) étudiés en 1996 ont été ré-échantillonnés en 1997 en tant que jachères de 1 an ; dans ces parcelles, la biomasse des souches a été supposée la même (et donc probablement légèrement surévaluée) que celle mesurée en 1996.

Dans toutes les parcelles, la biomasse souterraine végétale (BS) a été échantillonnée jusqu'à 40 cm de profondeur. Ce seuil a été choisi d'après des observations locales non publiées et d'autres travaux publiés (Chopart, 1980 ; Tomlinson *et al.*, 1998). Ils indiquent une faible activité racinaire en dessous de 40 cm de profondeur dans les sols de climat tropical sec de l'Afrique de l'Ouest.

1.2.3. Analyses végétales

Les souches et les grosses racines ont été lavées et triées selon leur diamètre ([2-5], [5-10], >10 mm). Les racines fines ont été séparées après élutriation hydro-pneumatique au-dessus d'un tamis de 1 mm (Webb, 1995). Tous les échantillons végétaux ont été séchés à 70°C jusqu'à stabilisation de leur masse afin de déterminer le taux de matière sèche (MS). Les échantillons ont été rassemblés et une analyse pour chaque compartiment végétal a été entreprise pour chaque parcelle. La teneur en carbone a été déterminée après une oxydation au dichromate, l'azote grâce à la méthode Kjeldahl ; le phosphore a été mesuré dans les cendres. Toutes ces méthodes sont entièrement décrites par Page *et al.* (1989). Les stocks de C, N et P ont été obtenus en combinant directement les valeurs des stocks de MS avec les teneurs en ces éléments chimiques dans la biomasse végétale (Tableau 1.1 et Tableau 1.2a,b ; voir Kairé, 1999 pour le détail des calculs des stocks de C, N et P dans la biomasse ligneuse).

1.2.4. Etude du devenir de la biomasse végétale aérienne post-jachère

Le devenir de la BA ligneuse (brûlée sur place ou restituée au sol) au moment de la défriche dépend du diamètre des branches. Des enquêtes auprès des agriculteurs ont montré qu'un diamètre de 4 cm est un seuil au-delà duquel la biomasse des arbres est exportée pour les besoins en bois, alors que les branches plus fines et les feuilles (biomasse disponible pour le brûlis ou BDPB) sont brûlées sur place. L'efficacité de la combustion n'a pas été mesurée, et dépend des pratiques locales. En tenant compte des travaux de Stromgaard (1985) et Fearnside et Barbosa (1998), deux scénarios ont été considérés, dépendant de l'efficacité du brûlis (90 et 50 %) de la biomasse végétale restante. Ceux-ci ont été appliqués à deux parcelles hypothétiques de jachère : une jeune (âgée de moins de 10 ans) et une vieille (âgée de 10 ans ou plus) ; la BA ligneuse de ces parcelles est déduite des données présentées dans le Tableau 1.6.

1.2.5. Analyse des données

Dans les savanes subhumides, les végétaux sont en compétition davantage pour les nutriments que pour l'eau, et les feux détruisent annuellement la plupart de la strate herbacée ; c'est pourquoi la dynamique des plantes ligneuses n'est pas vraiment contrôlée par la compétition avec la strate herbacée (Walker, 1985). Nous avons donc posé l'hypothèse que les dynamiques temporelles du stockage de la matière organique végétale et des nutriments, pourraient être ajustées par un modèle pseudo-logistique. Ce modèle s'adapte relativement bien à la dynamique des populations où la disponibilité en éléments minéraux est limitée (Pavé, 1994). L'expression mathématique est :

$$S(t) = \frac{K}{1 + \frac{(K - S_0)}{S_0} \cdot e^{-r \cdot t}}$$

où S_0 est la valeur du stock à $t = 0$ et $K = \lim S$ quand $t \rightarrow \infty$

Une forme générale légèrement modifiée de ce modèle a dû être adoptée pour deux raisons :

- (1) la dynamique ligneuse, après abandon des cultures, est d'autant plus autonomes par rapport aux autres groupes fonctionnels vivants, qu'elle repose sur les rejets de souches et pas simplement sur la germination. Ainsi, une croissance végétale maximale peut se produire pendant les premières années de jachère.
- (2) Nous avons aussi voulu tester les deux hypothèses suivantes :
 - (a) dans les savanes locales, la biomasse herbacée est contrôlée par la compétition pour la lumière avec les arbres (Akpo, 1998) et pourrait ainsi être modélisée par une simple fonction linéaire de la biomasse ligneuse ;
 - (b) les strates arborées et herbacées contribuent de façon équivalente à la biomasse des racines fines (rapportée à leurs propres biomasses), qui pourrait donc être décrite comme la somme de deux fonctions linéaires de la BA ligneuse et herbacée.

Le modèle finalement testé a été :

$$S(t) = \frac{a \cdot K}{1 + \frac{(K - S_0)}{S_0} \cdot e^{-r \cdot t}} + b$$

La prise en compte des valeurs mesurées dans les parcelles de culture pour paramétrer le modèle a été décidée en fonction de la continuité biologique de chaque compartiment végétal entre les cultures et les jachères (voir Tableau 1.4 et Figure 1.4a,b).

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel SAS 6.14 (Hatcher et Stepanski, 1994). Les procédures NLIN et REG ont été utilisées pour estimer les paramètres des régressions non-linéaires. La validité du modèle a été estimée en testant R^2 , la pente et l'ordonnée à l'origine de la régression sur les valeurs observées (Pavé, 1994). Des analyses de variances ont été effectuées grâce à la procédure GLM sur les rangs des données du fait de la faible taille de la population mesurée, et de l'incertitude sur la normalité des distributions des données (Potvin et Roff, 1993). Le test de comparaison multiple SNK a été utilisé pour séparer les traitements selon la moyenne des classes de valeurs ($\alpha=0,05$).

1.3. RESULTATS

1.3.1. Tendances générales.

Les teneurs en carbone ont été très stables parmi les espèces ligneuses et les autres composantes de la biomasse végétale (Tableau 1.2a,b). Les

Tableau 1.2 Teneurs en carbone, azote et phosphore des : a. composantes végétales de quatre principales espèces ligneuses. Les teneurs pour les autres espèces ont été estimées par les moyennes de ces valeurs. b. composantes végétales aériennes et souterraines des cultures et des jachères.

a.

Espèce	C (g 100g ⁻¹ MS)			N (g 100g ⁻¹ MS)			P (g 100g ⁻¹ MS)		
	Tronc / souche	Rameau	Feuille	Tronc / souche	Rameau	Feuille	Tronc / souche	Rameau	Feuille
<i>Combretum geitonophyllum</i>	38,8	35,8	35,8	0,45	0,29	1,48	0,04	0,04	0,09
<i>Combretum glutinosum</i>	37,6	38,5	39,7	0,16	0,32	1,18	0,03	0,02	0,05
<i>Piliostigma thoningii</i>	37,3	37,0	37,5	0,23	0,37	1,55	0,02	0,03	0,08
<i>Terminalia macroptera</i>	36,5	37,6	36,1	0,16	0,18	1,15	0,02	0,02	0,07

	Strate herb.	Litière	Racine fine	Racines épaisses	Souche
C (g 100g ⁻¹ MS)					
Arachide	37,5 ±0.4		34,1 ±0.5	38,0 ⁺	38,0 ⁺
Jachère	34,4 ±0.9	33,1 ±0.5	34,3 ±0.4	36,6 ±0.4	37,0 ±0.8 [‡]
N (g 100g ⁻¹ MS)					
Arachide	1,93 ±0.02		1,66 ±0.03	0,35 ⁺	0,35 ⁺
Jachère	0,72 ±0.05	0,51 ±0.03	0,78 ±0.05	0,40 ±0.03	0,41 ±0.06 [‡]
P (g 100g ⁻¹ MS)					
Arachide	0,11 ±0.00		0,07 ±0.01	0,02 ⁺	0,02 ⁺
Jachère	0,07 ±0.01	0,03 ±0.00	0,04 ±0.00	0,03 ±0.00	0,02 ±0.01 [‡]

± : erreur type. Parcelles d'arachide : n=6. Parcelles de jachère : n=11.

⁺ : estimé comme la moyenne des valeurs des racines épaisses de JA1a, JA1b et JA1c.

[‡] : estimé comme la teneur des racines épaisses dans les jachères âgées de un à quatre ans ; utilisé pour le calcul des stocks de C, N et P dans les jachères de un à quatre ans seulement.

Données en Annexe 6.

Racines fines : diamètre entre 0 et 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises)

teneurs maximales en N et P ont été mesurées dans les feuilles des arbres, dans la strate herbacée et dans les racines fines de la végétation des cultures.

La biomasse végétale de l'ensemble de l'écosystème a atteint 49 tMS dans les parcelles de culture et de jachère étudiées. Cela correspond à 18 tC, 250 kgN et 21 kgP par hectare, desquels plus de 40 % de N et 50 % de P ont été stockés dans la BA ligneuse (Tableau 1.3, Figure 1.4a). Les souches ont été le second contributeur au stockage de MS, C, N et P dans l'écosystème. Le stockage de la MS dans la BA ligneuse a plus que triplé entre les parcelles de jachères de moins de 1 an (14 t ha⁻¹) et celles de plus de 18 ans (43 t ha⁻¹), la moitié étant conservée dans les troncs pour les plus vieilles jachères. Les stocks de carbone (de 5,1 à 15,9 t ha⁻¹), d'azote (75 à 161 kg ha⁻¹) et de phosphore (7 à 21 kg ha⁻¹) ont montré des évolutions similaires à celles de la MS pendant la jachère, bien que le stockage de

Tableau 1.3 Stockage de la matière sèche dans les composantes végétales d'une succession culture-jachère

Parcelle	BA ⁽¹⁾				Litière	Racine				BDPB ⁽²⁾			
	Ligneuse		Herb.			Fine (par prof. de prélèvement en cm)							Epaisse
	Tronc	Rameau	Feuille	Total		0-10	10-20	20-30	30-40				
AR01				0,13	2,37		0,19	0,15	0,11	0,07	5,2		
AR02				0,02	3,41		0,20	0,17	0,10	0,07	3,0	13,8	
AR03				0,29	2,34		0,25	0,16	0,12	0,08	3,1	5,0	
AR04				1,20	3,45		0,33	0,18	0,11	0,07	3,0	3,5	
AR05				0,24	2,76		0,21	0,09	0,08	0,05	2,9		
AR06				0,03	3,42		0,29	0,18	0,10	0,07	3,0		
JA1a					6,51	1,84	0,78	0,28	0,20	0,14	5,4	3,5	
JA1b					5,51	2,10	1,17	0,28	0,25	0,26	8,6	13,8	
JA1c					4,99	1,53	0,81	0,16	0,22	0,19	3,4	5,0	
JA1d	2,2	1,3	0,8	4,3								4,3	
JA1e	8,0	5,3	3,6	16,9								16,9	
JA1f	8,4	6,3	5,0	19,8								19,8	
JA2a					6,01	0,57	0,72	0,27	0,30	0,20	5,9	11,7	
JA2b	11,5	7,5	5,1	24,1								20,8	
JA3a	5,9	3,2	1,4	10,5								8,0	
JA3b	14,7	9,1	5,8	29,6								23,0	
JA3c	12,4	8,2	4,5	25,1								19,8	
JA4					9,45	2,77	0,90	0,28	0,21	0,16	4,7	4,7	
JA6a	15,4	9,0	6,2	30,6								11,5	19,2
JA6b	15,8	9,0	4,4	29,2								15,6	18,7
JA7a					3,32	2,97	1,11	0,57	0,44	0,34	13,8		
JA7b	16,2	8,5	3,3	28,0								11,1	17,3
JA10a	19,8	11,4	6,7	37,8								11,8	21,2
JA10b	21,6	11,4	6,0	39,0								17,7	22,1
JA12					1,93	3,86	1,19				14,3		
JA13a					0,96	1,19	1,82	1,19	0,74	0,68	19,6		
JA13b	21,5	10,5	3,9	35,9								12,5	18,5
JA15a	24,0	13,3	7,7	45,0								12,0	22,5
JA15b	22,3	11,8	6,2	40,4								18,6	20,5
JA17					2,15	2,65	1,32				15,8		
JA18a					1,81	1,75	1,22	0,74	0,62	0,53	14,1		
JA18b	27,0	11,5	5,8	44,3								15,4	21,0
JA25	22,5	12,1	6,4	41,0								13,8	17,6
JA26					1,43	1,73	1,21	0,80	0,69	0,82	19,9		

AR : culture d'arachide. JA : jachère ; le nombre associé correspond à l'âge de la jachère.

(1) BA : biomasse aérienne vivante. Tiré de Kairé (1999).

(2) BDPB : biomasse disponible pour le brûlis. Tiré de Kairé (1999).

Racines fines : diamètre entre 0 et 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souche non incluse)

l'azote ait eu lieu principalement dans les feuilles. La biomasse des souches a doublé pendant cette période, atteignant 15 t ha^{-1} et emmagasinant 26 % de l'azote et 17 % du phosphore contenus dans la végétation ligneuse. Dans les cultures, la biomasse herbacée a atteint $3,0 \text{ t ha}^{-1}$ ($1,1 \text{ tC ha}^{-1}$) ; elle a augmenté dans les jachères les plus jeunes mais baissé jusqu'à $1,6 \text{ t ha}^{-1}$ dans les jachères les plus âgées. Les stocks organiques et minéraux dans les racines fines et grosses ont augmenté de quatre (N) à six (P) fois entre les cultures et les jachères les plus vieilles, atteignant finalement 20 tMS, 7,2 tC, 88 kgN et 8,1 kgP par hectare. Les racines fines ont représenté 14 % de la biomasse racinaire mais plus d'un tiers de N et P contenus dans les racines (sans les souches). Leur distribution dans les couches du sol n'a pas différé selon la chronoséquence ; la moitié des racines fines est localisée dans les dix premiers centimètres de sol. Le rapport tige/racine est de 0,22 dans les cultures. Il est plus fort dans les jachères âgées de moins de dix ans que dans les autres parcelles de la succession (0,62 contre 0,56).

1.3.2. Ajustement des dynamiques temporelles du carbone, de l'azote et du phosphore dans la biomasse végétale au modèle logistique pendant la jachère

Les meilleurs ajustements ont été trouvés pour les données de MS et de carbone de la BA ligneuse et herbacée (Tableau 1.4, Figure 1.4a). Un seuil a été observé à partir de 10 ans de jachère, quels que soient la variable et le compartiment, excepté pour les souches, dont la biomasse initiale était déjà importante. Cependant, différentes évolutions ont été observées avant que le seuil ne soit atteint, selon la variable et le compartiment. Les modèles ajustés aux données des compartiments de BA n'ont pas montré de point d'inflexion, ce qui indiquerait une croissance maximale pendant la première année de jachère ; cela n'a été le cas ni pour la MS et le carbone des grosses racines, ni pour l'azote et le phosphore des racines fines (Figure 1.4b). Contraindre la biomasse herbacée et celle des racines fines à des fonctions linéaires respectives de la BA ligneuse, et de la BA herbacée et ligneuse, conduit à une petite perte du pouvoir explicatif du modèle, bien que cela modifie l'aspect des courbes pour les stocks de N et P dans les racines fines.

Tableau 1.4 Estimation des paramètres de la régression de $S = \{\text{stock de matière sèche, carbone, azote ou phosphore}\}$ sur $t = \text{durée de jachère, selon le modèle pseudo-logistique}$:

$$S(t) = \frac{aK}{1 + \frac{(K - S_0)}{S_0} \cdot e^{-rt}} + b.$$

Unité	Compartment	Contrainte(s)	a	K	So	r	b	R ²	F	p>F	n	p(Ho ord. à l'orig.=0)	p(Ho pente=1)
MS (t ha ⁻¹)	Strate ligneuse	(1)	1	1150,3	1109,9	0,275	-1109,59	0,91	212,8	***	23	0,64	0,39
	- tronc	(1)(2)	1	580,7	557,0	0,211	-556,80	0,87	97,8	***	17	0,79	0,63
	- rameau	(1)(2)	1	281,2	269,8	0,340	-269,69	0,71	37,2	***	17	0,24	0,18
	- feuille	(1)(2)	1	138,07	132,51	0,648	-132,44	0,27	5,6	*	17	***	***
	Strate herbacée	Basse : (2)	1	1,60E-03	6,94	4,14E-05	0,00	0,90	75,3	***	10	0,41	0,35
	Haute : (3)	-0,14	1150,3	1109,9	0,275	159,33	0,89	67,2	***	10	0,43	0,36	
	Racine fine	Basse : (1)	1	113,29	110,31	0,204	-109,74	0,89	121,1	***	17	0,63	0,39
	Haute : (4)	0,07	1150,3	1109,9	0,275	-75,20	0,88	110,3	***	17	0,25	0,17	
	Racine épaisse	(1)	1	15,1	1,4	0,444	2,01	0,89	122,1	***	17	0,64	0,37
	Souche	(1)	1	15,54	7,77	0,211	-0,31	0,41	11,3	**	18	**	***
	Horizon ligneux	(1)	1	416,3	401,2	0,278	-401,09	0,91	211,1	***	23	0,63	0,38
	- tronc	(1)(2)	1	255,8	246,9	0,212	-246,84	0,86	95,8	***	17	0,77	0,62
	- rameau	(1)(2)	1	111,11	106,84	0,339	-106,80	0,72	38,1	***	17	0,24	0,18
C (t ha ⁻¹)	- feuille	(1)(2)	1	46,59	44,49	0,650	-44,46	0,28	5,9	*	17	***	***
	Strate herbacée	Basse : (2)	1	0,00	2,69	4,31E-05	0,00	0,93	114,0	***	10	0,48	0,42
	Haute : (3)	-0,14	416,3	401,2	0,278	60,51	0,93	100,8	***	10	0,54	0,46	
	Racine fine	Basse : (1)	1	24,73	23,70	0,198	-23,50	0,88	113,2	***	17	0,66	0,40
	Haute : (4)	0,06	416,3	401,2	0,278	-24,79	0,87	100,4	***	17	0,23	0,16	
	Racine épaisse	(1)	1	5,10	0,25	0,548	1,04	0,88	107,3	***	17	0,69	0,38
	Souche	(1)	1	5,50	2,75	0,202	0,08	0,37	9,6	**	18	**	***
	Horizon ligneux	(1)	1	4086,1	3930,9	0,405	-3929,41	0,82	97,4	***	23	0,25	0,11
	- tronc	(1)(2)	1	1510,8	1457,4	0,229	-1457,06	0,72	38,5	***	17	0,31	0,21
	- rameau	(1)(2)	1	777,5	745,9	0,383	-745,60	0,66	29,2	***	17	0,11	0,08
	- feuille	(1)(2)	1	1826,7	1755,5	0,708	-1754,61	0,22	4,3	0,05	17	***	***
	Strate herbacée	Basse : (2)	1	1,12E-02	37,60	3,33E-05	0,00	0,86	47,7	***	10	0,31	0,27
	Haute : (3)	-0,19	4086	3931	0,405	798,91	0,78	27,9	***	10	0,20	0,17	
N (kg ha ⁻¹)	Racine fine	Basse : (2)(5)	1	17,2	0,1	1,036	9,63	0,87	59,2	***	11	0,46	0,38
	Haute : (4)	0,16	4086	3931	0,405	-637,50	0,78	32,7	***	11	0,18	0,15	
	Racine épaisse	(1)	1	1254,5	1195,4	0,134	-1183,63	0,89	123,3	***	17	0,34	0,22
	Souche	(1)	1	66,1	33,0	0,272	-7,20	0,44	12,7	**	18	***	***
	Horizon ligneux	(1)	1	463,0	442,5	0,247	-442,33	0,91	212,3	***	23	0,72	0,60
	- tronc	(1)(2)	1	500,6	484,3	0,204	-484,19	0,86	91,1	***	17	0,84	0,67
	- rameau	(1)(2)	1	83,02	80,14	0,365	-80,12	0,56	18,9	***	17	0,09	0,06
	- feuille	(1)(2)	1	33,70	32,20	0,978	-32,18	0,12	2,0	0,18	17	***	***
	Strate herbacée	Basse : (2)	1	1,23	4,84	0,159	0,00	0,83	39,7	***	10	0,30	0,25
	Haute : (3)	-0,13	463,0	442,5	0,247	60,95	0,82	36,8	***	10	0,27	0,22	
	Racine fine	Basse : (2)(5)	1	0,82	0,00	0,748	0,60	0,88	68,9	***	11	0,38	0,34
	Haute : (4)	0,05	463,0	442,5	0,247	-22,83	0,80	37,1	***	11	0,20	0,18	
	Racine épaisse	(1)	1	359,77	350,53	0,052	-349,85	0,87	100,6	***	17	0,22	0,12
Souche	(1)	1	5,89	2,94	0,229	-1,45	0,71	39,1	***	18	**	**	

Contraintes :

- (1) fixe $S(0)$ à la valeur moyenne de S mesuré dans les cultures.
- (2) exclue les données des cultures pour la paramétrisation du modèle.
- (3) fixe $S_{\text{strate herbacée}}$ comme une fonction linéaire de $S_{\text{strate ligneuse}}$.
- (4) fixe $S_{\text{racines fines}}$ comme une fonction linéaire de $S_{\text{strate herbacée}}$ et $S_{\text{strate ligneuse}}$.
- (5) fixe $S(1)$ comme la valeur moyenne de S mesuré dans les jachères d'un an.

Test F réalisé sur R^2 et la pente de la régression linéaire des valeurs observées sur celles prédites (test T apparié sur l'ordonnée à l'origine).

$p()$: * $<0,05$; ** $<0,01$; *** $<0,001$.

Racines fines : diamètre entre 0 et 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souche non comprise)

Données en Annexe 7.

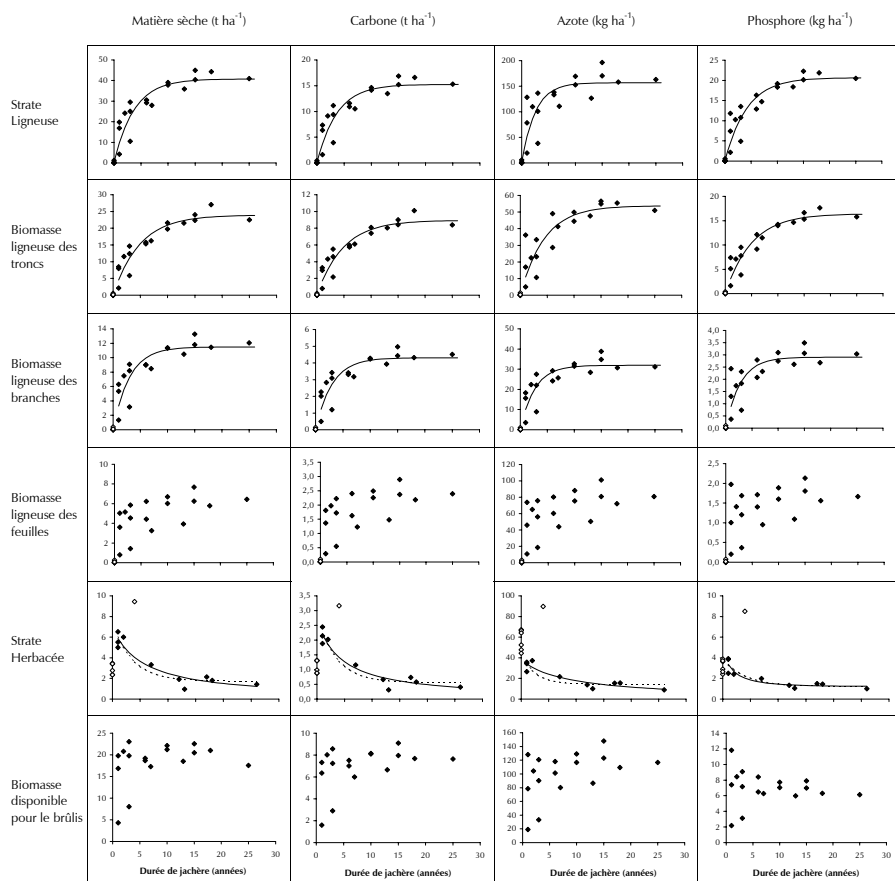


Figure 1.4 Stock de matière sèche, carbone, azote et phosphore dans la biomasse végétale au cours d'une succession culture-jachère, et ajustement au modèle pseudo-logistique:

$$s(t) = \frac{aK}{1 + \frac{(K - S_0)}{S_0} \cdot e^{-rt}} + b.$$

a. compartiments aériens.

Ligne continue : modèle à faibles contraintes (voir texte et Tableau 1.4). Ligne pointillée : modèle à fortes contraintes. Marques pleines : données utilisées pour l'ajustement du modèle.

Racines fines : diamètre entre 0 et 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souche non comprise).

Données en Annexe 7.

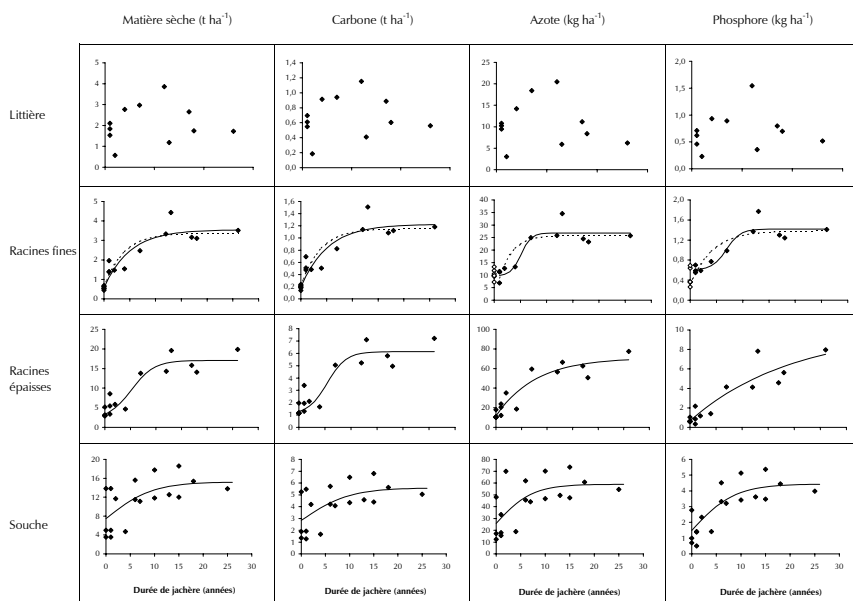


Figure 1.4 (suite) b. compartiments souterrains

Ligne continue : modèle à faibles contraintes (voir texte et Tableau 1.4). Ligne pointillée : modèle à fortes contraintes. Marques pleines : données utilisées pour l'ajustement du modèle.

Toutes les valeurs souterraines ont été calculées pour l'horizon 0-40 cm.

Données en Annexe 7.

Racines fines : diamètre entre 0 et 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souche non comprise)

1.3.3. Analyses statistiques

Considérant la valeur assez stable de la durée de la jachère au-delà de laquelle aucune évolution nette de la biomasse végétale et du stockage des nutriments n'est observée (voir 3.2), les données ont été groupées en trois ensembles : les champs d'arachide (AR) ; les jeunes jachères (JAJ) de moins de 10 ans ; les jachères âgées (JAA) de plus de 10 ans.

Tableau 1.5 Bilan simplifié et accroissement annuel de matière sèche, carbone, azote et phosphore dans la biomasse végétale aérienne et souterraine, pendant une succession culture-jachère.

	Stock total			Variation annuelle (selon l'âge de la jachère)		
	Champ d'arachide	Jachère jeune	Jachère âgée	0-1 an	1-10 ans	10-25 ans
MS (t ha⁻¹)						
Biomasse aé.	3,3	29,7	44,4	17,9	2,1	0,0
Biomasse sout.	11,4	18,3	34,8	3,4	1,6	0,2
C (t ha⁻¹)						
Biomasse aé.	1,2	11,0	16,4	6,6	0,8	0,0
Biomasse sout.	4,3	6,7	12,6	1,3	0,6	0,0
N (kg ha⁻¹)						
Biomasse aé.	59	151	186	59,2	9,0	-0,7
Biomasse sout.	47	80	147	4,0	6,9	0,5
P (kg ha⁻¹)						
Biomasse aé.	3,3	15,0	22,1	7,8	1,0	0,0
Biomasse sout.	2,6	4,6	11,6	0,3	0,7	0,1

Les accroissements annuels ont été estimés en utilisant les valeurs moyennes calculées à partir du modèle pseudo-logistique quand elles étaient disponibles (voir 1.3.2.), et à partir d'une simple régression linéaire dans les autres cas.

Tableau 1.6 Analyse de variance réalisée sur les stocks de matière sèche, carbone, azote et phosphore dans la biomasse végétale des parcelles en culture et en jachère (jachères jeunes : âgées de moins de 10 ans ; jachères âgées : 10 ans et plus).

			Champ d'arachide		Jachère jeune		Jachère âgée		F			
			Moyenne(±ET)	n	Moyenne(±ET)	n	Moyenne(±ET)	n				
Stockage de matière sèche (t ha ⁻¹)												
BA ⁽¹⁾	Ligneuse dont:		0,3 ±0.2	c	6	21,8 ±2.8	b	10	40,5 ±1.2	a	7	69,1 ***
		- tronc	nd			11,0 ±1.5	b	10	22,7 ±0.9	a	7	40,4 ***
		- rameau	nd			6,7 ±0.9	b	10	11,7 ±0.3	a	7	40,4 ***
		- feuille	nd			4,03 ±0.57	b	10	6,11 ±0.43	a	7	10,1 **
	Herbacée	2,96 ±0.22	b	6	5,97 ±0.83	a	6	1,65 ±0.21	c	5	29,6 ***	
Litière			nd		1,96 ±0.36	a	6	2,24 ±0.47	a	5	0,0	
Racine	Fine	0-10 cm	0,24 ±0.02	c	6	0,92 ±0.08	b	6	1,35 ±0.12	a	5	56,5 ***
		10-20 cm	0,15 ±0.01	c	6	0,31 ±0.06	b	6	0,91 ±0.14	a	3	18,0 ***
		20-30 cm	0,10 ±0.01	c	6	0,27 ±0.04	b	6	0,68 ±0.03	a	3	39,4 ***
		30-40 cm	0,07 ±0.00	c	6	0,22 ±0.03	b	6	0,67 ±0.08	a	3	45,6 ***
		0-40 cm	0,57 ±0.04	c	6	1,70 ±0.18	b	6	3,51 ±0.24	a	5	56,5 ***
		Epaisse	3,4 ±0.4	c	6	7,0 ±1.5	b	6	16,7 ±1.3	a	5	35,2 ***
	Souche	7,5 ±3.2	a	3	9,6 ±1.6	a	8	14,6 ±1.0	a	7	3,5	
Stockage de carbone (t ha ⁻¹)												
BA ⁽¹⁾	Ligneuse dont:		0,1 ±0.2	c	6	8,2 ±1.1	b	10	15,2 ±0.47	a	7	69,1 ***
		- tronc	nd			4,15 ±0.57	b	10	8,49 ±0.32	a	7	40,4 ***
		- rameau	nd			2,52 ±0.32	b	10	4,38 ±0.12	a	7	40,4 ***
		- feuille	nd			1,52 ±0.22	b	10	2,29 ±0.16	a	7	7,8 *
	Herbacée	1,11 ±0.09	b	6	2,14 ±0.27	a	6	0,54 ±0.08	c	5	29,6 ***	
Litière			nd		0,65 ±0.11	a	6	0,72 ±0.13	a	5	0,0	
Racine	Fine	0-10 cm	0,08 ±0.01	c	6	0,31 ±0.03	b	6	0,47 ±0.04	a	5	36,6 ***
		10-20 cm	0,05 ±0.00	c	6	0,10 ±0.02	b	6	0,31 ±0.05	a	3	18,0 ***
		20-30 cm	0,04 ±0.00	c	6	0,09 ±0.01	b	6	0,24 ±0.01	a	3	39,4 ***
		30-40 cm	0,02 ±0.00	c	6	0,07 ±0.01	b	6	0,23 ±0.02	a	3	39,4 ***
		0-40 cm	0,19 ±0.01	c	6	0,58 ±0.06	b	6	1,21 ±0.08	a	5	56,5 ***
		Epaisse	1,29 ±0.14	c	6	2,58 ±0.57	b	6	6,06 ±0.47	a	5	24,9 ***
	Souche	2,83 ±1.22	a	3	3,57 ±0.61	a	8	5,33 ±0.38	a	7	3,5	
Stockage d'azote (kg ha ⁻¹)												
BA ⁽¹⁾	Ligneuse dont:		1,5 ±0.9	c	6	99,4 ±13.2	b	10	162,5 ±8.0	a	7	42,7 ***
		- tronc	nd			26,7 ±4.4	b	10	51,4 ±1.7	a	7	27,6 ***
		- rameau	nd			19,7 ±2.6	b	10	32,6 ±1.3	a	7	33,1 ***
		- feuille	nd			53,0 ±7.5	b	10	78,5 ±5.9	a	7	7,8 *
	Herbacée	57,1 ±4.1	a	6	40,9 ±10.1	b	6	12,8 ±1.4	c	5	20,2 ***	
Litière			nd		11,0 ±2.2	a	6	10,4 ±2.7	a	5	0,1	
Racine	Fine	0-10 cm	4,1 ±0.4	c	6	7,0 ±0.1	b	6	10,3 ±1.0	a	5	19,3 ***
		10-20 cm	2,6 ±0.2	b	6	2,5 ±0.7	b	6	6,9 ±1.2	a	3	6,4 *
		20-30 cm	1,7 ±0.1	b	6	2,2 ±0.5	b	6	5,1 ±0.3	a	3	5,8 *
		30-40 cm	1,1 ±0.1	b	6	1,7 ±0.4	b	6	5,1 ±0.6	a	3	11,3 **
		0-40 cm	9,4 ±0.7	b	6	13,4 ±2.5	b	6	26,8 ±2.0	a	5	12,6 ***
		Epaisse	11,7 ±1.2	c	6	28,3 ±6.9	b	6	62,8 ±4.6	a	5	29,7 ***
	Souche	25,9 ±11.2	b	3	38,4 ±7.3	ab	8	57,6 ±4.1	a	7	4,5 *	
Stockage de phosphore (kg ha ⁻¹)												
BA ⁽¹⁾	Ligneuse dont:		0,1 ±0.1	c	6	10,5 ±1.4	b	10	20,1 ±0.6	a	7	69,1 ***
		- tronc	nd			7,5 ±1.0	b	10	15,5 ±0.5	a	7	40,4 ***
		- rameau	nd			1,79 ±0.25	b	10	2,96 ±0.12	a	7	23,4 ***
		- feuille	nd			1,19 ±0.18	b	10	1,68 ±0.12	a	7	3,6
	Herbacée	3,20 ±0.25	a	6	3,86 ±0.98	a	6	1,27 ±0.10	b	5	11,7 **	
Litière			nd		0,64 ±0.11	a	6	0,78 ±0.21	a	5	0,0	
Racine	Fine	0-10 cm	0,18 ±0.03	c	6	0,37 ±0.03	b	6	0,55 ±0.05	a	5	43,4 ***
		10-20 cm	0,11 ±0.02	b	6	0,13 ±0.02	b	6	0,36 ±0.06	a	3	5,7 *
		20-30 cm	0,07 ±0.01	c	6	0,11 ±0.01	b	6	0,27 ±0.01	a	3	15,1 ***
		30-40 cm	0,05 ±0.00	c	6	0,09 ±0.01	b	6	0,27 ±0.03	a	3	40,5 ***
		0-40 cm	0,41 ±0.06	c	6	0,70 ±0.07	b	6	1,42 ±0.09	a	5	25,6 ***
		Epaisse	0,68 ±0.07	c	6	1,68 ±0.55	b	6	6,02 ±0.80	a	5	15,7 ***
	Souche	1,49 ±0.64	b	3	2,26 ±0.47	b	8	4,20 ±0.30	a	7	10,4 **	

nd : non déterminé. Moyenne ± ET.

p{Ho : Fobs>Fth} : *<0,05 ; **<0,01 ; ***<0,001.

Données dans le Tableau 1.3 et en Annexe 7.

Racines fines : diamètre entre 0 et 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souche non comprise)

Les stocks moyens de la biomasse végétale et la productivité nette (variation annuelle des stocks) ont été résumées dans le Tableau 1.5. Une accumulation plus rapide des éléments minéraux se produit généralement pendant la première année de jachère. Cela n'a pas été le cas pour l'azote et le phosphore de la biomasse souterraine ; la plus grande croissance des stocks pour ces éléments a été observée entre la première et la dixième année de jachère. La MS, le carbone, l'azote et le phosphore accumulés ont été 10 à 20 fois moins élevés au-delà de 10 ans de jachère.

Des analyses de variance ont été réalisées sur ces trois groupes (Tableau 1.6). Des accroissements significatifs des stocks de MS, C, N et P dans la BA ont été trouvés entre les groupes AR et JAJ, et entre JAJ et JAA. Les stocks de N et P dans les herbacées ont diminué tout au long de la succession, bien que la biomasse la plus importante ait été trouvée dans les jachères jeunes. Les volumes dans les petites et grosses racines ont augmenté significativement à chaque étape de la succession, quel que soit l'élément considéré. Alors que la biomasse des souches s'est fortement développée entre JAJ et JAA, les différences n'ont pas été statistiquement significatives, sauf pour le phosphore.

1.3.4. Dynamique post-jachère de la biomasse végétale aérienne

Les estimations présentées plus haut ne prennent pas en compte les translocations possibles pendant la saison sèche. Ainsi, les restitutions de N et P de la BA au sol pourraient être surévaluées.

Biomasse aérienne herbacée. Les estimations des restitutions potentielles de C, N et P de la biomasse herbacée vers le sol seraient de 2,1 tC, 41 kgN et 3,9 kgP ha⁻¹ dans une jachère jeune ; 0,5 tC, 13 kgN et 1,3 kgP ha⁻¹ dans une jachère âgée (Tableau 1.6). Toutefois, ces valeurs sont des surestimations grossières car les restitutions de carbone et d'azote au sol après la coupe dépendent fortement du passage des feux.

Biomasse aérienne ligneuse (Figure 1.5). Les restitutions de MS dans une jeune jachère ont été évaluées à 8,4 t ha⁻¹ lorsque le taux de combustion de la BDPB est de 50 %, ou de 1,7 t ha⁻¹ lorsqu'il est de 90 %. Les résultats calculés pour les jachères âgées sont de 18,4 et 10,2 tMS ha⁻¹. Cela signifierait l'existence d'un recyclage in situ de 0,6-3,1/0,8-4,0 tC et 9-44/12-59 kgN ha⁻¹ selon l'efficacité du brûlis (90-50 %) et l'âge de la jachère (jeune/âgée). Les restitutions de P au sol atteindraient 6,9 et 7,0 kg ha⁻¹, après la défriche de jachères jeunes ou âgées. La récolte de bois survenant lors de la coupe des jachères âgées conduirait aux exportations suivantes : 50 % de MS et de C, 27 % de N et 66 % de P initialement contenus dans la BA ligneuse.

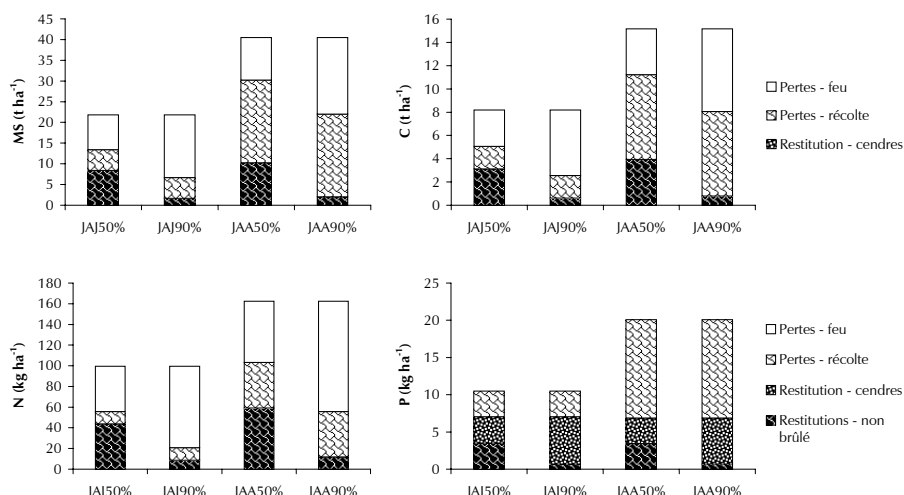


Figure 1.5 Devenir de la matière sèche, du carbone, de l'azote et du phosphore dans la biomasse aérienne ligneuse après la défriche d'une jachère jeune (JAJ) et d'une jachère âgée (JAA) (jachère jeune : âgée de moins de 10 ans ; jachère âgée : 10 ans et plus). Deux scénarios sont considérés : 50 % et 90 % de la biomasse disponible pour le brûlis est effectivement brûlée.

Hypothèses : les cendres ne contiennent ni MS, ni C ni N ; tout le P, sauf celui exporté pour les besoins en bois, est restitué au sol sous forme de cendres et de biomasse non brûlée.

Données en Annexe 8.

1.4. DISCUSSION

Les composantes de la biomasse végétale montrent des dynamiques contrastées au cours du cycle culture-jachère. Après l'abandon des cultures, les biomasses ligneuse et racinaire augmentent aux dépens de la strate herbacée, tandis que la litière ne présente aucune évolution nette. Ces tendances sont conformes aux observations de Kotto-Same *et al.* (1997) en zones humides. Cependant, même les stocks de carbone les plus élevés dans la biomasse végétale (29 t ha⁻¹) rapportés ici sont faibles, comparés aux valeurs moyennes données par Allen-Diaz *et al.* (1996) (118tC ha⁻¹) et Tiessen *et al.* (1998) (50tC ha⁻¹) pour les forêts tropicales sèches et les savanes. Le potentiel de séquestration annuelle du carbone dans notre étude n'a été comparable aux travaux de Tiessen et de ses collègues (5 t ha⁻¹) que pendant la première année de jachère. Toutefois, la biomasse végétale et la productivité nette trouvée dans notre étude se sont mieux accordées à celles généralement relevés dans les formations sèches boisées du Miombo (AGB : 21-84 tMS ha⁻¹ ; BGB : 7-39 tMS ha⁻¹) (Desanker *et al.*, 1995). En outre, les stocks en nutriments dans la biomasse végétale ont été beaucoup plus bas que ceux observés par Singh et Singh (1991) dans une forêt sèche indienne, plus élevés que ceux relevés par Lamotte et Bourlière (1983) (100-150 kgN et 19 kgP ha⁻¹), mais sensiblement les

mêmes que ceux d'une jachère de huit ans dans une région proche de Guinée (Sirois *et al.*, 1998).

Swift et Anderson (1994) ont défini le concept de biote de production - la communauté de plantes et d'animaux qui fournissent aux agriculteurs des biens tels que de la nourriture et des matériaux de construction - et le biote de ressource - l'ensemble des "*organismes qui contribuent positivement à la productivité du système*"; cette distinction servira de support pour la discussion.

1.4.1. La jachère comme écosystème productif

Le bois fournit 90 % des besoins des populations rurales des savanes ouest-africaines pour l'énergie domestique et le matériel de construction (Bertrand, 1977 ; Breman and Kessler, 1995). Cependant, les évaluations des stocks de bois sur pied et de la productivité des jachères et des zones boisées de la sous-région étudiée sont rares et difficiles à obtenir, à cause des feux incontrôlés, du pâturage, des coupes de bois et de la diversité des sols. Par exemple, Breman et Kessler (1995) ont donné des valeurs de biomasse ligneuse variant entre 20 et 60 t ha⁻¹ en Afrique subsaharienne. Les valeurs plus fortes de la biomasse ligneuse calculées lors de notre étude concordent faiblement avec les estimations moyennes de Martinez-Yrizar (1995) en forêt tropicale sèche (90 t ha⁻¹) et de Nye et Greenland (1960) dans les jachères et les savanes du Ghana (54 t ha⁻¹). Ceci doit être une conséquence des contraintes pédohydrauliques dues à une accumulation superficielle d'argile dans les sols et à une disponibilité limitée en nutriments. La productivité initiale ligneuse a atteint 2 tMS ha⁻¹ pendant les 10 premières années après l'abandon des cultures ; cela correspond aux estimations de Catinot (1994) (2-3 t ha⁻¹ an⁻¹) dans les savanes gérées de l'écozone, quoique légèrement plus faible que celles de Alexandre et Kairé (2000) dans les successions secondaires d'Afrique de l'Ouest (2,5-4,7 t ha⁻¹ an⁻¹). Dans les jachères plus âgées, la productivité chute à 0,1 tMS ha⁻¹ an⁻¹, ce qui est très inférieur aux données de la FAO (1989) pour les forêts sèches adultes de la région (1,2 t ha⁻¹). Les propriétés du sol mentionnées plus haut peuvent encore être invoquée afin d'expliquer de telles différences. La coupe des arbres par les agriculteurs, dont la valeur cumulée depuis l'abandon des cultures a été estimée à 2 tMS ha⁻¹ dans les jachères locales (Kairé, 1999), n'a qu'un impact limité sur la productivité ligneuse. Afin de satisfaire leur besoin en énergie domestique, les agriculteurs ont l'habitude de récolter du bois mort plutôt que de couper des arbres vivants, ce qui leur donne moins de travail. D'après le travail de Shackleton (1998) dans les savanes sud-africaines, la production locale de bois mort pourrait être estimée à 0,4 et 0,7 t ha⁻¹ dans les jachères jeunes et âgées.

L'usage pastoral des jachères entre généralement en conflit avec les besoins en produits ligneux, étant donné que la strate ligneuse induit une rapide baisse de la biomasse herbacée dans les jachères de plus de 10 ans. La biomasse herbacée maximale dans les jachères les plus jeunes atteint

6,5 t ha⁻¹, ce qui correspond approximativement aux données de Nye et Greenland (1960) dans les savanes (1,5-7,6 t ha⁻¹), de Fournier (1982) en Côte d'Ivoire (3,5-9 t ha⁻¹) et de Lamotte et Bourlière (1983) dans les savanes plus humides (7 t ha⁻¹). La strate herbacée des jachères est une source intéressante de fourrage pour le bétail : elle contribue à 75 % du régime alimentaire du cheptel local (Delacharlerie, 1994). Des résultats récents obtenus par Ickowicz (1997) suggèrent que les jachères d'âge moyen, assurant du fourrage à la fois en qualité et en quantité, ont la meilleure valeur pastorale parmi tous les faciès de végétation des champs non cultivés du site d'étude.

1.4.2. Rôle de la biomasse végétale dans le maintien de la fertilité des agroécosystèmes.

1.4.2.1. Cycle de l'azote et du phosphore dans la biomasse végétale.

La plus grande efficacité des communautés végétales des jeunes jachères et des pâtures, en comparaison de celle des plantes domestiques, pour la reconstitution de stocks significatifs d'azote et de phosphore assimilable dans le sol, et pour peu que l'intégrité biologique ait été maintenue, a été démontrée dans plusieurs travaux et ne sera donc pas débattue ici (voir Chapitre 2). D'un point de vue agroécologique, la jachère a été décrite comme un processus d'accumulation de matière organique et d'éléments minéraux (Kowal and Kassam, 1978 ; Juo et Manu, 1996), ce qui est particulièrement évident ici pendant la première année de jachère suivant l'abandon des cultures (Tableau 1.5). Bien que l'exportation de bois et d'herbe pendant la période de jachère - à des fins énergétiques et pour les besoins en fourrage - reste localement négligeable (Masse *et al.*, 1998), des pertes importantes en nutriments, dues à des prélèvements ou à des feux, dans les strates arborées et herbacées, apparaissent lors de la coupe de la jachère. De telles pratiques entraînent des pertes de 40 à 94 % des stocks d'azote contenu dans la biomasse végétale aérienne (selon l'efficacité des feux et l'évolution de la strate herbacée), et de 24 à 62 % de phosphore (selon l'âge de la jachère). On peut supposer que les pertes d'azote ont des conséquences modérées sur les rendements des cultures suivantes, car l'arachide, cultivée préférentiellement aux autres plantes dans l'auréole de brousse, est une légumineuse (mais l'efficacité des cultivars locaux d'arachide pour fixer l'azote est très variable d'après Pieri, 1989).

Ce n'est pas le cas pour le phosphore, qui est une ressource non renouvelable. Les pratiques de cultures sur brûlis peuvent être justifiées seulement dans un contexte où la disponibilité de la force de travail (humaine et motorisée) est faible (Nye and Greenland, 1960). Bien que peu étudié, le compartiment racinaire représente un tiers des stocks d'azote et de phosphore totaux dans la biomasse végétale. En tenant compte de l'immobilisation du phosphore après la récolte de la biomasse d'arachide (2,8 kgP ha⁻¹), la coupe d'une jachère d'un an pourrait fournir suffisamment

de phosphore pour trois années de culture, grâce aux restitutions au sol de la BA abattue d'une part, et de la décomposition de la biomasse racinaire d'autre part ($7,4 \text{ kgP ha}^{-1}$). En fait, les arachides ne sont jamais cultivées plus d'un an en Haute-Casamance, ce qui suggère (1) une possible prééminence de problèmes de maladies et de mauvaises herbes, (2) un possible asynchronisme entre la rétrocession des nutriments et les besoins des plantes pendant la première année de culture, dû à une minéralisation massive de la biomasse végétale et de la MOS (Myers *et al.*, 1994), (3) une rapide conversion du P vers des formes moins assimilables dans le sol. Il faut aussi retenir que le recyclage interne (translocation) dans l'arbre, n'a pas été pris en compte dans nos calculs ; il pourrait conduire à une surestimation des stocks d'éléments minéraux dans la biomasse ligneuse à la fin de la saison sèche (Bremner and Kessler, 1995).

1.4.2.2. Dynamique du carbone

Beaucoup de preuves démontrent aujourd'hui la non-durabilité d'une fertilisation strictement minérale sous les Tropiques, et particulièrement en Afrique de l'Ouest (Pieri, 1989). Des amendements organiques associés sont nécessaires car ils maintiennent les taux de MOS et une partie des propriétés du sol associées à la MO (Pieri, 1989 ; Tiessen *et al.*, 1994 ; Syers, 1997).

Comme mentionné plus haut, seule une petite fraction de la biomasse végétale aérienne retourne au sol au moment de la coupe et pendant le cycle culture-jachère. C'est pourquoi les apports organiques du sol résultent surtout des racines et, dans une moindre mesure, de la litière. Il n'y a cependant pas beaucoup d'études sur la dynamique quantitative des racines dans les savanes tropicales, spécialement en Afrique de l'Ouest. Dans un site plus sec du Sénégal, Chopart (1980) a estimé la biomasse des racines fines d'arachide à $0,3 \text{ t ha}^{-1}$, soit la moitié des valeurs données dans la présente étude. La biomasse moyenne des racines de 20 jeunes jachères herbacées a été évaluée à 2 t ha^{-1} par Charreau et Nicou (1971). Dans la zone soudanienne de la Côte d'Ivoire, César et Coulibaly (1993) ont aussi observé des valeurs proches des nôtres ($2,6$ et $5,3 \text{ t ha}^{-1}$ de racines fines dans des jachères de 10 et 15 ans). De façon générale, la biomasse racinaire ligneuse en Afrique SubSaharienne est évaluée à $10\text{-}30 \text{ t ha}^{-1}$ (Bremner and Kessler, 1995). La plage des valeurs trouvées dans cette étude pour la biomasse racinaire totale correspond assez bien aux estimations relatives aux savanes moins perturbées et plus humides ($3,5$ to 27 t ha^{-1} selon Menaut et César, 1979) et aux forêts sèches ($23,4 \text{ t ha}^{-1}$ selon Martinez-Yrizar, 1995).

La part relative de MS attribuée à la BA végétale et à la BS (rapport tige/racine) observée dans notre étude s'est révélée 10 fois plus faible que celle donnée par Martinez-Yrizar (1995) pour les forêts tropicales sèches, ou que celle notée par Delaney *et al.* (1997) pour l'évaluation de la BS en forêts sèches d'Amérique du Sud. Une telle différence pourrait s'expliquer par

la fréquence des feux. Supposer que le climax végétal n'a pas été atteint après 25 ans de jachère n'est pas pertinent : des bois sacrés, non perturbés, trouvés sur le site d'étude ont montré une physionomie similaire aux vieilles jachères (observations non publiées).

Les résultats de l'ajustement (voir 1.3.2.) indiquent un décalage temporel de la croissance maximale entre les composantes aériennes et souterraines de la strate ligneuse. Les conséquences écologiques de ce décalage sont très importantes : elles suggèrent que les ligneux donnent la priorité au développement d'organes autotrophes plutôt qu'au système racinaire lors de la mise en place de la succession. Ce n'est que plus tard que du carbone est attribué à la biomasse souterraine. Ceci résulterait de la compétition pour la lumière selon Shukla et Ramakrishnan (1984), et pour les éléments minéraux (principalement le P) selon nous. Ceci démontre que la formation d'un système racinaire puissant dans la végétation naturelle apparaît seulement dans les jachères âgées. Ce phénomène est de la plus haute importance pour définir des règles durables de gestion des jachères, car la production rapide de biomasse végétale -et l'amélioration du sol (Chapitre 2)- enregistrée après l'abandon des cultures, doit reposer essentiellement sur la capacité de rejet des plantes ligneuses.

Dans une perspective plus dynamique, les racines devraient compter pour 40 à 85 % de la production primaire nette des populations végétales (Fogel, 1985). Le carbone racinaire originaire des parties aériennes retourne au sol à travers des processus d'exudation et de décomposition des racines. Quantifier ces apports est une tâche difficile. Les évaluations du taux de renouvellement sous les climats tropicaux secs vont de 0,5 à 1,2 an⁻¹ (Menaut and César, 1979 ; Lamotte and Bourlière, 1983 ; Brown *et al.*, 1994). Pendant la saison sèche 1993-94, la biomasse des racines fines a diminué de moitié dans quatre jachères locales (Manlay, 1994). Ainsi, en prenant un taux de renouvellement de 0,5 an⁻¹, l'apport en carbone de l'ensemble des petites et grosses racines, au sol des jeunes jachères devrait atteindre 1,6/3,6 tC ha⁻¹ an⁻¹. C'est une évaluation approximative des flux réels en carbone, sachant que le taux de renouvellement des grosses racines est probablement surestimé, mais que l'exudation des racines n'est pas prise en compte.

1.5. CONCLUSION

D'un point de vue strictement productiviste et limité, l'estimation de la durée optimale de la jachère dépend plus ou moins de besoins humains conflictuels et du contexte démographique. Dans les jachères perturbées par le feu, nos résultats démontrent l'existence d'un seuil écologique proche de 10 ans après abandon des cultures. Une valeur similaire a été enregistrée dans les études floristiques et physionomiques de Stromgaard (1986) et

Donfack *et al.* (1995) sous des climats équivalents ; Brown et Lugo (1990) ont obtenu une valeur supérieure (15 ans) dans des successions plus humides. Au-delà de 10 ans, la conservation de la jachère dans un but de production de biomasse végétale de valeur, ne peut s'avérer justifiée que si la densité de population est faible ; en effet, d'après notre étude et selon les résultats de Shackleton (1998), les jachères âgées ne seraient plus productives que les jeunes jachères qu'en terme de production de bois mort. Des besoins plus importants en bois et en fourrage pourraient être les mieux satisfaits avec des jachères de 6 à 10 ans. Les bilans en éléments minéraux (N et P) indiquent que de telles jachères devraient être très efficaces dans une optique de satisfaction des besoins des cultures pendant plusieurs années, bien que les pratiques locales de défriche conduisent à une importante perte en éléments minéraux. Cependant, la valeur d'un tel seuil écologique repose certainement sur (1) la nature des pratiques locales de coupe, (2) l'intensité des cultures, (3) la durée de l'installation des habitants. Et des modèles très différents de dynamique de végétation sont prévisibles dans les successions secondaires, selon la façon dont les arbres doivent compter sur la capacité de rejet de leurs souches (dans un contexte de faible pression démographique), ou sur des stratégies de semis (dans des scénarios de forte anthropisation).

D'un autre côté, toutes ces considérations productivistes et minérales sont très restrictives. Le déclin bien connu des rendements dans le bassin arachidier du centre du Sénégal, à 200 km de notre site d'étude, et après plusieurs décennies d'agriculture minière, rappellent que la rotation courte arachide-jachère est rarement durable (Pieri, 1989). Notre travail suggère que, lorsqu'ils sont inévitables, les substituts à la jachère doivent au moins assurer l'installation d'une importante biomasse racinaire, la restauration des stocks d'énergie du sol, et les modifications conséquentes de l'organisation écologique fonctionnelle, qui permettent un contrôle des maladies. Les techniques alternatives à la jachère longue peuvent avoir pour but d'accélérer la succession avec les jachères améliorées (Peltier, 1993 ; Harmand et Njiti, 1998) ou d'insérer dans des systèmes de culture continue les mécanismes écologiques de conservation de la fertilité du sol propres à la jachère, par l'adoption de plantation d'arbres dispersés dans les cultures ou de systèmes de haies vives et de pratiques de labour minimal qui conservent les souches.

CHAPITRE 2.

DISTRIBUTION DU CARBONE, DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE DANS LES AGROÉCOSYSTÈMES D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE

II - LA COMPOSANTE SOL SOUS CULTURE SEMI-PERMANENTE



Prélèvements de racine et de sol dans une jachère de 6 ans

CHAPITRE 2.

DISTRIBUTION DU CARBONE, DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE DANS LES AGROÉCOSYSTÈMES D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE

II - LA COMPOSANTE SOL SOUS CULTURE SEMI-PERMANENTE

Accepté dans "Agriculture Ecosystems & Environment"

Raphaël J. MANLAY ^{a,b}, Dominique MASSE ^a, Jean-Luc CHOTTE ^a,
Christian. FELLER ^c, Maguette KAIRÉ ^d, Joël FARDOUX ^e, et Roger
PONTANIER ^a

^a IRD, BP1386, Dakar, Sénégal

^b mis à disposition par l'ENGREF, BP 5093, 34033 Montpellier Cedex 1,
France

^c CENA-USP, mis à disposition par l'IRD, Caixa Postal 96 13400-970
Piracicaba, SP, Brésil

^d ISRA, BP2312 Dakar, Sénégal

^e IRD, BP 5045, 34032 Montpellier, France

RESUME

L'évolution des propriétés du sol sous culture semi-permanente a été suivie à travers une chronoséquence arachide-jachère située dans la ceinture des savanes d'Afrique de l'Ouest. L'accent a été mis sur les teneurs et les stocks en carbone (C), azote (N) et phosphore assimilable (noté P_{OD}) mesuré selon

la méthode d'Olsen modifiée par Dabin (1967).

Les propriétés physiques du sol (texture, pF, densité) sont restées stables dans toutes les parcelles. Des accroissements significatifs de carbone, d'azote et magnésium résultant de l'abandon de la culture, ont été mis en évidence uniquement dans l'horizon 0-20 cm (la texture étant le principal facteur déterminant les propriétés du sol en dessous de cette profondeur). Les stocks de carbone dans l'horizon 0-20cm du sol ont été de $12,2 \pm 0,6$ (erreur-type) t ha^{-1} dans les parcelles d'arachide ($n=6$), $15,8 \pm 0,8 \text{ t ha}^{-1}$ dans les jeunes jachères (1-9 ans ; $n=6$) et $14,9 \pm 0,8 \text{ t ha}^{-1}$ dans les jachères âgées ($n=5$). Les stocks de N ont été respectivement de $1,00 \pm 0,05$, $1,30 \pm 0,08$ et $1,28 \pm 0,05 \text{ t ha}^{-1}$. Les stocks de P_{OD} ont atteint $6,47 \pm 0,56$, $8,47 \pm 0,82$ et $6,19 \pm 0,64 \text{ kg ha}^{-1}$.

L'évolution inattendue et rapide des propriétés du sol après l'abandon des cultures a été attribuée au rétablissement rapide de la végétation ligneuse. Les pratiques d'amélioration ou de substitution à la jachère qui conservent la capacité de rejet des arbres sont donc nécessaires. Cependant, la stabilité des propriétés chimiques du sol dans les plus vieilles jachères comparées aux plus jeunes n'avait pas non plus été prévue. Elle a été attribuée à la faible protection de la matière organique du sol contre l'oxydation due à l'activité biologique. Ceci a été vérifié par une expérimentation avec des sacs de toile qui a révélé que plus de 40 à 60 % de la biomasse racinaire ligneuse en décomposition disparaissait après 6 mois d'incubation *in-situ*. Les schémas de recyclage rapide du carbone par voie biologique, et donc des entrées d'azote et de phosphore organique dans le sol, pourraient être de meilleurs indicateurs que les stocks de carbone et de nutriments du sol, pour évaluer la reconstitution de la fertilité des sols sableux pendant la période de jachère dans les savanes ouest-africaines.

MOTS-CLE

Azote, Carbone, Culture semi-permanente, Jachère, Phosphore, Racine, Savane, Sénégal, Sol

2.1. INTRODUCTION

Les systèmes agropastoraux à faibles intrants sont répandus dans les savanes ouest-africaines (Ker, 1995). Leur durabilité repose sur une faible densité de population et sur la gestion des ressources organiques (fumure, jachère). Sous culture semi-permanente traditionnelle, un champ était cultivé pendant quelques années, puis laissé en jachère pendant 15 à 20 ans selon le sol, le climat et le contexte humain (Nye and Greenland, 1960). La jachère avait pour rôle de reconstituer la fertilité des agroécosystèmes, et de fournir des aliments, du bois et du fourrage (Floret *et al.*, 1993).

Suite à la forte croissance démographique, l'incertitude sur la tenure foncière et les améliorations techniques qui augmentent l'efficacité du travail, les savanes ouest-africaines connaissent un besoin croissant en terres. Ainsi, les pratiques organiques traditionnelles qui étaient adaptées à une faible densité de population, subissent une transformation vers des pratiques plus intensives résultant de l'extension des cultures permanentes. A cause du raccourcissement consécutif et progressif de la période de jachère en Afrique tropicale (Floret *et al.*, 1993 ; Gleave, 1996), des améliorations ou des alternatives à la pratique de la rotation culture-jachère sont nécessaires ; mais de telles propositions doivent tenir compte des multiples rôles de la jachère. L'étude de la distribution du carbone (C), de l'azote (N) et du phosphore (P) entre les différentes composantes de l'écosystème est un préalable nécessaire avant toute proposition de transformation des systèmes de culture actuels. La durabilité de ces systèmes - comme celle des écosystèmes locaux naturels - repose encore largement sur le recyclage adéquat de l'énergie et des éléments minéraux endogènes.

Le présent article concerne les bilans de carbone, d'azote et de phosphore dans le sol pendant le cycle culture-jachère. Une étude de la dynamique de la biomasse végétale réalisée dans le Sud-Sénégal a indiqué que les jachères jeunes (de moins de 10 ans) connaissent une rapide accumulation de carbone, d'azote et de phosphore dans la végétation, intervenant essentiellement pendant la première année de jachère (Chapitre 1). L'accroissement dans les jachères âgées est plus lent ; mais le maintien de longues périodes de jachère est nécessaire pour préserver la productivité enregistrée lors des premiers stades de la succession, puisqu'elle repose principalement sur la capacité des souches à rejeter. Tandis que la majeure partie de l'azote et du phosphore est perdue par le système lors de la défriche du fait du brûlis et de la récolte de bois, l'évolution des propriétés du sol doit être évaluée comme indicateur de la fertilité de l'écosystème. Dans les sols chimiquement pauvres des Tropiques, comme ceux des savanes d'Afrique de l'Ouest, ces propriétés dépendent largement des apports organiques (Swift and Woome, 1993 ; Brown *et al.*, 1994). Le carbone, l'azote et le phosphore ont longtemps été considérés comme des

indicateurs fiables de la fertilité des sols de savane (Nye and Greenland, 1960 ; Jones and Wild, 1975). Dans les sols subsahariens sableux et fortement lessivés, les propriétés chimiques (pH, capacité d'échange en cation ou CEC) et physiques (porosité, stabilité) ont été largement dépendantes de la teneur en matière organique du sol (MOS) (de Ridder and van Keulen, 1990 ; Feller, 1995a ; Asadu *et al.*, 1997), même si la capacité de stockage du carbone organique du sol est très limitée par la texture grossière du sol (Pieri, 1989 ; Feller et Beare, 1997). En outre, la matière organique est la principale source d'énergie du biote souterrain, et contrôle donc la fertilité biologique du sol (Herrick et Wander, 1998). Des fractions de carbone avec des fonctions et des taux de renouvellement différents peuvent être isolées en utilisant un simple fractionnement granulométrique de la MOS (Feller *et al.*, 2000). L'azote et le phosphore sont eux reconnus comme les éléments minéraux les plus limitants de la productivité des savanes africaines (Jones and Wild, 1975 ; Bekunda *et al.*, 1997). Leur cycle est étroitement lié à la dynamique de la matière organique : la majeure partie de l'azote et du phosphore assimilable est stockée dans la végétation et devient assimilable pour les plantes après une oxydation microbiologique d'apports organiques frais. Les études publiées sur les dynamiques du carbone, de l'azote et du phosphore du sol durant le cycle culture-jachère en Afrique de l'Ouest sèche, sont encore peu nombreuses et, excepté le travail de Tiessen *et al.* (1998) et Harmand *et al.* (2000), concernent plutôt les climats humides (Nye and Greenland, 1960 ; Kotto-Same *et al.*, 1997). D'un autre côté, beaucoup a été fait au sujet de l'impact de la défriche de la végétation primaire sur les propriétés du sol, mais peu de choses sont connues quant à son impact sur la dynamique de la biomasse végétale souterraine. Lorsque la jachère est manuellement convertie à la culture, seuls les systèmes racinaires sont épargnés (Floret *et al.*, 1993). Les souches ligneuses, permettant des rejets réguliers, survivent plusieurs années avant de mourir (Bohringer *et al.*, 1996). Le désouchage devient cependant une condition préalable commune à la mise en culture dans les savanes d'Afrique de l'Ouest, du fait de l'expansion des pratiques de labour mécanisé. Cette pratique remet en cause la durabilité de la culture itinérante, car il a été prouvé qu'elle cause des dommages sévères aux propriétés physiques et chimiques du sol (Hulugalle, 1994). Pourtant la décomposition rapide des systèmes racinaires ligneux, qui peut être mise en cause dans cette évolution, a rarement été quantifiée dans les systèmes de cultures sur brûlis en zone tropicale sèche.

Ce travail est le second d'une série de trois Chapitres visant à quantifier la distribution du carbone (C), de l'azote (N) et du phosphore (P) dans les agroécosystèmes sous cultures continue et semi-permanente telles qu'elles sont pratiquées dans le sud du Sénégal. Le Chapitre précédent traitait du stockage de C, N et P dans la plante au cours de la succession culture-jachère. Dans le Chapitre 3, les stocks de C, N et P sont évalués dans le système sol-plante sous culture continue.

Ici, nous (a) comparons les modes de stockage dans le sol du carbone, de l'azote et du phosphore assimilable au moyen d'une chronoséquence de culture-jachère dans une savane ouest-africaine et les mettons en relation avec les autres propriétés du sol ; (b) définissons des seuils temporels de l'évolution de ces éléments pendant la période de jachère ; (c) quantifions la décomposition post-jachère des systèmes racinaires et des entrées de N et P dans le sol qui y sont liées.

2.2. METHODES

2.2.1. Caractéristiques du site

L'étude a été réalisée entre 1995 et 1997 dans le village de Sare Yorobana (12°49'N - 14°53'O), Haute-Casamance, Sud-Sénégal. Une description détaillée du climat, de la végétation et des pratiques agricoles a été faite au Chapitre 1. Le climat est de type soudanien, tropical sec (moyenne annuelle des précipitations ces 20 dernières années : 960 mm de mai à octobre) avec une température moyenne de 28°C (Service de la Météorologie Nationale, station de Kolda). L'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne a été de 1570 mm entre 1977 et 1988 (Dacosta, 1989). La culture semi-permanente est pratiquée au sommet de la toposéquence typique, au relief peu accentué. Deux unités de terrain sont concernées :

- (1) un plateau couvert d'une mosaïque de bois, de savanes, de jachères et de champs de brousse, les formations anthropogènes étant rencontrées sur les bords du plateau (Akpo, 1998). Les sols sont décrits comme sableux et ferrugineux par Baldensperger *et al.* (1967) et appartiennent à l'ordre des Lixisols (FAO, 1998b) (description détaillée d'un profil typique de sol en Annexe 4). Des analyses réalisées dans 17 parcelles de la succession culture-jachère (voir Méthodes, ci-dessous) indiquent que la texture est sablo-limoneuse dans l'horizon 0-20cm, sablo-argilo-limoneuse dans l'horizon 30-40 cm. La teneur en carbone a atteint $5,5 \pm 0,3 \text{ g kg}^{-1}$ ($\pm$ erreur type) dans l'horizon 0-10 cm, $4,1 \pm 0,1 \text{ g kg}^{-1}$ dans l'ensemble du profil (0-40 cm). Les teneurs respectives d'azote ont été de $0,44 \pm 0,02$ et $0,36 \pm 0,01 \text{ g kg}^{-1}$. Les teneurs en phosphore assimilable ont été de $2,7 \pm 0,2$ et $2,0 \pm 0,1 \text{ mg kg}^{-1}$. Les autres propriétés principales étaient : légère acidité ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$: $5,5 \pm 0,1$) ; CEC : $2,5 \pm 0,1$ et $3,0 \pm 0,2 \text{ meq } 100\text{g}^{-1}$ de sol dans les horizons 0-10 et 30-40 cm, avec des taux de saturation diminuant de 85 ± 5 à $60 \pm 6 \%$ entre les horizons 0-10 et 30-40 cm ; pF 4,2 : $3,1 \pm 0,2 \%$ dans l'horizon 0-10cm et $7,7 \pm 0,6 \%$ dans l'horizon 30-40 cm ; densité apparente : $1,50 \pm 0,01 \text{ kg dm}^{-3}$ dans l'ensemble du profil,

- (2) un glacis, avec des sols similaires à ceux du plateau, mais avec une accumulation légèrement plus faible d'argile dans les horizons les plus profonds. Cette unité accueille toutes les cultures permanentes et les concessions.

Les éleveurs sédentaires Peuls ont adopté une agriculture diversifiée (céréales pluviales et irriguées, cultures de rente comme l'arachide et le coton) étroitement associée à l'élevage extensif.

2.2.2. Echantillonnage

Pour une économie de temps, une méthode synchrone a été adoptée : des parcelles voisines de culture et de jachère de différents âges peuvent être considérées comme représentatives d'une même parcelle pendant une succession, à la condition qu'elles aient les mêmes propriétés du sol et le même passé cultural. (Sanchez, 1987).

L'échantillonnage a été effectué au début de la saison sèche, au moment du maximum de biomasse aérienne dans les jachères, ou juste avant la récolte dans les champs d'arachide.

En raison de la distribution de la végétation, deux plans d'échantillonnage ont été adoptés, selon la gestion des terres :

- (1) les parcelles d'arachide (notées AR) : six champs, qui avaient été plantés en arachide (*Arachis hypogaea* L.) au cours d'une rotation biennale avec une jachère ou parfois du mil, pendant 4 à 15 ans, et qui n'avaient jamais été fertilisés chimiquement, ont été choisis. Quatre d'entre eux (AR01, AR02, AR03 et AR05) étaient situés sur le plateau et deux en haut de glacis (AR04 et AR06). Dans chacun d'eux, quatre placeaux de 16 m² ont été définis. Après la coupe de la végétation, des échantillons de sol ont été prélevés dans de petites fosses à chaque angle de chaque placeau afin d'effectuer des analyses de sol et de densité. La densité apparente a été mesurée grâce à un cylindre de 100 cm³,
- (2) les parcelles de jachère (notées JA), âgées de un à 26 ans (voir le Chapitre 1 pour la distribution des parcelles échantillonnées selon l'âge de la jachère). Le sol a été échantillonné pour pratiquer des analyses de sol et des mesures de densité apparente, au moyen de petites fosses tous les mètres le long d'un transect de 20 m, dans 11 parcelles.

Dans chaque cas, le sol et la densité apparente ont été pris tous les 10 cm, jusqu'à 40 cm de profondeur. Des prélèvements plus profonds n'auraient pas modifié nos interprétations, puisque les propriétés du sol ne sont pas influencées par le mode de gestion des terres en dessous de cette profondeur (Detwiler, 1986 ; Feller, 1995a).

2.2.3. Analyses de sol

Les échantillons de sol ont été délicatement tamisés (à 2 mm) et séchés à 105°C pendant 24 heures. Les échantillons ont été mélangés et une analyse a été réalisée pour chaque parcelle et/ou pour chaque horizon du sol. Le pH a été mesuré au moyen d'une solution de KCl (rapport sol/eau = 1/2,5). Le carbone et l'azote totaux des fractions granulométriques de la MOS ont été déterminés par combustion par voie humide (analyseur Fisons elemental Na2000 Carlo Erba) ; le carbone total du sol non fractionné a été mesuré par oxydation dans le dichromate. L'azote a été déterminé par la méthode Kjeldahl. Le phosphore assimilable (noté " P_{OD} ") l'a été par la méthode de Olsen modifiée par Dabin (1967) ; le P total du sol n'a pas été déterminé (le P de la biomasse végétale renvoie au P total et sera noté P_t). Les cations échangeables ont été extraits avec du CH_3COONH_4 à pH=7. La CEC a été mesurée par saturation du sol avec du $CaCl_2$, $2H_2O$, puis en substituant le Ca par du K. Le taux d'humidité pondéral a été déterminé à une succion équivalente à pF2,5 (0,322 atm) et pF4,2 (14,5 atm). Toutes les méthodes sont pleinement décrites dans Page *et al.* (1989).

Les stocks de C, N et P_{OD} du sol ont été obtenus par les mesures de densité apparente et les teneurs en C, N et P (Tableau 2.1). Parce qu'aucune différence significative entre les valeurs de densité apparente des différents traitements n'a été observée (voir 2.3.1.), les bilans et les statistiques sur les éléments minéraux du sol ont été calculés pour une profondeur identique du sol, et non pour une masse identique de sol comme le recommandent Ellert et Bethany (1995). Le fractionnement granulométrique de la MOS a été réalisé sur les fractions [0-50] et [50-2000] μm des échantillons des horizons 0-10 et 10-20 cm, selon la méthode simplifiée de tamisage de Gavinelli *et al.* (1995). Par la suite, la teneur en carbone d'une fraction renverra à la quantité de carbone par unité de masse de sol, alors que la concentration de carbone dans une fraction sera définie comme la quantité de carbone par unité de masse de la fraction. La teneur en carbone des deux fractions a permis d'estimer la distribution du carbone stocké entre les fractions fines et grossières, en supposant que les pertes de carbone soluble dues fractionnement sous eau étaient négligeables et que la densité apparente des deux fractions était identique.

Tableau 2.1 Teneurs en carbone, azote, et phosphore assimilable du sol, rapport C/N et densité apparente modifiée de la fraction [0-2000] μm dans les parcelles d'arachide (AR) et de jachère (JA).

a. C (g kg^{-1})					
Parcelle	Horizon du sol (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
AR01	3,93	3,19	3,09	3,87	3,52
AR02	4,40	3,30	3,55	4,12	3,84
AR03	5,07	4,28	3,40	3,41	4,04
AR04	5,02	3,75	3,30	2,85	3,73
AR05	4,20	3,77	3,92	3,60	3,87
AR06	4,31	3,70	2,66	2,55	3,31
JA01a	5,82	4,20	3,02	2,48	3,88
JA01b	7,42	4,90	3,90	4,12	5,09
JA01c	5,09	3,91	3,67	4,00	4,17
JA02a	4,40	4,34	3,25	3,01	3,75
JA04	6,96	4,27	4,36	3,77	4,84
JA07a	5,35	5,29	4,95	4,01	4,90
JA12	7,49	3,58	3,45	3,11	4,41
JA13a	4,82	4,24	4,16	4,00	4,31
JA17	7,27	4,02	3,44	3,74	4,62
JA18a	5,25	3,57	3,10	3,22	3,78
JA26	5,96	3,36	3,40	4,49	4,30

b. N (g kg^{-1})					
Parcelle	Horizon du sol (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
AR01	0,33	0,30	0,26	0,33	0,31
AR02	0,38	0,36	0,35	0,40	0,37
AR03	0,41	0,35	0,32	0,35	0,36
AR04	0,37	0,32	0,27	0,25	0,30
AR05	0,35	0,31	0,35	0,37	0,35
AR06	0,29	0,24	0,23	0,22	0,25
JA01a	0,58	0,37	0,31	0,23	0,37
JA01b	0,58	0,43	0,34	0,39	0,43
JA01c	0,40	0,32	0,32	0,39	0,36
JA02a	0,37	0,33	0,28	0,27	0,31
JA04	0,46	0,35	0,32	0,28	0,35
JA07a	0,54	0,40	0,42	0,39	0,44
JA12	0,54	0,38	0,35	0,37	0,41
JA13a	0,47	0,39	0,39	0,38	0,41
JA17	0,51	0,36	0,32	0,30	0,37
JA18a	0,51	0,32	0,29	0,32	0,36
JA26	0,46	0,30	0,33	0,38	0,37

c. P_{OD} (mg kg^{-1})					
Parcelle	Horizon du sol (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
AR01	1,7	1,9	2,0	1,3	1,7
AR02	2,3	1,1	2,0	1,9	1,8
AR03	2,4	1,4	0,8	1,2	1,5
AR04	2,9	2,0	1,6	1,6	2,0
AR05	2,6	1,9	1,7	1,1	1,8
AR06	3,2	2,5	2,3	2,0	2,5
JA01a	4,7	2,9	2,3	3,3	3,3
JA01b	3,7	2,6	2,1	2,2	2,7
JA01c	2,9	2,6	2,0	2,5	2,5
JA02a	2,3	1,4	0,9	0,8	1,4
JA04	2,8	2,2	1,5	2,0	2,1
JA07a	2,7	2,5	2,1	1,2	2,1
JA12	2,2	0,7	0,7	0,5	1,0
JA13a	2,0	2,5	2,1	1,3	2,0
JA17	2,3	1,0	0,8	0,9	1,3
JA18a	2,8	2,3	1,2	1,2	1,9
JA26	2,6	2,2	1,7	1,3	2,0

d. C/N					
Parcelle	Horizon du sol (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
AR01	11,9	10,6	11,9	11,7	11,5
AR02	11,6	9,2	10,1	10,3	10,3
AR03	12,4	12,2	10,6	9,7	11,3
AR04	13,6	11,7	12,2	11,4	12,3
AR05	12,0	12,1	11,2	9,7	11,2
AR06	14,9	15,4	11,6	11,6	13,5
JA01a	10,0	11,5	9,8	10,8	10,5
JA01b	12,7	11,5	11,5	10,6	11,7
JA01c	12,7	12,2	11,7	10,4	11,7
JA02a	11,9	13,2	11,6	11,1	12,0
JA04	15,1	12,2	13,6	13,5	13,7
JA07a	9,9	13,2	11,8	10,3	11,2
JA12	13,9	9,4	9,9	8,4	10,8
JA13a	10,2	10,9	10,7	10,5	10,6
JA17	14,3	11,2	10,8	12,5	12,4
JA18a	10,3	11,1	10,7	10,1	10,5
JA26	13,0	11,2	10,3	11,8	11,7

e. Densité apparente (fraction [0-2000]μm) (kg dm^{-3})					
Parcelle	Horizon du sol (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
AR01	1,47	1,50	1,50	1,50	1,49
AR02	1,51	1,35	1,60	1,41	1,47
AR03	1,54	1,54	1,50	1,51	1,52
AR04	1,53	1,39	1,66	1,31	1,47
AR05	1,52	1,52	1,50	1,52	1,51
AR06	1,52	1,50	1,49	1,46	1,50
JA01a	1,50	1,54	1,45	1,48	1,49
JA01b	1,54	1,54	1,47	1,46	1,50
JA01c	1,61	1,50	1,55	1,51	1,54
JA02a	1,51	1,56	1,52	1,56	1,54
JA04	1,46	1,55	1,49	1,52	1,51
JA07a	1,47	1,57	1,54	1,51	1,52
JA12	1,56	1,51	1,52	1,55	1,54
JA13a	1,53	1,48	1,41	1,64	1,51
JA17	1,45	1,55	1,44	1,36	1,45
JA18a	1,50	1,52	1,51	1,53	1,52
JA26	1,45	1,51	1,50	1,42	1,47

La densité apparente modifiée est le poids de la fraction [0-2000] μm du sol (tamisage à sec) par unité de volume. Cette densité apparente modifiée a été utilisée pour le calcul des stocks d'éléments dans le sol.

L'âge des parcelles de jachère est mentionné dans le code de la parcelle (durée de jachère en années).

2.2.4. Décomposition *in situ* de racines

La dynamique racinaire post-jachère après extraction des souches a été estimée au moyen d'une expérimentation avec des sachets de décomposition en toile métallique. Des racines de *Combretum glutinosum* Perr., l'espèce ligneuse la plus répandue dans les jachères locales, ont été prélevées en fin de saison sèche, lavées, séchées dans un four à 70°C jusqu'à poids constant, et triées en trois classes de diamètre ([0-2] mm, [2-5] mm et [5-10] mm). Elles ont été placées dans des sachets en acier inoxydable à maille de 3 mm remplis de sol local et enterrés à 15 cm de profondeur dans une parcelle de jachère de 15 ans, en début de saison des pluies. La végétation a été coupée et le sol laissé nu durant toute la durée de l'expérience. Vingt sacs de chaque classe de diamètre ont été prélevés tous les six mois, pendant deux ans. Les racines restantes ont été lavées à l'eau et séchées au four avant d'être pesées. Les taux de cendres initiaux et finaux ont été mesurés après calcination pendant trois heures à 500°C. Les taux de décomposition déterminés selon cette expérience ont alors été appliqués pour estimer la décomposition racinaire ligneuse survenant après la coupe de jachères jeunes et âgées, en supposant que (1) les souches étaient mortes ou retirées, (2) que le niveau de décomposition restait constant, quelles que soient la profondeur du sol jusqu'à 40 cm et les espèces ligneuses auxquelles appartiennent les racines (ce qui a été confirmé par une expérimentation en cours avec les racines de trois autres principales espèces ligneuses de l'écozone ; données non publiées). La biomasse racinaire initiale de ces jachères hypothétiques a été fixée à la valeur moyenne obtenue pour les jachères jeunes (1 à 9 ans) et les jachères âgées (10 ans et plus) sur le site d'étude (voir Chapitre 1).

2.2.5. Analyses des données

Les analyses statistiques ont été effectuées grâce au logiciel SAS 6.14 (Hatcher and Stepanski, 1994) exceptées les analyses en composante principale (ACP) réalisées avec le logiciel ADE 4 (Thioulouse *et al.*, 1997).

Les analyses multivariées ont été accomplies pour chaque horizon du sol en calculant les coefficients de corrélation de Spearman R_s (proc CORR) pour les variables du sol suivantes : C (total, et dans les fractions fines et grossières des horizons 0-10 et 10-20 cm), N, C:N, P_{OD} , pH (dans H_2O et KCl), Ca, Mg, Na, K, CEC, taux de saturation (S), granulométrie cinq fractions + sables, argile+limon fin, argile+limon, densité apparente, pF 2,5 et pF 4,2. Les ACP ont été effectuées sur la matrice des corrélations du tableau contenant les 18 lignes (les parcelles cultivées et en jachère), et les 24 à 26 colonnes (les variables listées ci-dessus).

L'utilisation de la méthode synchronique nécessite, théoriquement, que les propriétés inhérentes au sol et censées influencer les paramètres testés, soient les mêmes parmi les parcelles de la chronoséquence. Cette condition est rarement remplie en milieu paysan. Cependant, une telle variable

peut être introduite comme covariable dans le modèle linéaire utilisé pour l'analyse de variante (Anova), pourvu que la plage de variation de la variable ne soit pas trop importante, de sorte que les processus biophysiques restent à peu près les mêmes entre les parcelles et diffèrent seulement par leur intensité. Les travaux de Jones et Wild (1975), Feller (1993) et Zech *et al.* (1997) montrent qu'une attention particulière doit être accordée à la texture, qui représente un biais possible dans les interprétations statistiques cherchant à relier statut organique et gestion de la parcelle. En tenant compte des résultats de Feller (1993), nous avons introduit la teneur en argile+limon fin comme covariable dans l'Anova. Les résultats du Chapitre 1 ont démontré qu'un seuil pour la biomasse de la plupart des composantes végétales était atteint après 10 ans de jachère, sur le site d'étude. Nous avons ainsi groupé les parcelles : culture d'arachide (AR), jachère jeune (JAJ) de moins de 10 ans et jachère âgée (JAA) dans lesquelles des accumulations lentes de biomasse végétale se produisent. La Proc GLM a été employée sur les rangs des données, en raison de la faiblesse des effectifs et de l'incertitude sur la normalité des distributions des données et des résidus (Potvin and Roff, 1993). Des tests t ont été réalisés deux à deux sur les moyennes des moindres carrés afin de séparer les traitements qui ont des effets différents sur la valeur de la variable testée ($\alpha=0,05$).

2.3. RESULTATS

2.3.1. Propriétés du sol et mise en jachère

Les analyses de corrélation ont montré les liens statistiquement significatifs suivants entre les variables, pour chacun des horizons de sol :

- 0-10 cm : C (total, et dans les fractions fines et grossières) et N étaient très corrélés positivement ($R_S=+0,69^{**}$ à $+0,92^{***}$) (Annexe 9a). D'autres variables chimiques comme le pH_{KCl} , le Ca, le Mg, la CEC et le taux de saturation étaient aussi très positivement liées au carbone total et à l'azote ($R_S=+0,49^*$ à $+0,79^{***}$). La variable Argile+limon fin était positivement corrélée au carbone total ($R_S=+0,50^*$), et à l'azote ($R_S=+0,63^{**}$). $pF_{4,2}$ était aussi corrélé avec l'argile et pour chaque horizon, particulièrement les plus profonds. L'ACP a montré que la première composante principale (CP) (inertie relative IR : 35 %) était représentée par C, N, Mg et CEC du côté négatif, et le sable du côté positif ; les jachères âgées (associées à un bon statut organique) ont été séparées des cultures d'arachide (Figure 2.1a,b). Le P_{OD} a fourni la principale contribution au second axe (IR : 16 %) et a isolé les jeunes jachères des autres parcelles. Le troisième axe (IR : 15 %) a été porté par la texture mais n'a pas permis de distinguer des différences entre les trois stades de succession (AR, JAJ, JAA) (Annexe 10a),

- 10-20 cm : ni C ni N n'ont été corrélés à aucune des variables, sauf à la CEC (Annexe 9b). Mais des corrélations ont été trouvées pour la variable Argile+limon fin avec la CEC ($R_S=+0,52^*$), S ($R_S=-0,53^*$), et le pH ($R_S=-0,67^{**}$ à $-0,71^{**}$). Les variables Argile, Argile+limon fin et Sable grossier ont été les principales contributrices à la première CP sur le demi-axe négatif, par opposition au pH et à Ca (Figure 2.1c). Les ACP faites sur cet horizon et dans les horizons inférieurs n'ont pas permis de distinction entre les parcelles AR, JAJ et JAA (Figure 2.1d ; Annexe 10a),
- 20-30 cm et 30-40 cm : C, N, pH, CEC et S étaient fortement ($R_S=-0,55^*$ à $+0,93^{***}$) corrélés aux éléments fins (Annexe 9c,d).

n'a pas permis de dégager des différences statistiquement significatives. La texture n'a pas eu d'influence sur les propriétés chimiques du sol dans l'horizon 0-10 cm, sauf sur le Mg et la CEC. En dessous de 20 cm, la teneur en Argile+limon fin a fortement influencé C, N, pH, CEC et S.

Tableau 2.2 Effet de la gestion des terres (jachère) et de la texture (teneur en argile+limon fin) sur les propriétés du sol.

a. propriétés physiques.

Horizon (cm)	Champ d'arachide	Jachère jeunes	Jachère âgée	F		
	Moyenne (±ET) (n=6)	Moyenne (±ET) (n=6)	Moyenne (±ET) (n=5)	Gestion	Texture	Total
Teneur en argile+limon fin (%)						
0-10	11,3 ±1.2	12,4 ±0.8	14,1 ±0.5	3,2		
10-20	17,1 ±1.3	16,5 ±1.1	17,6 ±1.1	0,1		
20-30	22,5 ±2.5	21,7 ±1.7	24,9 ±2.3	0,5		
30-40	29,4 ±4.3	28,3 ±3.5	33,2 ±3.7	0,4		
0-40	20,1 ±2.0	19,7 ±1.5	22,5 ±1.7	0,4		
pF2.5 (gH₂O 100g⁻¹ de sol)						
0-10	6,95 ±1.02 ^a	4,95 ±0.48 ^b	8,28 ±1.74 ^a	4,7 *	0,9	3,4
10-20	8,02 ±1.13 ^a	5,53 ±0.19 ^b	8,52 ±1.75 ^a	4,4 *	2,6	4,1 *
20-30	8,80 ±1.42	6,82 ±0.28	10,78 ±1.97	2,3	16,9 **	9,3 **
30-40	11,35 ±2.03	9,18 ±1.00	13,36 ±1.83	2,0	18,3 ***	9,1 **
0-40	8,78 ±1.20 ^{ab}	6,62 ±0.42 ^b	10,24 ±1.66 ^a	4,9 *	19,4 ***	12,6 ***
pF4.2 (gH₂O 100g⁻¹ de sol)						
0-10	2,70 ±0.34	3,08 ±0.35	3,74 ±0.33	0,6	5,2 *	4,1 *
10-20	4,03 ±0.46	4,00 ±0.12	4,28 ±0.21	0,6	3,4	1,6
20-30	5,35 ±0.75	5,18 ±0.30	6,26 ±0.41	0,8	31,8 ***	13,2 ***
30-40	7,30 ±1.22	7,25 ±0.79	8,84 ±0.83	0,1	158,4 ***	56,6 ***
0-40	4,85 ±0.64	4,88 ±0.34	5,78 ±0.32	0,7	38,1 ***	15,1 ***
Densité apparente (kg dm⁻³)						
0-10	1,52 ±0.01	1,52 ±0.02	1,50 ±0.02	0,4	0,2	0,2
10-20	1,47 ±0.03 ^b	1,54 ±0.01 ^a	1,52 ±0.01 ^{ab}	4,2 *	1,1	3,0
20-30	1,54 ±0.03	1,51 ±0.02	1,48 ±0.02	1,1	0,5	0,8
30-40	1,45 ±0.03	1,51 ±0.01	1,50 ±0.05	0,6	0,0	0,5
0-40	1,50 ±0.01	1,52 ±0.01	1,50 ±0.02	1,3	0,1	0,8

$p\{H_0 : F_{obs} > F_{th}=0\} : * < 0,05 ; ** < 0,01 ; *** < 0,001$.

Deux valeurs moyennes avec des lettres différentes varient significativement quant à leurs moyennes des moindres carrés ($\alpha=0,05$; test T apparié).

Données en Annexe 11

Tableau 2.2 (suite) b. propriétés chimiques

Horizon (cm)	Champ d'arachide		Jachère jeune		Jachère âgée		F		
	Moyenne (±ET) (n=6)		Moyenne (±ET) (n=6)		Moyenne (±ET) (n=5)		Gestion	Texture	Total
Carbone (g kg ⁻¹)									
0-10	4,49 ±0.19	b	5,84 ±0.47	a	6,16 ±0.53	a	3,8 *	0,7	4,9 *
10-20	3,66 ±0.16	b	4,49 ±0.21	a	3,75 ±0.16	b	7,8 **	3,7	6,0 **
20-30	3,32 ±0.17		3,86 ±0.29		3,51 ±0.18		2,6	14,6 **	5,9 **
30-40	3,40 ±0.24		3,57 ±0.27		3,71 ±0.25		1,3	35,5 ***	12,5 ***
0-40	3,72 ±0.11	b	4,44 ±0.23	a	4,28 ±0.14	a	6,6 *	3,9	5,5 *
Azote (g kg ⁻¹)									
0-10	0,36 ±0.02	b	0,49 ±0.04	a	0,50 ±0.01	a	4,6 *	3,3	7,9 **
10-20	0,31 ±0.02	b	0,37 ±0.02	a	0,35 ±0.02	ab	2,9	1,8	2,4
20-30	0,30 ±0.02		0,33 ±0.02		0,34 ±0.02		1,0	13,0 **	5,3
30-40	0,32 ±0.03		0,32 ±0.03		0,35 ±0.02		1,5	64,5 ***	22,0 ***
0-40	0,32 ±0.02	b	0,38 ±0.02	a	0,38 ±0.01	a	5,1 *	7,6 *	6,2 **
Phosphore _{exo} (10 ⁻³ g kg ⁻¹)									
0-10	2,52 ±0.21		3,18 ±0.36		2,38 ±0.14		2,3	1,1	2,1
10-20	1,80 ±0.20		2,37 ±0.21		1,74 ±0.37		2,6	1,3	2,3
20-30	1,73 ±0.21		1,82 ±0.21		1,30 ±0.27		1,4	0,4	0,9
30-40	1,52 ±0.15		2,00 ±0.37		1,04 ±0.15		1,9	0,0	1,4
0-40	1,89 ±0.14	ab	2,34 ±0.27	a	1,62 ±0.20	a	2,8	0,0	2,0
pH (H2O)									
0-10	5,92 ±0.08		5,94 ±0.07		5,98 ±0.09		1,0	4,1	1,4
10-20	5,44 ±0.13		5,69 ±0.12		5,66 ±0.13		1,7	16,2 **	6,9 **
20-30	5,23 ±0.17		5,41 ±0.11		5,17 ±0.17		0,6	30,9 ***	11,3 ***
30-40	5,20 ±0.17		5,15 ±0.13		4,90 ±0.14		0,6	9,9 **	4,3 *
0-40	5,45 ±0.13		5,54 ±0.10		5,43 ±0.13		0,7	19,5 ***	7,3 **
pH (KCl)									
0-10	5,15 ±0.12		5,24 ±0.09		5,33 ±0.11		2,4	2,7	1,7
10-20	4,63 ±0.17		4,95 ±0.14		4,88 ±0.18		1,5	12,2 **	5,4 *
20-30	4,44 ±0.17		4,63 ±0.12		4,40 ±0.15		0,7	23,9 ***	9,1 **
30-40	4,34 ±0.17		4,40 ±0.15		4,17 ±0.12		0,3	18,2 ***	6,7 **
0-40	4,64 ±0.15		4,80 ±0.12		4,69 ±0.14		0,6	16,5 **	6,2 **
Ca (meq 100g ⁻¹ sol)									
0-10	1,32 ±0.13		1,60 ±0.19		1,94 ±0.39		0,6	0,1	0,7
10-20	1,06 ±0.17		1,29 ±0.20		1,42 ±0.43		0,3	3,6	1,5
20-30	0,99 ±0.13		1,12 ±0.15		1,55 ±0.61		0,1	5,0 *	1,7
30-40	1,03 ±0.14		1,12 ±0.15		1,23 ±0.32		0,5	3,1	1,2
0-40	1,10 ±0.13		1,28 ±0.17		1,54 ±0.41		0,4	2,8	1,1
Mg (meq 100g ⁻¹ sol)									
0-10	0,36 ±0.03	c	0,48 ±0.03	b	0,64 ±0.01	a	14,9 ***	4,7 *	23,1 ***
10-20	0,32 ±0.04	c	0,45 ±0.05	b	0,60 ±0.05	a	12,3 **	5,9 *	10,0 **
20-30	0,35 ±0.04		0,48 ±0.07		0,58 ±0.08		3,3	0,9	2,7
30-40	0,40 ±0.05		0,50 ±0.07		0,52 ±0.08		1,6	1,4	1,7
0-40	0,36 ±0.03	b	0,48 ±0.05	ab	0,59 ±0.05	a	4,7 *	1,3	3,8 *
Na (meq 100g ⁻¹ sol)									
0-10	0,01 ±0.005		0,02 ±0.008		0,01 ±0.005		0,5	0,8	0,4
10-20	0,00 ±0.002		0,01 ±0.003		0,01 ±0.008		2,2	0,9	1,9
20-30	0,01 ±0.003		0,02 ±0.003		0,01 ±0.005		2,3	0,8	1,8
30-40	0,01 ±0.005		0,02 ±0.008		0,02 ±0.007		0,5	0,2	0,3
0-40	0,01 ±0.002		0,02 ±0.003		0,01 ±0.003		2,4	0,1	1,6
K (meq 100g ⁻¹ sol)									
0-10	0,04 ±0.004		0,06 ±0.008		0,04 ±0.008		3,1	0,1	2,1
10-20	0,04 ±0.004		0,06 ±0.006		0,04 ±0.009		2,0	0,0	1,3
20-30	0,03 ±0.004	b	0,05 ±0.006	a	0,03 ±0.007	b	5,1 *	1,7	3,5 *
30-40	0,03 ±0.003	b	0,05 ±0.005	a	0,03 ±0.005	b	3,7	1,5	2,6
0-40	0,04 ±0.003	ab	0,05 ±0.005	a	0,04 ±0.007	b	3,1	0,3	2,1
CEC (meq 100g ⁻¹ sol)									
0-10	2,31 ±0.10		2,54 ±0.10		2,65 ±0.08		0,5	8,7 *	6,0 **
10-20	2,49 ±0.08	ab	2,44 ±0.07	a	2,15 ±0.14	b	3,0	7,2 *	4,2 *
20-30	2,70 ±0.12		2,57 ±0.17		2,48 ±0.18		2,1	16,7 **	6,2 **
30-40	2,95 ±0.36	a	2,94 ±0.22	ab	2,99 ±0.29	b	3,8 *	144,1 ***	48,5 ***
0-40	2,61 ±0.13	ab	2,62 ±0.11	a	2,57 ±0.12	b	4,2 *	74,8 ***	25,3 ***
Taux de saturation (%)									
0-10	74,5 ±5.2		84,8 ±7.4		98,4 ±11.9		1,4	0,2	1,0
10-20	57,3 ±7.4	b	74,0 ±7.4	ab	96,0 ±20.3	a	2,9	6,7 *	4,4 *
20-30	51,5 ±4.9		67,7 ±8.8		95,4 ±33.5		1,2	6,9 *	3,0
30-40	54,8 ±9.9	b	59,5 ±6.8	ab	67,4 ±18.5	a	2,6	22,9 ***	8,3 **
0-40	59,5 ±6.3		71,5 ±7.4		89,3 ±20.1		1,5	6,2 *	2,9

2.3.2. Qualité de la matière organique du sol

La qualité de la MOS a été étudiée selon plusieurs critères : le rapport C/N de la matière organique du sol non fractionné (NF), la teneur et la concentration en carbone et le rapport C/N des fractions granulométriques [0-50] et [50-2000] μm .

Le rapport C/N du sol NF n'a pas varié significativement pendant la période de jachère et a atteint $11,6 \pm 0,3$ (Tableau 2.1 et Tableau 2.4a). Il a légèrement diminué avec la profondeur, passant de 12,7 (0-10 cm) à 10,7 (30-40 cm).

La masse de la fraction [0-50] μm a atteint $22,1 \pm 0,7$ et $25,4 \pm 1,0$ g 100g⁻¹ dans les horizons 0-10 et 10-20 cm (Tableau 2.3a,b). La concentration en carbone dans la fraction [0-50] μm a été de $17,4 \pm 0,7$ g kg⁻¹, la teneur en carbone étant de $3,8 \pm 0,2$ g kg⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm. Dans l'horizon 10-20 cm ces valeurs ont atteint seulement $10,7 \pm 0,3$ gC kg⁻¹ de fraction et $2,7 \pm 0,1$ gC kg⁻¹ de sol. La fraction [50-2000] μm a montré des concentrations et teneurs en carbone plus faibles : $1,7 \pm 0,1$ gC kg⁻¹ de fraction (c'est à dire $1,3 \pm 0,1$ gC kg⁻¹ de sol) dans l'horizon 0-10 cm, $1,1 \pm 0,2$ gC kg⁻¹ de fraction ($0,8 \pm 0,1$ gC kg⁻¹ de sol) dans l'horizon 10-20 cm. La comparaison des différentes situations a indiqué que, quel que soit l'horizon considéré,

Tableau 2.3 Fractionnement de la MOS dans les parcelles d'arachide (AR) et de jachère (JA).

a. Horizon 0-10 cm								
Parcelle	Fraction 0-50 μm			C/N	Fraction 50-2000 μm			Taux de recouvrement du fractionnement ((1)+(2))/C
	Poids (g 100 g ⁻¹ sol)	Taux de C en g kg ⁻¹ de fraction	sol (1)		Poids (g 100 g ⁻¹ sol)	Taux de C en g kg ⁻¹ de fraction	sol (2)	
AR01	19,4	14,38	2,79	12,1	80,6	0,92	0,74	37,8
AR02	18,7	16,54	3,09	12,2	81,3	1,25	1,02	34,9
AR03	25,6	14,43	3,70	13,4	74,4	1,38	1,03	23,8
AR04	19,0	18,10	3,45	13,6	81,0	0,85	0,69	28,2
AR05	18,9	15,18	2,87	12,1	81,1	0,88	0,72	26,5
AR06	23,2	12,73	2,95	12,5	76,8	1,35	1,04	25,2
JA01a	20,0	19,87	3,97	13,6	80,0	2,23	1,79	40,4
JA01b	21,4	21,40	4,59	13,9	78,6	2,18	1,71	34,0
JA01c	18,8	18,23	3,44	14,0	81,2	2,10	1,70	36,9
JA02a	22,7	15,81	3,58	12,2	77,3	1,64	1,27	35,4
JA04	23,8	16,61	3,96	14,0	76,2	1,77	1,35	36,4
JA07a	26,0	18,02	4,69	12,8	74,0	1,99	1,47	41,0
JA12	22,2	22,50	5,00	13,7	77,8	2,28	1,77	44,3
JA13a	27,7	14,31	3,96	13,4	72,3	1,71	1,24	57,6
JA17	22,5	20,67	4,65	15,3	77,5	1,84	1,43	42,3
JA18a	23,4	18,13	4,24	15,0	76,6	1,70	1,30	50,7
JA26	22,7	18,87	4,29	15,7	77,3	2,09	1,61	48,7

b. Horizon 10-20 cm								
Parcelle	Fraction 0-50 μm			C/N	Fraction 50-2000 μm			Taux de recouvrement du fractionnement ((1)+(2))/C
	Poids (g 100 g ⁻¹ sol)	Taux de C en g kg ⁻¹ de fraction	sol (1)		Poids (g 100 g ⁻¹ sol)	Taux de C en g kg ⁻¹ de fraction	sol (2)	
AR01	25,2	9,23	2,32	10,8	74,8	<0,2	<0,15	
AR02	26,0	10,30	2,68	12,5	74,0	1,29	0,96	48,0
AR03	27,1	10,88	2,95	12,7	72,9	1,11	0,81	31,7
AR04	23,8	11,65	2,77	12,4	76,2	0,31	0,24	26,2
AR05	27,8	9,07	2,52	9,7	72,2	0,58	0,42	44,3
AR06	30,6	9,66	2,96	13,1	69,4	0,58	0,40	26,0
JA01a	20,8	12,41	2,58	13,1	79,2	2,18	1,73	32,7
JA01b	21,8	12,90	2,81	13,0	78,2	<0,2	<0,15	
JA01c	22,7	10,45	2,37	12,6	77,3	1,09	0,84	62,6
JA02a	28,0	9,26	2,59	12,4	72,0	1,11	0,80	45,8
JA04	26,6	11,39	3,03	13,2	73,4	2,23	1,63	44,3
JA07a	29,9	10,98	3,28	12,6	70,1	1,73	1,21	70,1
JA12	23,0	12,30	2,83	13,5	77,0	1,28	0,99	57,1
JA13a	31,3	9,06	2,84	11,9	68,7	1,34	0,92	79,9
JA17	24,7	12,23	3,02	13,8	75,3	<0,2	<0,16	
JA18a	25,7	10,28	2,64	14,2	74,3	1,34	0,99	123,3
JA26	25,1	10,11	2,54	14,9	74,9	2,06	1,54	68,8

Taux de recouvrement du fractionnement calculé par la somme de (1) et (2) sur le taux de carbone du sol non fractionné (voir Tableau 2.1). l'âge des parcelles de jachère est indiqué dans le code des parcelles.

la concentration en carbone des deux fractions ([50-2000] μm , [0-50] μm) a augmenté significativement entre les parcelles d'arachide, les parcelles de jachère jeune, et celles de jachère âgée (Tableau 2.4b). Le gain en carbone a été particulièrement net pour la fraction grossière [50-2000] μm de l'horizon 10-20 cm. En fait, 50 % de l'accroissement en carbone total enregistré entre les parcelles de AR et de JAJ a eu lieu dans cette fraction. Le rapport C/N des fractions fines et grossières a augmenté régulièrement et significativement tout au long de la succession et aux deux profondeurs ; la progression a été plus importante dans la fraction grossière que dans la fraction fine (Tableau 2.3a,b et Tableau 2.4b).

Tableau 2.4 Effet de la gestion des terres (jachère) et de la texture (teneur en argile+limons fins) sur la qualité de la MOS estimé par a. le rapport C/N du sol non fractionné b. la concentration et la teneur en carbone, et le rapport C/N dans les fractions fines et grossières du sol.

a.

Horizon		Champ d'arachide	Jachère jeune	Jachère âgée	F		
(cm)		Moyenne (±ET) (n=6)	Moyenne (±ET) (n=6)	Moyenne (±ET) (n=5)	Gestion	Texture	Total
C/N du sol non fractionné							
0-10		12,7 ±0,5	12,1 ±0,8	12,3 ±0,9	0,3	0,6	0,3
10-20		11,9 ±0,9	12,3 ±0,3	10,8 ±0,3	3,7	0,0	2,5
20-30		11,3 ±0,3	11,6 ±0,5	10,5 ±0,2	2,0	0,0	1,4
30-40		10,8 ±0,4	11,1 ±0,5	10,7 ±0,7	0,1	1,4	0,6
0-40		11,7 ±0,4	11,8 ±0,4	11,2 ±0,4	0,1	4,3	1,7

b.

Horizon		Champ d'arachide	Jachère jeune	Jachère âgée	F		
(cm)	Fraction (µm)	Moyenne (±ET) (n=6)	Moyenne (±ET) (n=6)	Moyenne (±ET) (n=5)	Gestion	Texture	Total
Concentration en carbone (g kg ⁻¹ fraction)							
0-10	0-50	15,23 ±0,77	18,32 ±0,84	18,90 ±1,37	3,7	0,4	2,8
	50-2000	1,11 ±0,10	1,98 ±0,1	1,92 ±0,11	10,8 **	0,1	9,8 **
10-20	0-50	10,13 ±0,41	11,23 ±0,54	10,80 ±0,64	1,3	3,9	2,4
	50-2000	0,66 ±0,19	1,41 ±0,33	1,22 ±0,32	1,9	0,6	1,4
Teneur en carbone (g kg ⁻¹ sol)							
0-10	0-50	3,14 ±0,15	4,04 ±0,21	4,43 ±0,18	5,8 *	3,3	10,4 ***
	50-2000	0,87 ±0,07	1,55 ±0,09	1,47 ±0,10	12,8 ***	0,1	10,3 **
10-20	0-50	2,70 ±0,10	2,78 ±0,14	2,77 ±0,08	0,2	0,4	0,3
	50-2000	0,48 ±0,14	1,05 ±0,25	0,90 ±0,24	2,0	0,2	1,4
C/N des fractions							
0-10	0-50	12,7 ±0,3	13,4 ±0,3	14,6 ±0,5	4,9 *	0,0	4,7 *
	50-2000	29,4 ±2,3	37,3 ±1,1	48,7 ±2,7	18,4 ***	0,9	15,2 ***
10-20	0-50	11,9 ±0,5	12,8 ±0,1	13,7 ±0,5	5,3 *	6,3 *	5,7 *
	50-2000	35,2 ±4,6	51,1 ±6,7	82,3 ±14,4	12,4 **	5,4 *	10,2 **

$p\{H_0 : F_{obs} > F_{th} = 0\} : * < 0,05 ; ** < 0,01 ; *** < 0,001.$

Deux valeurs moyennes avec des lettres différentes varient significativement quant à leurs moyennes des moindres carrés ($\alpha=0,05$; test T apparié).

Voir les données des Tableau 2.1 et Tableau 2.3.

2.3.3. Modes de stockage du carbone, de l'azote et du phosphore assimilable du sol pendant la succession culture-jachère

L'évolution temporelle des stocks de C, N et P_{OD} pendant le cycle culture-jachère est représentée sur la Figure 2.2 (données détaillées pour le sol ; voir Tableau 2.1 pour les calculs) et sur la Figure 2.3 (données groupées pour l'écosystème). Les stocks de C, N et P du sol ont augmenté dès la première année de jachère (+4,4 tC, +430 kgN, et +5,7 kg P_{OD} ha⁻¹ dans l'ensemble du profil, c'est à dire un gain de 20, 22 et 50 % par rapport aux stocks dans le sol des champs cultivés). La distribution verticale

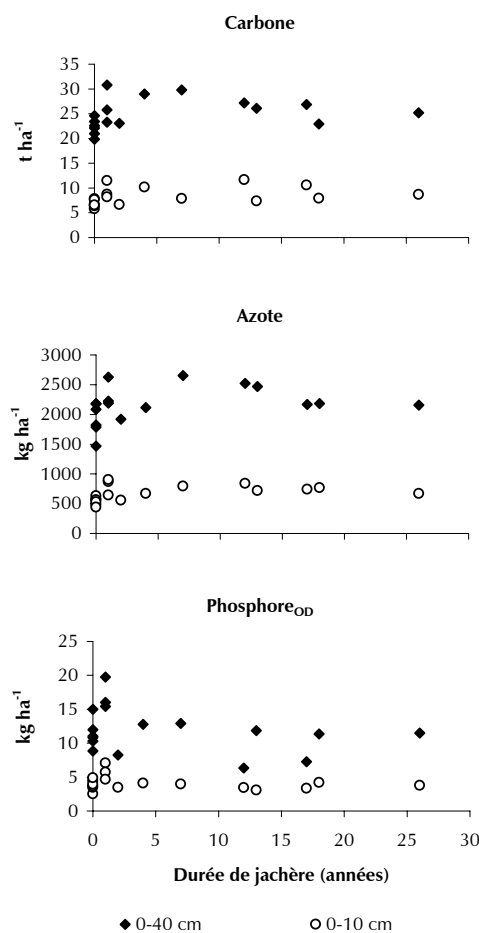


Figure 2.2 Evolution des stocks de carbone, azote et phosphore assimilable dans les horizons 0-10 et 0-40 cm pendant la succession culture-jachère.

Données en Annexe 13.

de C, N et P_{OD} est restée assez constante entre les traitements. La concentration de C, N et P_{OD} dans l'horizon supérieur du sol (0-10 cm) a été assez prononcée (33 %). Le stock de carbone dans l'ensemble du profil s'est élevé à $22,3 \pm 0,7$ t ha⁻¹ dans les champs d'arachide mais il a atteint $25,6 \pm 0,8$ t ha⁻¹ dans les plus vieilles jachères. Les stocks moyens de N ont été de 1920 ± 110 et 2300 ± 810 kg ha⁻¹ dans les parcelles de cultures et les jachères âgées, respectivement. Le stockage de P_{OD} dans ces traitements a atteint $11,3 \pm 0,9$ kg ha⁻¹ et $9,7 \pm 1,2$ kg ha⁻¹ respectivement. Les stocks les plus élevés de carbone et de P_{OD} ont été trouvés dans les jachères jeunes.

La jachère a significativement influencé les stocks de carbone et d'azote dans les horizons 0-10, 10-20 et 0-40 cm (Tableau 2.5a). Le stock de carbone a également augmenté dans les fractions fines et grossières des horizons 0-10 et 10-20 cm (Tableau 2.5b). Mais les différences significatives ont été observées seulement dans la fraction [50-2000] μ m, car le stock initial de carbone contenu dans la fraction grossière représentait seulement un quart de celui de la

fraction fine. Dans l'horizon 0-10 cm, les stocks de carbone total les plus importants ont été atteints dans les jachères âgées ; ceci s'est produit dans les jachères jeunes mais dans les horizons 10-20 et 0-40 cm. Cependant, les stocks de carbone et d'azote ne se sont pas accrues significativement dans les jachères âgées en comparaison des jachères jeunes. La texture a été une meilleure variable prédictive du stockage du carbone et de l'azote que l'étape de la succession dans les horizons 20-30 et 30-40 cm. Aucune évolution statistiquement significative du stock de P_{OD} pendant la succession n'a pu être mise en évidence, bien que le stock de P_{OD} ait été supérieur de 30 % dans les jachères jeunes par rapport aux autres parcelles.

Tableau 2.5 Effet de la gestion des terres (jachère) et de la texture (teneur en argile+limon fin) sur les stocks de carbone (total et par fraction), d'azote et de phosphore assimilable du sol.

a. sol non fractionné

Horizon (cm)	Champ d'arachide	Jachère jeune	Jachère âgée	F		
	Moyenne ($\pm$ ET) (n=6)	Moyenne ($\pm$ ET) (n=6)	Moyenne ($\pm$ ET) (n=5)	Gestion	Texture	Total
Stock de carbone (t ha⁻¹)						
0-10	6,8 $\pm$ 0,3	8,8 $\pm$ 0,7	9,2 $\pm$ 0,8	4,1 *	0,3	4,5 *
10-20	5,4 $\pm$ 0,3	6,9 $\pm$ 0,3	5,7 $\pm$ 0,2	10,4 **	3,5	7,6 **
20-30	5,1 $\pm$ 0,3	5,8 $\pm$ 0,5	5,2 $\pm$ 0,2	2,6	13,5 **	5,2 *
30-40	4,9 $\pm$ 0,4	5,4 $\pm$ 0,4	5,6 $\pm$ 0,4	1,2	35,7 ***	12,8 ***
0-40	22,3 $\pm$ 0,7	26,9 $\pm$ 1,4	25,6 $\pm$ 0,8	7,7 **	3,6	6,1 **
Stock d'azote (kg ha⁻¹)						
0-10	538 $\pm$ 28	740 $\pm$ 56	747 $\pm$ 28	5,1 *	2,1	7,3 **
10-20	458 $\pm$ 24	563 $\pm$ 27	530 $\pm$ 25	6,9 **	3,4	5,4 *
20-30	458 $\pm$ 33	498 $\pm$ 31	496 $\pm$ 21	0,6	12,2 **	4,5 *
30-40	466 $\pm$ 46	487 $\pm$ 43	527 $\pm$ 37	1,5	31,1 ***	11,6 ***
0-40	1920 $\pm$ 114	2289 $\pm$ 119	2300 $\pm$ 81	5,6 *	5,7 *	5,5 *
Stock de phosphore_{OD} (kg ha⁻¹)						
0-10	3,8 $\pm$ 0,3	4,8 $\pm$ 0,5	3,6 $\pm$ 0,2	2,4	1,2	2,2
10-20	2,7 $\pm$ 0,3	3,6 $\pm$ 0,3	2,6 $\pm$ 0,6	3,2	0,7	2,5
20-30	2,7 $\pm$ 0,3	2,7 $\pm$ 0,3	1,9 $\pm$ 0,4	2,7	0,2	1,8
30-40	2,2 $\pm$ 0,2	3,0 $\pm$ 0,5	1,6 $\pm$ 0,2	1,8	0,0	1,3
0-40	11,3 $\pm$ 0,9	14,2 $\pm$ 1,6	9,7 $\pm$ 1,2	3,0	0,0	2,1

b. fractions du sol

Horizon (cm)	Fraction (μ m)	Champ d'arachide	Jachère jeune	Jachère âgée	F		
		Moyenne ($\pm$ ET) (n=6)	Moyenne ($\pm$ ET) (n=6)	Moyenne ($\pm$ ET) (n=5)	Gestion	Texture	Total
Stock de carbone par fraction (t ha⁻¹)							
0-10	0-50	5,34 $\pm$ 0,30	6,38 $\pm$ 0,54	6,93 $\pm$ 0,59	0,9	0,9	1,9
	50-2000	1,47 $\pm$ 0,10	2,45 $\pm$ 0,22	2,30 $\pm$ 0,23	12,0 **	0,0	10,2 **
10-20	0-50	4,61 $\pm$ 0,28	5,18 $\pm$ 0,54	4,39 $\pm$ 0,49	0,6	0,9	0,7
	50-2000	0,77 $\pm$ 0,19	1,75 $\pm$ 0,35	1,30 $\pm$ 0,30	4,7 *	0,9	3,3

$p\{H_0 : F_{obs} > F_{th} = 0\} : * < 0,05 ; ** < 0,01 ; *** < 0,001$.

Deux valeurs moyennes avec des lettres différentes varient significativement quant à leurs moyennes des moindres carrés ($\alpha = 0,05$; test T apparié).

Données en Annexe 13 et Annexe 14.

En considérant l'ensemble de l'écosystème (Figure 2.3), la contribution du sol au stockage de carbone a diminué de 80 % dans les champs cultivés à 47 % dans les jachères âgées. Les mêmes tendances ont été enregistrées pour l'azote, bien que la part attribuée au sol reste importante dans tous les traitements (95-87 % des stocks du système plante-sol). Une évolution plus nette a été mise en évidence pour le P_{OD} du sol, qui représentait 66 % des stocks de phosphore biologiquement actif (P_t végétal + P_{OD} du sol) dans les champs et seulement 22 % dans les jachères âgées.

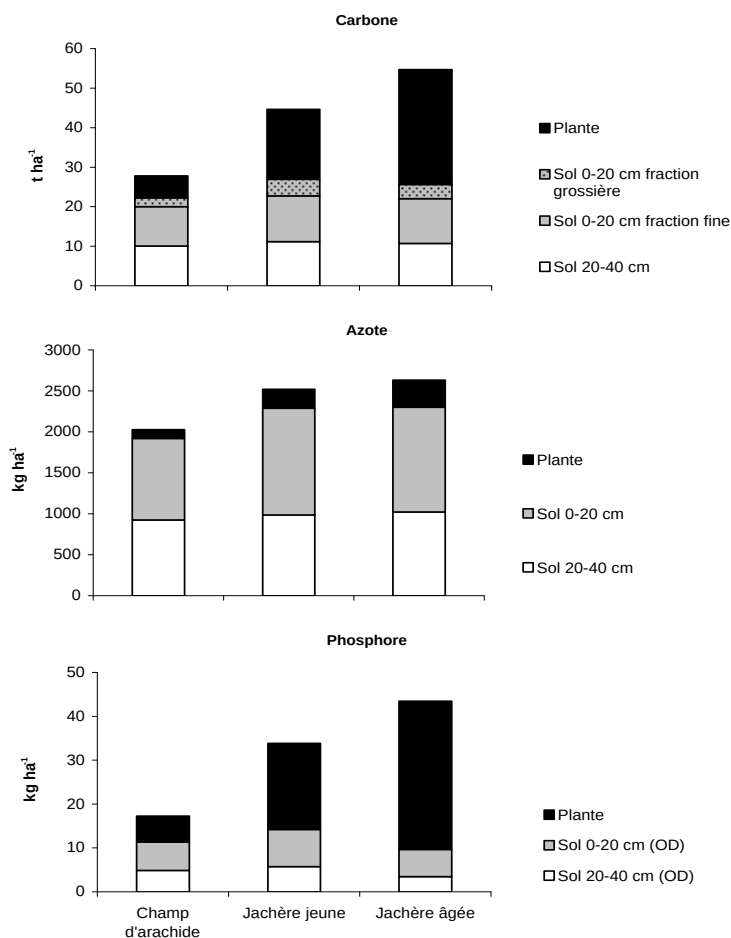


Figure 2.3 Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore dans le système plante-sol à trois grandes étapes de la succession culture-jachère.

Les valeurs pour la biomasse végétale sont données dans le Chapitre 1.

Jachère jeune : 0-9 ans. Jachère âgée : plus de 9 ans.

OD : phosphore assimilable (sol) selon la méthode Olsen modifiée par Dabin (1967).

Données en Annexe 12.

2.3.4. Dynamique post-jachère de la biomasse racinaire

La biomasse racinaire ligneuse morte a disparu rapidement après avoir été enterrée dans le sol de la jachère défrichée (Figure 2.4). Après six mois de décomposition *in-situ*, les taux de décomposition les plus élevés ont été observés pour les racines les plus fines : 61 % contre 50 % et 41 % de la

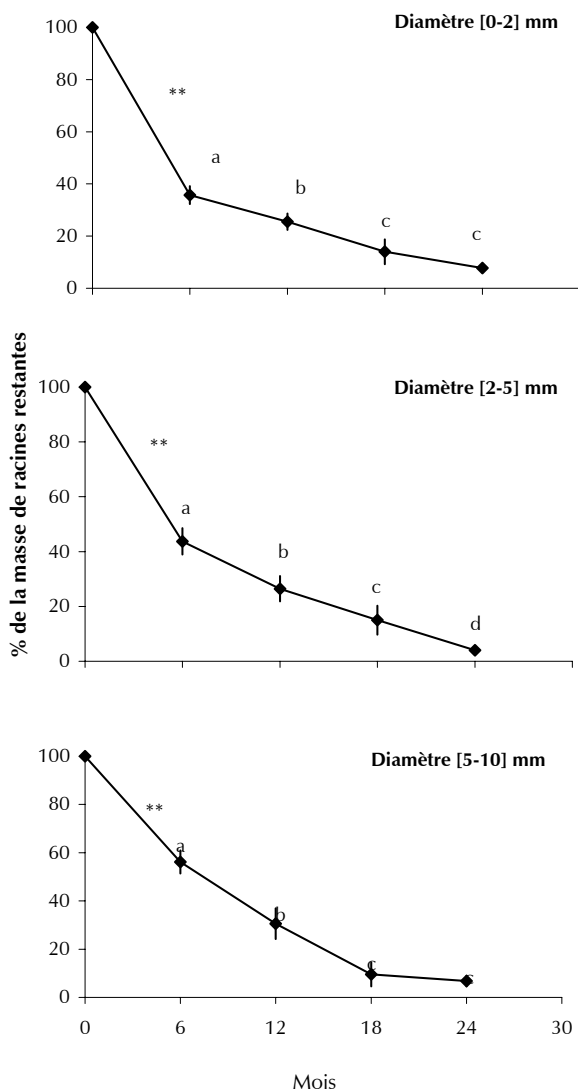


Figure 2.4 Dynamique de décomposition racinaire de *Combretum glutinosum* Perr. après la défriche d'une jachère âgée de 15 ans mesurée par une expérience des sachets de décomposition.

Les barres verticales représentent l'erreur type. Résultats des tests Z et SNK ($\alpha=0,05$; $n=20$). Données en Annexe 15.

perte de masse pour les classes de diamètre [2-5] et [5-10]mm. Plus tard durant l'incubation les taux ont diminué et sont restés constants au-delà de la seconde année.

Ces résultats ont été appliqués pour simuler la décomposition de la biomasse racinaire survenant après la défriche de deux jachères hypothétiques, l'une jeune, l'autre âgée, dans lesquelles les souches auraient été retirées (Figure 2.5). La disparition estimée (oxydation et redistribution spatiale) de la matière sèche (MS), du carbone, de l'azote et du phosphore liée à la décomposition de la biomasse racinaire serait importante durant les six mois suivant la coupe des parcelles en jachère et correspondrait à 4,0/9,3 tMS, 1,4/3,3 tC, 20/43 kgN et 1,1/3,4 kgP_t ha⁻¹, selon l'âge de la jachère (jeune/âgée). Pendant la deuxième saison de culture, ces valeurs chuteraient d'environ deux tiers.

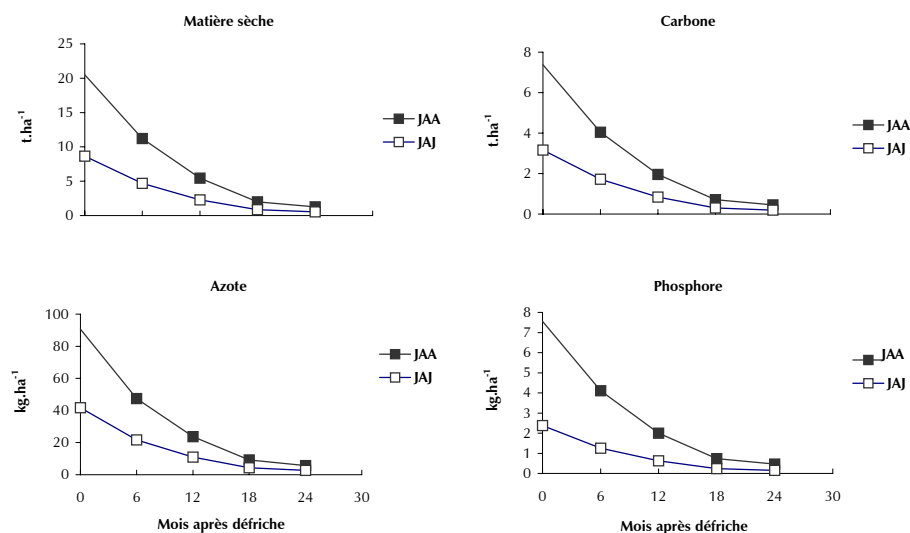


Figure 2.5 Stocks estimés de matière sèche, de carbone, d'azote et de phosphore restant du compartiment racinaire en décomposition après la défriche d'une jachère jeune (JAJ) et âgée (JAA) (souches enlevées). Données en Annexe 16.

2.4. DISCUSSION

2.4.1. Tendances générales de la dynamique du carbone, de l'azote et du phosphore assimilable dans le sol

Les résultats généraux de cette étude concernant le carbone organique du sol s'accordent assez bien avec ceux obtenus par Jones et Wild (1975), au moins pour les horizons supérieurs du sol. Ces auteurs donnent une

teneur moyenne en carbone de 245 sols ferrugineux correspondant à 6,2 g kg⁻¹ (5,5 g kg⁻¹ dans notre étude). Nye et Greenland (1960) ont trouvé des valeurs de carbone atteignant 7,6 g kg⁻¹ dans les horizons supérieurs (0-5 cm) de plusieurs écosystèmes cultivés des tropiques secs. Les valeurs obtenues au Sénégal et détaillées par Tiessen *et al.* (1998) sont proches des nôtres, bien que plus faibles, essentiellement du fait de contraintes environnementales différentes dans leur zone d'étude (climat plus sec et pression démographique plus forte). Nos résultats rapportent des teneurs en azote qui s'élèvent à 0,44 g kg⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm, ce qui correspond bien aux données de Nye et Greenland (1960) et est proche de la valeur estimée par la régression multiple calculée par Jones (1973) liant le taux d'azote à la teneur en argile et aux précipitations annuelles. Comme le suggère cet auteur, il faut cependant se rappeler qu'une forte variabilité spatiale et temporelle est une caractéristique des teneurs en carbone et en azote du sol dans les savanes ouest-africaines.

Comparer la teneur en P assimilable (définie par le P_{OD}) avec d'autres études de cas est discutable, puisque les résultats sont très liés aux méthodes analytiques utilisées. La quantité de P du sol dans notre étude pourrait être bien plus faible que ce qui était attendu dans l'écozone. En effet, le P total mesuré par Manlay (1994) sur quatre parcelles de jachère âgées de 1 à 15 ans atteignait 60 µg kg⁻¹, ce qui ne représente que la moitié de la teneur observée par Jones et Wild (1975) dans 181 sols sableux tropicaux. Nye et Greenland (1960) ont aussi trouvé des teneurs plus élevées en P assimilable (7,2 µg kg⁻¹, méthode Truog) sous des sols et des climats similaires de ceux du sud du Sénégal. Ces auteurs ont noté des valeurs en Mg, K et Ca plus élevées dans les sols sous jachère, que celles observées dans notre étude, excepté dans les jachères de savanes humides.

2.4.2. Influence des propriétés intrinsèques du sol

L'abondance d'éléments fins semble avoir joué un rôle clé dans l'explication des propriétés chimiques et physiques du sol - parmi lesquelles la teneur en MOS-, particulièrement en dessous de 20 cm de profondeur. Pour l'horizon 0-20 cm, nos résultats indiquent que les propriétés du sol (y compris les teneurs en C, N et P_{OD}) sont influencées principalement par la durée de la jachère dans le cycle culture-jachère, sans doute en raison de la faible variabilité de la teneur en éléments fins du sol. La jachère n'a qu'un faible impact, si elle en a, sur la capacité de rétention en eau du sol, et n'améliore pas la densité, mais les labours répétés dans les champs cultivés ont pu diminuer la densité du sol et biaiser ainsi les tests. D'un point de vue méthodologique, nos résultats suggèrent que les études visant à faire le lien entre la gestion des jachères et les propriétés du sol pourraient se restreindre au seul échantillonnage de l'horizon 0-20 cm.

2.4.3. Bilan minéral du système culture-jachère

L'accroissement annuel des stocks d'azote et de phosphore (P_t végétal + P_{OD} du sol) de l'ensemble du système a été maximal après un an de jachère et presque nul au-delà du seuil de 10 ans (Figure 2.3). L'efficacité des jeunes jachères et des pâturages pour restaurer rapidement un stock important d'azote du sol et de phosphore assimilable a déjà été soulignée par Jones (1971), Friesen *et al.* (1997), Brand et Pfund (1998), et Harmand et Njiti (1998), bien que le pompage de nutriments par les arbres puisse ne pas être significatif dans la région (Bremen and Kessler, 1995). Soumises à des contraintes chimiques du sol importantes, les savanes ont développé des stratégies de conservation des nutriments (Myers *et al.*, 1994), et la végétation spontanée montre une efficacité particulière à recycler l'azote de la litière et à extraire le phosphore assimilable du sol (Abbadie *et al.*, 1992 ; Friesen *et al.*, 1997). La baisse de la teneur en P_{OD} dans les jachères les plus âgées est une autre illustration de cette caractéristique, puisqu'elle pourrait être liée à une immobilisation dans la biomasse ligneuse vivante (Bremen and Kessler, 1995). Les données de Manlay (1994) révèlent en effet un rapport P_t/P_{OD} stable ($28,3 \pm 2,9$; $n=4$) dans le sol pendant la jachère dans la succession de Sare Yorobana, indiquant en outre, une réallocation limitée du P assimilable vers des formes moins assimilables pendant la jachère. Nous suggérons ainsi que le P_{OD} , avec la disponibilité en eau, pourrait être le facteur limitant principal responsable de l'allure asymptotique de la courbe de la biomasse ligneuse établie comme une fonction de la durée de la jachère dans le Chapitre 1 (Murphy et Lugo, 1986 ; Akpo, 1998 ; Sirois *et al.*, 1998). En Guinée, Sirois *et al.* (1998) ont trouvé des tendances similaires de décroissance du P extractible du sol et du K échangeable pendant les huit premières années de jachère. Cependant, ces auteurs ont enregistré des baisses de Mg, CEC et pH, contrairement à notre étude.

2.4.4. Statut organique du sol après abandon des cultures

La fertilisation minérale sans amendements organiques conduit rarement à une productivité durable en Afrique de l'Ouest, puisqu'il en résulte souvent une minéralisation de la matière organique et une désorganisation de la structure du sol, une diminution du pH et une augmentation de la toxicité en aluminium (Pieri, 1989 ; Mokwunye et Hammond, 1992). L'étude des dynamiques de la biomasse végétale indique que la jachère entraîne une augmentation de plus de $12,6 \text{ t ha}^{-1}$ des stocks de carbone souterrain dans la biomasse végétale et établit des flux entrants de carbone s'élevant jusqu'à au moins $3,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ dans les vieilles jachères (voir Chapitre 1).

Il est couramment admis que la défriche des forêts primaires ou des surfaces boisées et la culture suivant cette défriche conduisent à un déclin très important de la teneur en carbone du sol dans les tropiques secs et humides (Brams, 1971 ; Siband, 1974 ; Feller et Milleville, 1977 ; Tiessen *et al.*, 1992 ; Juo *et al.*, 1995). Les raisons avancées sont (1) la chute des apports organiques au sol du fait d'une plus faible productivité souterraine

et l'exportation de la biomasse végétale à la récolte, (2) la modification des conditions hydriques et de la température du sol, (3) l'augmentation de l'érosion et du lessivage, (4) le labour (Brown *et al.*, 1994). Cependant, le potentiel des jachères à annuler les pertes en MOS dues à une prolongation des cultures reste très controversé. Beaucoup d'auteurs notent des accroissements significatifs des taux de carbone du sol après l'abandon cultural (Greenland et Nye, 1959 ; Aina, 1979 ; Areola *et al.*, 1982 ; Tiessen *et al.*, 1992 ; Feller, 1993). Mais aucun consensus ne se dégage de leurs travaux concernant l'allure de la courbe d'accumulation du carbone en fonction de la durée de la jachère, et la durée minimale de jachère requise pour une amélioration significative du stock de MOS. Au moins autant d'études conduites sous différents climats tropicaux ne rapportent aucune évolution significative du stock de carbone après abandon des cultures (Bebwa and Lejoly, 1993 ; Breman and Kessler, 1995 ; Jaiyeoba, 1995 ; Juo *et al.*, 1995 ; Kotto-Same *et al.*, 1997 ; Sirois *et al.*, 1998 ; Denich *et al.*, sous presse parmi d'autres). Quels que soient leurs résultats, tous ces travaux incluent rarement la texture comme une covariable dans les modèles de dynamique du carbone déduits des chronoséquences. Néanmoins, comme l'ont supposé Nye et Greenland (1960), la capacité de la jachère à restaurer la teneur organique d'un sol devrait être jugée en fonction de l'écart de la teneur en carbone par rapport à son niveau d'équilibre sous une végétation naturelle. Ceci est très peu documenté dans les études précédemment citées. Des travaux récents de Harmand *et al.* (2000) suggèrent que la capacité de stockage de carbone de la jachère pourrait aussi dépendre de la composition spécifique ligneuse de la végétation secondaire.

Le présent travail révèle une capacité de stockage du carbone faible - mais significative - dans les sols sableux des jachères des savanes ouest-africaines. Cette aptitude est décelable dès la première année de jachère, et est une caractéristique des sols à texture grossière (Feller and Beare, 1997). L'inertie tardive du stock de MOS ne s'accorde pourtant pas avec les résultats des études précédemment citées ; généralement, ces dernières montrent un accroissement constant des stocks de carbones du sol, même dans les jachères âgées. En outre, plus de la moitié de l'augmentation enregistrée dans l'horizon 0-20 cm, après abandon des cultures, apparaît dans la fraction grossière [50-2000] μm . Feller (1995b) a montré que cette fraction possède un fort taux de renouvellement (0,4 à 1,0 au-delà de 10 ans), et est réduite à des fonctions biologiques comme la fourniture de carbone, d'azote et de phosphore à la microflore et à la faune. Ainsi, l'effet de la jachère est éphémère et a seulement un faible impact sur l'amélioration des propriétés chimiques du sol.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer la faiblesse et la fragilité de la réponse des sols locaux à la gestion par la jachère. Jones et Wild (1975) et Feller (1995b) ont montré que la teneur en argile minéralogique, et dans une moindre mesure les précipitations, étaient les meilleures variables prédictives de la teneur en carbone des sols tropicaux. Pour les sols de plateau de

Haute-Casamance, l'importance de la fraction "sables grossiers" et la teneur limitée en argile ne permettent pas une protection efficace de la MOS contre l'oxydation microbienne et les pertes par érosion et lessivage (Feller and Beare, 1997). Les précipitations limitant la durée de la période de croissance végétale, la température et l'humidité du sol défavorables à l'humidification, sont d'autres facteurs abiotiques de la restriction du stockage du carbone (Moureaux, 1967). La récolte de bois mort par les villageois, ainsi que la minéralisation du CO₂ induite par les feux, peuvent aussi être avancés, bien que l'effet du feu sur la teneur en MOS des jeunes jachères ait récemment été remis en cause (Masse *et al.*, 1997).

2.4.5. La jachère, un outil pour rétablir le contrôle biologique de la fertilité de l'écosystème

En fait, nous invoquons le contrôle croissant exercé par l'activité biologique sur la dynamique de la MOS comme le facteur ultime limitant la capacité de stockage du carbone dans les sols sous jachère, et suggérons que ce contrôle confère un rôle écologique particulier à la MOS des sols sableux de savane.

Puisque le site d'étude appartient à une région de peuplement humain récent où de grands espaces de savanes primaires existent encore, les populations biologiques du sol y sont assez similaires à celles trouvées dans les savanes faiblement perturbées, ou à celles de climats plus humides (Derouard *et al.*, 1998). La décomposition massive des racines suivant la défriche d'une jachère, également observée par Harmand *et al.* (2000) dans le Nord Cameroun, témoigne d'une intense activité biologique, même pendant la saison sèche. Une telle activité serait plus limitée par le manque de carbone assimilable que par la température (Kaiser, 1983), ou même par l'humidité du sol dans le cas des termites. Les termites sont les principaux vecteurs d'entrées organiques dans le sol des savanes africaines boisées, ceci tout au long de l'année, et peuvent redistribuer plus de 90 % de la production nette de carbone de l'écosystème (Jones, 1990). Les vers de terre améliorent aussi la disponibilité chimique et physique de la MOS pour les micro-organismes ainsi que la porosité du sol grâce à un remaniement annuel de tout l'horizon supérieur du sol (Lavelle *et al.*, 1998). A cause du climat et de l'"effet initiateur" ("priming effet") de la macrofaune, l'activité de minéralisation par la microflore du sol est plus forte dans les sols tropicaux que dans les sols tempérés (Jenny *et al.*, 1949 ; Jenkinson et Ayanaba, 1977), entraînant la formation de composés humiques plus matures dans la MOS des sols tropicaux (Grisi *et al.*, 1998). Par exemple, les émissions annuelles *in situ* de C-CO₂ dues à la respiration du sol peuvent représenter jusqu'à plus de 75 % des stocks de carbone organique du sol sableux d'une savane subhumide (Schaefer, 1974).

Mais nous suggérons que le "broutage" massif du carbone du sol par la communauté hétérotrophe du sol n'est pas sans bénéfice pour l'écosystème "jachère" dans son ensemble. De récentes recherches conduites dans des

jachères en Afrique de l'Ouest montrent une augmentation de la biomasse et de la diversité de la microflore du sol (Wick *et al.*, 1998) et des termites (Black et Okwakol, 1997 ; Sarr *et al.*, 1998 et Fall, 1998 au Sénégal) après l'abandon des cultures. La jachère influence aussi la biodiversité de la faune (Derouard *et al.*, 1998), modifiant ainsi la structure et affaiblissant la pathogénicité de la population de nématodes (Pâte, 1997 ; Manlay *et al.*, 2000b). Elle peut aussi stimuler la propagation des mycorhizes (Duponnois, comm. pers.). En fait, ces "ingénieurs" souterrains hétérotrophes (Jones *et al.*, 1994 ; Lavelle *et al.*, 1997) associés aux systèmes racinaires contribuent à l'aptitude de l'écosystème "jachère" à atténuer les effets de l'adversité du climat, de la pauvreté en nutriments et de l'instabilité physique des sols (Menaut *et al.*, 1985 ; Perry *et al.*, 1989 ; Brown *et al.*, 1994). Cela est réalisé par des stratégies efficaces de conservation des nutriments, une intégrité structurale reposant sur la biomasse végétale vivante, et une stabilité fonctionnelle à travers l'amélioration de la biodiversité (Odum, 1969 ; Giller *et al.*, 1997). La faible aptitude des sols de jachère à humifier les apports organiques devrait être considérée comme le coût énergétique à payer pour le processus d'auto-organisation survenant dans l'écosystème "jachère", processus nécessaire pour restaurer la fertilité du sol dans les systèmes de production à faibles intrants de savane.

2.4.6. La gestion de la jachère en Afrique de l'Ouest dans une perspective de changement global

Dans une perspective de changement global, cette étude apporte des informations sur le potentiel de séquestration du carbone dans les savanes dans le but d'atténuer les émissions nettes de gaz à effet de serre anthropogéniques dont 20 % résulterait du changement d'utilisation des terres sous les tropiques (Schimel, 1995).

Après avoir intégré les résultats du Chapitre 1 dans la discussion, la dynamique du carbone montre plusieurs tendances, selon que l'on considère la composante végétale ou celle du sol (Figure 2.3). Ce qui a déjà été observé dans des contextes plus humides (Toky et Ramakrishnan, 1983a ; Toky et Ramakrishnan, 1983b ; Kotto-Same *et al.*, 1997) est confirmé dans cette étude : pendant le cycle culture-jachère, les réservoirs de MS, C, N et P les plus réactifs sont aussi les plus actifs d'un point de vue biologique, alors que les stocks du sol restent assez stables. Après l'abandon des cultures, les biomasses ligneuse et racinaire augmentent, alors que celle de la strate herbacée chute, et que les litières et les stocks organiques souterrains non vivants ne montrent aucune tendance claire d'évolution.

Selon les pratiques actuelles de cultures sur brûlis, la coupe d'une jachère climacique dans le Sud-Sénégal conduirait à la perte de 27 tC ha⁻¹ par brûlis immédiat, combustion ultérieure de bois pour des besoins énergétiques, décomposition *in-situ* des racines, des souches et des feuilles et branches non brûlées, et minéralisation d'une petite partie de la MOS. A peu près la moitié de cette valeur (12,3 tC ha⁻¹) peut être regagnée pendant la première

année de la jachère. Ensuite, le taux annuel de stockage est seulement de 2 tC ha⁻¹ pendant les 10 années suivantes de jachère. Cependant, cette aptitude nécessite que de longues périodes de jachère soient maintenues, ou du moins que les systèmes racinaires et les souches soient conservés pendant la période de culture. Le potentiel des jachères pour la séquestration du carbone est donc faible dans les savanes ouest-africaines si l'on se réfère aux valeurs trouvées dans les forêts tropicales humides et subhumides (10 tC ha⁻¹ an⁻¹ par Kotto-Same *et al.*, 1997 pendant les 15 premières années de jachère ; Denich *et al.*, 2000, pendant les 7 premières années d'une succession secondaire). De plus, le gain de carbone stable dans la fraction fine du sol de l'horizon 0-20 cm est seulement de 1,5 tC ha⁻¹. Ainsi, la séquestration est susceptible de survenir essentiellement dans les compartiments à fort taux de renouvellement (fraction grossière du sol, biomasse végétale), à moins de canaliser la coupe de bois vers un usage de construction seulement. Quoi qu'il en soit, la principale limite au potentiel des savanes pour séquestrer du carbone pourrait bien être le besoin local de terres (Tiessen *et al.*, 1998) et le caractère non immédiat du bénéfice économique retiré de la séquestration du carbone par l'agriculteur (Izac and Swift, 1994). Comme l'ont suggéré Brown et Lugo (1990) pour les forêts secondaires tropicales, la contribution des savanes d'Afrique de l'Ouest au contrôle de l'émission des gaz à effet de serre, dans une perspective de changement global, sera probablement indirecte. C'est à dire qu'elle se fera en procurant plus de revenus aux populations locales grâce à des agroécosystèmes intensifiés, limitant ainsi le besoin en terres dans la frange Nord des écosystèmes à forte capacité de stockage du carbone tels que les forêts humides. L'intensification elle-même repose sur une gestion organique plus efficace de la fertilité biologique de l'écosystème. Des solutions techniques comme la conservation des souches, l'abattis-paillis (Vielhauer *et al.*, 1998), la gestion du feu, la conservation des communautés souterraines, les jachères plantées (Peltier et Pity, 1993 ; Lopes da Silva *et al.*, 1998), les cultures de couverture et la culture sans labour (Azontonde *et al.*, 1998) sont prometteuses. Mais la plupart d'entre elles nécessitent beaucoup de travail, et donc une mécanisation et une éventuelle motorisation qui sont loin d'être accessibles compte tenu des possibilités locales de crédit, et même de la viabilité économique des systèmes de production dans le contexte socio-économique actuel.

CHAPITRE 3.

DISTRIBUTION DU CARBONE, DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE DANS LES AGROÉCOSYSTÈMES D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE

III - LES COMPOSANTES PLANTE ET SOL SOUS CULTURE CONTINUE



Estimation de la biomasse dans un champ de case sous maïs.

CHAPITRE 3.

DISTRIBUTION DU CARBONE, DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE DANS LES AGROÉCOSYSTÈMES D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE

III - LES COMPOSANTES PLANTE ET SOL SOUS CULTURE CONTINUE

Accepté dans «Agriculture Ecosystems & Environment»

Raphaël J. MANLAY a,b, Jean-Luc CHOTTE a, Dominique MASSE a, Jean-Yves LAURENT c, et Christian FELLER d.

a IRD, BP1386, Dakar, Sénégal

b Mis à disposition par l'ENGREF, BP 5093, 34033 Montpellier Cedex 1, France

c IRD, BP 5045, 34032 Montpellier, France

d CENA-USP, mis à disposition par l'IRD, Caixa Postal 96 13400-970 Piracicaba, SP, Brésil

RESUME

La distribution du carbone (C), de l'azote (N) et du phosphore (P) dans le système plante-sol (en dessous de 40 cm de profondeur) a été comparée à la récolte pour six parcelles cultivées en arachide, quatre en mil, deux en maïs et deux en riz, dans un terroir agropastoral du Sud Sénégal. Le

stockage du carbone dans le système plante-sol a atteint $25,0 \pm 0,6$, $27,4 \pm 1,0$, $34,9 \pm 6,5$ et $71,9 \pm 9,6$ t ha⁻¹ respectivement dans les champs d'arachide, de mil, de maïs et de riz. Le stock d'azote s'est élevé à $2,00 \pm 0,11$, $2,03 \pm 0,15$, $2,83 \pm 0,5$ et $6,16 \pm 2,20$ t ha⁻¹ dans ces champs. Les stocks de phosphore (P total dans les plantes + P assimilable dans le sol, noté POD) ont été de $5,8 \pm 1,1$ dans les parcelles d'arachide, $47,6 \pm 9,2$ dans celles de mil, $153,4 \pm 35,9$ dans celles de maïs et $147,2 \pm 100,4$ kg ha⁻¹ dans les champs de riz. Quatre vingt dix pour cent du carbone et 95 % de l'azote de l'ensemble de l'écosystème ont été stockés dans le sol.

Les stocks élevés trouvés pour les parcelles de riz ont été attribués à la texture argileuse du sol et à l'inondation saisonnière. Les stocks plus faibles de C, N et POD de l'auréole de brousse (cultures d'arachide), comme ceux de l'auréole de case (mil, maïs), résultent de la gestion des terres. Les parcelles de l'auréole de brousse dépendent entièrement de la pratique de la jachère pour maintenir les propriétés de leur sol. La culture continue et des stocks plus élevés de C, N et POD dans les sols de l'auréole de case ont été possibles grâce à des apports organique et minéraux plus importants résultant du recyclage des résidus de culture, de la fumure animale et, dans les parcelles de maïs, de l'épandage d'ordures ménagères. Dans l'auréole de case, les stocks de carbone ont semblé dépendre davantage de la richesse chimique des apports organiques que du volume de carbone apporté. Cependant, l'effet de la gestion des terres (auréole de brousse comparée à auréole de case) sur les propriétés du sol a été limité à l'horizon 0-20 cm (excepté pour le phosphore), et le meilleur statut du sol dans l'auréole de case reposait sur la perte d'éléments minéraux dans l'auréole de brousse.

Dans une perspective de changement global, le potentiel de gestion des savanes ouest-africaines (SOA) dans un but de limitation directe des émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre, a été estimé limité en raison du faible potentiel de séquestration du carbone dans le sol et dans les plantes.

D'un point de vue méthodologique, le statut organique du sol peut être considéré comme un indicateur pertinent de la fertilité des agroécosystèmes des SOA, à condition qu'il englobe ses composantes biotiques et que la caractérisation de la qualité de la matière organique du sol et sa dynamique (quantification des variations saisonnières, et flux de carbone) soient prises en compte.

MOTS CLE

Arachide, Azote, Biomasse végétale, Carbone, Maïs, Mil, Phosphore, Riz, Savane, Sénégal, Sol

3.1. Introduction

En raison de précipitations saisonnières violentes, de la texture grossière et de la pauvreté chimique des sols, du faible accès à la motorisation et aux intrants externes (engrais, énergie, pesticides), la durabilité des systèmes de production des SOA dépend fortement de la manière dont les agriculteurs gèrent la matière organique produite sur place. L'intégration de l'agriculture et de l'élevage associée avec la culture semi-permanente a prouvé son efficacité dans des conditions de faible densité de population (Ker, 1995). L'organisation fréquente des villages qui en résulte est centrée autour des habitations, selon un schéma de gestion en auréoles (Pélissier, 1966 ; Ruthenberg, 1971 ; Prudencio, 1993). Au moins trois auréoles sont généralement distinguées :

- (1) l'auréole de savane, qui est rarement appropriée et seulement partiellement intégrée aux systèmes de production. Elle fournit la population en bois pendant toute l'année et constitue un espace essentiel pour le bétail pendant la saison des cultures.
- (2) l'auréole de brousse, où est pratiquée la rotation culture-jachère, dominée par les cultures de rente.
- (3) l'auréole de case où l'intégration de l'agriculture et de l'élevage est pleinement réalisée. La culture continue est assurée grâce à une fumure pratiquée via un parcage de nuit sur la parcelle et une divagation des troupeaux pendant le jour à l'occasion de la vaine pâture, et grâce à un recyclage des ordures ménagères pendant la saison sèche.

La proximité d'un bas-fond, qui peut être continuellement cultivé grâce à des sols chimiquement riches et une inondation saisonnière, peut parfois perturber la symétrie radiale de ce schéma général.

Dans ces systèmes encore très autarciques, la matière organique endogène procure aux agriculteurs des biens économiques (céréales, viande, bois). C'est aussi un moyen essentiel de production puisque (1) la restauration de la fertilité du sol pendant la jachère repose sur la formation et l'initiation de stocks et de flux de carbone importants dans l'écosystème (2) le bétail, qui fournit une force de travail et du fumier aux champs en culture continue, se nourrit de fourrage.

Le statut organique du sol évalué par les taux de carbone et d'azote, a souvent été considéré comme un indicateur fiable de la qualité du sol. Ceci est dû aux effets positifs de la matière organique sur les propriétés physiques (structure, stabilité, porosité), chimiques (cations échangeables, capacité d'échange en cation ou CEC, pH) et biologiques (substrats énergétiques pour la faune du sol et la microflore) du sol (Tiessen *et al.*, 1994 ; Herrick and Wander, 1998 ; Kay, 1998 ; Feller *et al.*, 2000). Le rôle du carbone est particulièrement important dans les sols sableux à argile faiblement active

des SOA car (1) il agit comme un substitut de l'argile pour la formation de la CEC, (2) il protège le sol contre les rigueurs climatiques, (3) il reste un médiateur inévitable pour la fourniture de nutriments dans les systèmes traditionnels de culture à faibles intrants chimiques (Jones and Wild, 1975 ; de Ridder and van Keulen, 1990 ; Asadu *et al.*, 1997). La polyvalence du carbone est due au fait que la matière organique du sol (MOS) est formée de plusieurs réservoirs fonctionnels différents par leur constitution chimique et par leur taux de renouvellement. Des méthodes physiques (fractionnement granulométrique), permettant d'isoler ces réservoirs existent (Feller, 1993). Les besoins croissants en terre exigent un changement des pratiques traditionnelles, qui, dans le contexte actuel, conduiraient à des pertes annuelles de 10 à 25 kg d'azote (N) et 2,5 kg de phosphore (P) dans les champs d'Afrique subsaharienne (van der Pol, 1992 ; Stoorvogel *et al.*, 1993a). Il est acquis que l'azote et le phosphore sont les principaux facteurs chimiques limitant le rendement des cultures dans les SOA (Mokwunye and Hammond, 1992 ; Bationo *et al.*, 1998), mais les expériences passées montrent que leur apport aux plantes devrait se faire sous forme organique (Pieri, 1989). Même si des arguments plaident pour la conservation de jachères améliorées multi-fonctionnelles, l'essentiel de l'intensification reposera probablement sur une meilleure gestion des cycles des éléments biogéochimiques grâce à l'intégration de l'agriculture et de l'élevage, du paillage et de l'agroforesterie dans l'auréole de case (Vierich and Stoop, 1990). En effet, l'Afrique subsaharienne compte pour moins de 1 % de la consommation mondiale en engrais, alors qu'elle héberge un dixième de la population mondiale, et les prévisions ne prédisent qu'une faible amélioration de l'accès aux engrais dans les prochaines années (FAO, 1998a ; UNDP, 1999).

Dans une perspective de changement global, les activités agricoles sont une source majeure d'émission de gaz à effet de serre (GES) (Schimel, 1995). Au Sénégal, comme dans d'autres régions du monde, l'agriculture serait responsable d'un quart des émissions de GES anthropogénique dans l'atmosphère (Sokona, 1995). Bien que l'atténuation des émissions de gaz carbonique ne devrait pas être une priorité pour les économies fragiles d'Afrique tropicale sèche, la séquestration du carbone pourrait bien améliorer la durabilité des écosystèmes agricoles de la sous-région (Woomer *et al.*, 1998).

Dans les petites exploitations agricoles africaines, il existe ainsi un besoin croissant de quantification exacte des bilans de carbone (C), d'azote et de phosphore selon le type de gestion des terres. Les bilans minéraux dans les systèmes de culture de l'Afrique de l'Ouest sèche, ont été établis à une échelle nationale par Stoorvogel *et al.* (1993a). Ces auteurs reconnaissent que des études locales exhaustives comme celles réalisées par Stoorvogel *et al.* (1993b) manquent encore afin de valider le modèle qu'ils ont utilisé. D'un autre côté, la plupart des études traitant de la gestion de la fertilité des sols dans les systèmes de culture continue ou semi-permanente

de la sous-région ont été faites dans des centres de recherche où les conditions environnementales (homogénéité des caractéristiques des sols, plan expérimental rationnel) conviennent pour une estimation précise des paramètres responsables de l'efficacité de la pratique. Les résultats des études en milieu paysan sont moins documentés ; pourtant, l'effet d'une pratique sur le statut du sol et le rendement de la biomasse végétale pourrait bien être diminué par l'hétérogénéité du sol, les risques de maladies et les contraintes du calendrier agricole. D'un autre côté, les études sur la séquestration du carbone en Afrique subsaharienne sont peu nombreuses du fait du contexte économique (Woomer *et al.*, 1998). Tiessen *et al.* (1998) ont réalisé une synthèse pour le Sénégal semi-aride qui, excepté le travail de Diouf (1990), met en évidence (1) le manque de bilans exhaustifs et précis en carbone et en éléments minéraux, dans un lieu donné, en relation avec la gestion de l'espace, (2) la rareté des estimations des taux de renouvellement de la matière organique du sol dans différents systèmes de gestion.

Ce travail est la troisième et dernière partie d'un essai visant à quantifier la distribution de C, N et P dans les agroécosystèmes des savanes d'Afrique de l'Ouest. Les parties précédentes traitaient de leur distribution dans la biomasse végétale (Chapitre 1) et dans le sol (Chapitre 2) sous culture semi-permanente.

Les objectifs de cette étude étaient (1) de dresser des bilans détaillés de carbone, d'azote et de phosphore assimilable d'agroécosystèmes cultivés (plante-sol) (2) d'établir la relation entre la teneur en MOS et les autres propriétés physiques et chimiques du sol, l'intensité de culture (champs de brousse contre champs de case), et la gestion des apports organiques (jachère, fumure, ordures ménagères) (3) d'évaluer la complémentarité fonctionnelle entre les systèmes de culture continue et semi-permanente (4) de discuter la façon dont le statut organique du sol pourrait être utilisé comme indicateur de la qualité des sols et de la durabilité des systèmes de culture dans les SOA.

3.2. Méthodes

3.2.1. Caractéristiques du site

Le village de Sare Yorobana (12°49'N – 14°53'O) est situé dans la région de Kolda, Haute-Casamance, Sud Sénégal. Le climat est tropical sec. La pluviosité moyenne annuelle a été de 960 mm pendant les 20 dernières années (mai à octobre), et la température moyenne annuelle de 28°C (Service de la Météorologie Nationale, station de Kolda). L'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne a été de 1570 mm entre 1977 et 1988 (Dacosta, 1989). L'étude a été conduite pendant les années 1996 et 1997. La gestion

en auréoles concentriques autour du village permet de distinguer trois principaux systèmes d'utilisation des terres :

(1) le plateau, encore couvert d'importantes étendues de forêts sèches mixtes de savane et de vieilles jachères, la végétation ligneuse étant dominée par des repousses de combrétacées. Les champs de brousse en bordure de plateau sont consacrés à la culture d'un cultivar local d'arachide (*Arachis hypogaea* L.), de type Virginia. Les sols sont sableux, ferrugineux (Baldensperger *et al.*, 1967), classés comme des Lixisols (FAO, 1998b ; description en Annexe 4). les principales propriétés des sols cultivés sont : une texture sablo-limoneuse en surface, devenant sablo-argilo-limoneuse en deçà de 30 cm de profondeur ; une légère acidité dans tout le profil avec un pH_{H_2O} égal à $5,5 \pm 0,1$ (erreur-type) ; des teneurs moyennes en C, N et P_{OD} assimilable (voir Méthodes) atteignant respectivement $4,5 \pm 0,2$ ($3,7 \pm 0,1$) $g\ kg^{-1}$, $0,36 \pm 0,02$ ($0,32 \pm 0,02$) $g\ kg^{-1}$ et $2,5 \pm 0,2$ ($1,9 \pm 0,1$) $\mu g\ kg^{-1}$ dans l'horizon 0-10 (0-40) cm ; une CEC avoisinant 2,0-2,7 (2,2-3,0) meq $100g^{-1}$ de sol, avec des taux de saturation moyens de 75 (60) % dans l'horizon 0-10 (0-40) cm ; un $pF_{2,5}$: $6,9 \pm 1,0$ % dans l'horizon 0-10 cm, deux fois plus élevé dans l'horizon 30-40 cm ; un $pF_{4,2}$: $2,7 \pm 0,3$ % et $7,3 \pm 1,2$ % dans les horizons 0-10 et 30-40 cm.

(2) le glacis de mi-pente, principalement occupé par les cultures vivrières comme le mil tardif (*Pennisetum glaucum* L.), le maïs (*Zea mays* L.) et le sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench). Les cultures permanentes sont généralement fumées grâce au parage de nuit des animaux à des taux dépendant de la taille du troupeau du propriétaire. Les parcelles jouxtant l'auréole de case reçoivent aussi des ordures ménagères. Les sols de glacis sont des Lixisols (description en Annexe 4). Les caractéristiques des sols sont : une texture similaire à celle du plateau, avec un peu moins d'argile accumulé en profondeur ; une acidité moindre ($6,3 \pm 0,1$ dans l'eau) ; des teneurs en C, N et P assimilable respectivement de $7,5 \pm 1,0$ ($4,3 \pm 0,4$) $g\ kg^{-1}$, $0,65 \pm 0,11$ ($0,37 \pm 0,04$) $g\ kg^{-1}$ et $16,3 \pm 6,4$ ($11,1 \pm 3,8$) $\mu g\ kg^{-1}$ dans l'horizon 0-10 (0-40) cm ; une CEC de $3,7 \pm 0,5$ ($2,5 \pm 0,2$) meq $100g^{-1}$, le sol étant proche de la saturation cationique.

(3) le bas-fond, consacré au riz (*Oryza sativa* L.) et à la palmeraie. Les inondations annuelles et la texture du sol expliquent le bon statut chimique des sols de cette unité. Les sols sont des Gleysols (FAO, 1998b), à texture argilo-limoneuse en surface devenant limoneuse à limono-argileuse en dessous de 30 cm (description en Annexe 4). Des teneurs assez fortes en C, N et P_{OD} assimilable, respectivement de $16,9 \pm 1,0$ ($12,3 \pm 1,1$) $g\ kg^{-1}$, $1,5 \pm 0,1$ ($1,1 \pm 0,2$) $g\ kg^{-1}$ et $12,2$ (25,7) $\mu g\ kg^{-1}$ dans l'horizon 0-10 (0-40) cm, une CEC atteignant 10 (8,8) meq $100g^{-1}$, un taux de saturation (S) en dessous de 50 (37) % sont les autres principales caractéristiques du sol. Comme dans les deux autres unités systémiques, la densité apparente du sol est restée assez stable, un peu inférieure pour les sols de bas-fond à celle des sols de glacis et de plateau (1,4 contre 1,5).

Les Peulhs sédentarisés, éleveurs à l'origine, ont intégré un pastoralisme

extensif - surtout bovin - à cette agriculture diversifiée, partiellement continue.

3.2.2. Echantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé en période de récolte en 1996 et 1997. Excepté le maïs qui atteint sa maturité en septembre, les récoltes ont eu lieu de novembre à décembre au commencement de la saison sèche. Les biomasses maximales sur pied sont généralement enregistrées à cette période, qui coïncide avec le retour du cheptel depuis les parcours périphériques où il est gardé pendant la saison de culture.

Le plan général d'échantillonnage était destiné à prendre en compte la grande hétérogénéité des champs due aux effets microlocaux des souches, des termitières, de l'histoire des pratiques et de la topographie (Milleville, 1972). Quatorze parcelles ont été choisies pour un bilan complet de carbone, d'azote et de phosphore. Elles représentaient les différents types de gestion des terres le long de la toposéquence : six champs de brousse d'arachide (AR) (quatre en rotation biennale avec la jachère, les deux autres en rotation irrégulière avec les céréales et la jachère) ; quatre champs de case supportant des cultures permanentes de mil (MI) avec différentes intensités de fumure durant le parage nocturne et la divagation diurne ; deux parcelles de case de maïs (MA) bénéficiant d'apports en ordures ménagères et des plus forts taux de fumure ; deux parcelles saisonnièrement inondées, en bas de pente et cultivées en riz (RI) (Figure 3.1 ; Annexe 1). Des enquêtes très précises parmi les propriétaires des parcelles ont été réalisées afin de vérifier qu'aucun apport minéral n'avait été effectué pendant les 10 dernières années, et que l'histoire des pratiques agricoles avait été similaire entre les parcelles de culture identique. A Sare Yorobana, l'arachide, le mil, le maïs, le sorgho et le riz sont généralement plantés à des espacements respectifs de 0,2x0,4, 1,0x1,0, 0,5x0,5, 1,0x1,0 et environ 0,1x0,1 m.

Dans chaque champ, quatre placeaux carrés (16 m² chacun) ont été choisis. La végétation a été coupée. Les biomasses de paille, de gousse/épi et d'adventices ont été pesées séparément, et un échantillon de chaque a été gardé pour la détermination des taux de matière sèche (MS), C, N et P. A chaque coin des placeaux, les racines ont été échantillonnées en utilisant une tarière ($\varnothing$: 5,6 cm). Une fosse a été creusée autour du trou et des échantillons de sol ont été prélevés pour des analyses complémentaires. Un cylindre de 100 cm³ a été utilisé pour la mesure de la densité apparente du sol. Les prélèvements de racines et de sol ont été réalisés tous les 10 cm, jusqu'à 40 cm de profondeur, l'activité racinaire et l'influence de la gestion des terres étant très réduite en dessous de cette profondeur (Siband, 1974 ; Chopart, 1980 ; Feller, 1995a).

3.2.3. Analyses végétales et pédologiques

Les racines ont été séparées hydro-pneumatiquement de la terre avec un tamis de 1 mm (Webb, 1995). Tous les échantillons végétaux ont été séchés au four à 70°C jusqu'à un poids constant pour déterminer le taux de MS. Les racines ont ensuite été triées manuellement en deux classes de diamètre (au-dessus et en dessous de 2 mm).

Les échantillons de sol ont été tamisés (< 2 mm) et séchés au four à 105°C pendant 24 heures. Des échantillons du même plateau ont été mélangés afin de calculer la teneur en C et la densité apparente, constituant ainsi quatre répétitions par parcelle et par horizon du sol. Seules deux déterminations ont été effectuées dans les champs MI02, AR01 et AR02. Toutes les autres propriétés physiques et chimiques ont été analysées sur un échantillon par parcelle, sur toutes les parcelles. Toutes les méthodes d'analyse des plantes (C, N et P total, noté P_t) et du sol (C, N, P_{OD} , pH_{H_2O} et KCl , Ca, Mg, Na, K, CEC, S, les 5 fractions granulométriques, $pFs_{2,5}$ et $4,2$) ont été décrites dans le Chapitre 2. Elles sont détaillées dans Page *et al.* (1989), excepté pour (1) les taux de carbone et d'azote des fractions du sol, déterminés par combustion humide avec un analyseur d'éléments Fisons (Carlo Erba) Na2000 (2) le phosphore assimilable dans le sol, qui a été évalué par la méthode Olsen modifiée par Dabin (1967) et noté P_{OD} (3) l'humidité pondérale, mesurée à une succion équivalente à $pF_{2,5}$ (0,322 atm) et $pF_{4,2}$ (14,5 atm).

Les stocks de C, N, P_{OD} et P_t ($t\ ha^{-1}$) dans le sol et la végétation ont été calculés en utilisant le stock de MS ou la densité apparente du sol et les teneurs en C, N, P_{OD} et P_t réunies dans le Tableau 3.1a,b et le Tableau 3.2. En raison du biais possible dans les données de stockage dans le sol, dû aux différences de densité apparente entre les parcelles, les statistiques sur le stockage des éléments du sol ont été calculées pour des masses équivalentes de sol (Ellert and Bettany, 1995). Le fractionnement granulométrique de la MOS par tamisage sous eau a été réalisé sur les échantillons des horizons 0-10 et 10-20 cm, suivant une méthode simplifiée de Gavinelli *et al.* (1995). Elle permet de séparer les fractions [0-50] et [50-2000] μm et d'étudier leur MO séparément. Dans ce qui suit, la teneur en carbone d'une fraction sera définie comme la quantité de carbone par unité de masse du sol, tandis que la concentration de carbone dans une fraction sera définie comme la quantité de carbone par unité de masse de la fraction.

L'abondance de la fraction argile+limon a été estimée à l'échelle du plateau, grâce à la masse de la fraction 0-50 μm obtenue par la méthode de fractionnement décrite ci-dessus. Même s'il n'est pas exactement équivalent à la masse relative de la fraction [0-50] μm déterminée selon la méthode standard des cinq fractions, où les ciments organiques sont détruits par oxydation, la différence est très faible (Feller, 1995a). La masse relative de la fraction fine [0-50] μm déterminée par cette méthode a été utilisée comme un indicateur de texture fine à l'échelle du plateau (voir 3.2.4.).

3.2.4. Analyses des données

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel SAS 6.14 (Hatcher and Stepanski, 1994) exceptées les analyses en composante principale (ACP) sur le logiciel ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997). Les Gleysols des champs de riz étant trop différents des sols de glacis et de plateau, leurs données pédologiques n'ont pas été incluses dans les analyses multivariées et les analyses de variance (Anova).

Les analyses multivariées ont été effectuées grâce à la procédure CORR pour le calcul des corrélations de Spearman (R_s). Les analyses de corrélation ont été réalisées entre les variables du sol (les 18 variables du sol listées plus haut, plus les teneurs en sable, limon, argile+limon et argile+limon fin, densité, C/N ; pour les horizons 0-10 et 10-20 cm la teneur en carbone des fractions fines et grossières a été ajoutée). L'ACP a été calculée pour chaque horizon du sol sur la matrice de corrélation contenant 12 lignes (les répétitions des parcelles) et 24 à 26 colonnes (les variables du sol utilisées dans les analyses de corrélation).

Les Anovas à deux facteurs ont été réalisées avec la procédure GLM sur les rangs des données en raison du faible nombre de répétitions des mesures et de l'incertitude sur la normalité des distributions des données et des résidus (Potvin and Roff, 1993). Comme expliqué dans le Chapitre 2, des relations positives ont été enregistrées entre le carbone et la texture fine des sols dans les savanes ouest-africaines (Jones and Wild, 1975 ; Feller, 1993 ; Zech *et al.*, 1997). C'est pourquoi, pour pouvoir relier les propriétés du sol à la gestion du sol, il a fallu introduire la texture comme covariable dans le modèle.

Deux séries d'Anovas ont été réalisées. L'une était destinée à faire le lien entre les propriétés du sol et "l'intensité de culture" (champs de brousse contre champs de case) et a utilisé les répétitions des parcelles (covariable texturale : masse relative de la fraction argile+limon fin, méthodologie standard). L'autre série d'Anovas a été effectuée en utilisant les répétitions des placeaux pour évaluer l'effet de la gestion organique de la fertilité sur le statut organique du sol (covariable texturale : masse relative de la fraction [0-50] μm mesurée sans destruction de la MOS) ; cinq traitements ont été distingués :

- champs de brousse : bénéficiant seulement de la jachère (BrJa), ou d'une légère fumure pendant le parcage nocturne du bétail (BrParc).
- champs de case : jamais fumés (Cas) ; fumés sans apport d'ordures ménagères (CasParc) ; fumés avec apport d'ordures ménagères (CasParcOrd) (voir Figure 3.1 pour plus de détails sur les situations et les estimations d'entrées organiques).

Dans cette deuxième Anova, le test T apparié ($\alpha=0,05$) sur les moyennes des moindres carrés (MC) a permis d'identifier les pratiques de gestion qui avaient des impacts similaires sur les teneurs et les stocks de carbone du sol.

3.3. Résultats

3.3.1. Stocks de carbone, d'azote et de phosphore dans la biomasse des champs cultivés

Les stockages de matière sèche dans la biomasse des champs d'arachide, de mil, de maïs et de riz ont été respectivement de $7,2 \pm 0,4$ (sans inclure les souches, dont la biomasse moyenne était de $7,5 \pm 3,2$, $n=3$, voir Chapitre 1), $11,6 \pm 1,0$, $11,1 \pm 0,5$ et $9,9 \pm 0,7$ tMS ha^{-1} (Tableau 3.1a). Les rapports tige/racine ont beaucoup varié, de 0,8 dans les champs de brousse à 8,8 dans les champs de mil, 31,7 dans les champs de maïs et 1,9 dans les champs de riz. Les adventices ligneuses et herbacées ont constitué respectivement 26, 4, 11 et 8 % de la biomasse aérienne (BA).

La teneur en C a atteint $34,3 \text{ gC } 100\text{gMS}^{-1}$, avec de plus faibles valeurs trouvées dans les composantes du riz, et des plus fortes dans les gousses d'arachide (Tableau 3.1b ; Annexe 17). La teneur moyenne en azote de la biomasse a été de $1,16 \text{ gN } 100\text{gMS}^{-1}$. Les teneurs les plus élevées ont été mesurées dans la BA et les racines fines d'arachide, les plus faibles ont été enregistrées dans les tiges de mil et de riz. La concentration en P_t a atteint $0,14 \text{ gP } 100\text{gMS}^{-1}$. Les taux les plus faibles et les plus élevés ont été trouvés respectivement dans les racines et la BA du maïs.

Les stocks de C dans les champs d'arachide, de mil, de maïs et de riz se sont élevés à $2,71 \pm 0,14$ (sans les souches dont le stock de C atteint $2,83 \pm 1,22$, $n=3$, voir Chapitre 1), $4,21 \pm 0,74$, $3,81 \pm 0,38$ et $3,02 \pm 0,52$ tC ha^{-1} (Figure 3.1). Les stocks de N ont atteint $79,7 \pm 4,3$ (arachide), $69,1 \pm 13,4$ (mil), $120,0 \pm 20,0$ (maïs) et $59,4 \pm 3,6$ (riz) kg ha^{-1} . Les stocks de P dans la biomasse végétale de ces parcelles cultivées ont été respectivement de $4,4 \pm 0,7$, $12,3 \pm 2,1$, $23,1 \pm 1,1$ et $10,5 \pm 4,7$ kg ha^{-1} .

L'exportation moyenne d'azote survenant à la récolte a été de 27, 25, 58 et 18 kg ha^{-1} respectivement pour l'arachide, le mil, le maïs et le riz. Dans le cas du P, elle a été de 0,7, 2,4, 3,1 et 1,5 kg ha^{-1} . Pour l'arachide, lorsque l'on considère les fanes, une quantité supplémentaire d'azote et de phosphore est exportée, équivalant respectivement à 25 et 0,4 kg ha^{-1} .

Tableau 3.1 Biomasse des champs d'arachide (AR), de mil (MI), de maïs (MA) et de riz (RI) : a. stock de matière sèche (tMS ha⁻¹). b. teneurs en carbone, azote et phosphore total

a.

Parcelle	Gousse	Fane	Adventices herb. et lign.	Racines fines par horizon de sol en cm					Racines épaisses
	/ épi	/ paille		0-10	10-20	20-30	30-40	0-40	
AR01	0,66	1,52	0,32	0,19	0,15	0,11	0,07	0,52	5,18 ⁺
AR02	1,18	1,86	0,39	0,20	0,17	0,10	0,07	0,53	3,02 ⁺
AR03	0,73	1,14	0,75	0,25	0,16	0,12	0,08	0,61	3,13 ⁺
AR04	1,24	1,75	1,66	0,33	0,18	0,11	0,07	0,69	2,99 ⁺
AR05	0,67	1,18	1,14	0,21	0,09	0,08	0,05	0,44	2,95 ⁺
AR06	1,12	1,51	0,82	0,29	0,18	0,10	0,07	0,63	3,03 ⁺
MI01	1,41	4,38	0,27	0,32	0,19	0,08	0,11	0,70	0,24
MI02	1,85	6,28	0,39	0,34	0,23	0,12	0,09	0,78	0,10
MI03	2,43	9,82	1,32	0,53	0,32	0,16	0,09	1,09	0,03
MI04	2,44	9,62	1,29	0,70	0,24	0,07	0,07	1,08	0,73
MA01	3,66	4,71	1,38	0,16	0,05	0,05	0,04	0,30	0,01
MA02	5,61	5,21	0,97	0,17	0,06	0,05	0,05	0,34	0,03
RI01	1,30	2,16	0,09	2,91	0,87	0,33	0,26	4,38	0,10
RI02	4,61	4,45	0,40	1,55	0,36	0,15	0,12	2,18	0,03

+ : calculé en utilisant une régression liant la biomasse des racines épaisses (en tMS ha⁻¹) mesurée par excavation totale dans les fosses (a) à celle mesurée grâce à la tarière (b) : $a = 1,73 \cdot b + 2,95$; $R^2 = 0,6$; $p\{Fobs > Fth\} < 0,05$; $n = 9$ (voir Chapitre 1). Racines fines : diamètre entre 0 et 2 mm. Grosse racines : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises).

b.

Parcelle	Gousse, épi	Fane ou paille	Adventices herb./lign.	Racines	
				fines	épaisses
	m ±ET	m ±ET	m ±ET	m ±ET	m ±ET
C (g 100g ⁻¹ MS)					
Arachide	45,2 ±0,8	33,6 ±0,2	35,7 ±0,3	34,1 ±0,5	38,0 ⁺
Mil	35,3 ±0,1	37,0 ±0,6	35,2 ±0,3	35,1 ±1,0	35,1 ±1,0 ⁺
Maïs	35,6 ±0,4	35,1 ±0,3	26,4 ±1,5	34,4 ±1,0	34,4 ±1,0 ⁺
Riz	32,2 ±1,0	30,7 ±1,2	32,6 ±0,1	29,8 ±0,2	29,8 ±0,2 ⁺
N (g 100g ⁻¹ MS)					
Arachide	2,87 ±0,10	1,70 ±0,06	0,83 ±0,06	1,66 ±0,03	0,35 ⁺
Mil	1,23 ±0,09	0,27 ±0,03	1,30 ±0,08	1,04 ±0,04	1,04 ±0,04 ⁺
Maïs	1,21 ±0,18	0,80 ±0,01	1,58 ±0,11	1,31 ±0,08	1,31 ±0,08 ⁺
Riz	0,63 ±0,05	0,41 ±0,01	0,91 ±0,01	0,76 ±0,07	0,76 ±0,07 ⁺
P _i (g 100g ⁻¹ MS)					
Arachide	0,17 ±0,01	0,08 ±0,00	0,06 ±0,00	0,07 ±0,01	0,02 ⁺
Mil	0,24 ±0,01	0,07 ±0,00	0,19 ±0,03	0,07 ±0,00	0,07 ±0,00 ⁺
Maïs	0,20 ±0,05	0,20 ±0,01	0,39 ±0,02	0,08 ±0,00	0,08 ±0,00 ⁺
Riz	0,14 ±0,04	0,10 ±0,02	0,21 ±0,02	0,06 ±0,01	0,06 ±0,01 ⁺

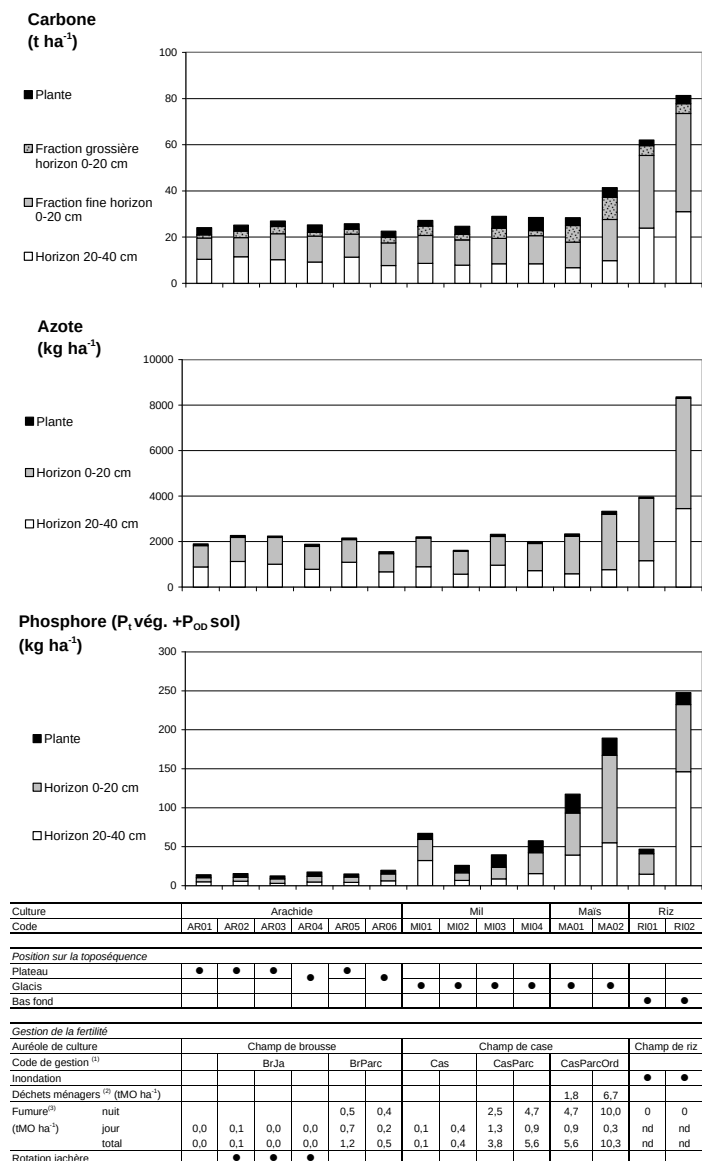


Figure 3.1 Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore dans le système sol-plante dans les principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique à Sare Yorobana, Sud Sénégal.

nd : non déterminé.

(1) utilisé en 3.3.5.

(2) données non publiées pour la saison sèche 1997-98, en supposant l'épandage des ordures sur une bande de 30 m autour des cases.

(3) données pour la saison sèche 1995-96 (divagation diurne) et 1996-97 (parcage nocturne) tirées du Chapitre 5.

Données en Annexe 18, Annexe 19 et Annexe 24.

3.3.2. Stocks de carbone, d'azote et de phosphore dans le sol des champs en culture

La teneur en carbone organique du sol (COS) a atteint $6,42 \pm 1,10$ et $5,18 \pm 0,87$ g kg⁻¹ dans les horizons 0-20 et 0-40 cm (Tableau 3.2). Les teneurs moyenne en N se sont élevées à $0,56 \pm 0,11$ et $0,45 \pm 0,09$ g kg⁻¹ dans ces horizons. Les taux de P ont été de $9,88 \pm 3,20$ et $9,23 \pm 3,35$ g kg⁻¹ dans les horizons 0-20 et 0-40 cm, avec des variations importantes entre les parcelles. Les teneurs moyennes en C, N et P_{OD} du sol se sont classées comme suit : riz>maïs>mil>arachide (horizons 0-20 et 0-40 cm). Une faible variation entre les parcelles a été enregistrée pour la densité apparente, qui était égale à 1,50 kg dm⁻³.

Les stocks de C du sol ont avoisiné respectivement $22,3 \pm 0,7$, $23,1 \pm 0,7$, $31,1 \pm 6,1$ et $68,7 \pm 9,1$ tC ha⁻¹ dans l'horizon 0-40 cm des champs d'arachide,

Tableau 3.2 Teneurs en carbone, azote et phosphore assimilable du sol, rapports C/N et densités apparentes modifiées de la fraction [0-2000] µm des champs d'arachide (AR), de mil (MI), de maïs (MA) et de riz (RI).

a. C (g kg ⁻¹)					
Parcelle	Horizon du sol (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
AR01	3,93	3,19	3,09	3,87	3,52
AR02	4,40	3,30	3,55	4,12	3,84
AR03	5,07	4,28	3,40	3,41	4,04
AR04	5,02	3,75	3,30	2,85	3,73
AR05	4,20	3,77	3,92	3,60	3,87
AR06	4,31	3,70	2,66	2,55	3,31
MI01	6,97	3,53	2,67	2,98	4,04
MI02	5,22	3,61	2,85	2,26	3,48
MI03	6,58	3,78	2,43	3,02	3,95
MI04	5,96	3,71	2,62	2,75	3,76
MA01	8,54	3,74	2,31	2,12	4,18
MA02	11,98	6,66	3,64	2,59	6,22
RI01	14,59	10,38	7,69	6,81	9,87
RI02	19,17	16,51	13,37	10,07	14,78

b. N (g kg ⁻¹)					
Parcelle	Horizon du sol (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
AR01	0,33	0,30	0,26	0,33	0,31
AR02	0,38	0,36	0,35	0,40	0,37
AR03	0,41	0,35	0,32	0,35	0,36
AR04	0,37	0,32	0,27	0,25	0,30
AR05	0,35	0,31	0,35	0,37	0,35
AR06	0,29	0,24	0,23	0,22	0,25
MI01	0,52	0,31	0,26	0,32	0,35
MI02	0,40	0,26	0,18	0,19	0,26
MI03	0,53	0,32	0,30	0,32	0,37
MI04	0,52	0,28	0,24	0,22	0,32
MA01	0,78	0,33	0,20	0,18	0,37
MA02	1,13	0,53	0,28	0,21	0,54
RI01	1,19	0,74	0,41	0,30	0,66
RI02	1,84	1,87	1,55	1,07	1,58

c. P _{OD} (mg kg ⁻¹)					
Parcelle	Horizon du sol (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
AR01	1,7	1,9	2,0	1,3	1,7
AR02	2,3	1,1	0,8	1,9	1,8
AR03	2,4	1,4	0,8	1,2	1,5
AR04	2,9	2,0	1,6	1,6	2,0
AR05	2,6	1,9	1,7	1,1	1,8
AR06	3,2	2,5	2,3	2,0	2,5
MI01	9,4	8,4	8,5	12,5	9,7
MI02	3,4	3,0	2,3	2,1	2,7
MI03	5,9	4,0	2,9	2,8	3,9
MI04	10,9	7,0	6,2	3,7	7,0
MA01	22,9	13,4	12,4	13,2	15,5
MA02	45,4	30,7	19,4	15,5	27,8
RI01	10,1	8,3	5,1	3,8	6,8
RI02	14,4	53,4	66,9	43,8	44,6

d. C/N					
Parcelle	Horizon du sol (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
AR01	11,9	10,6	11,9	11,7	11,5
AR02	11,6	9,2	10,1	10,3	10,3
AR03	12,4	12,2	10,6	9,7	11,3
AR04	13,6	11,7	12,2	11,4	12,3
AR05	12,0	12,1	11,2	9,7	11,2
AR06	14,9	15,4	11,6	11,6	13,5
MI01	13,4	11,4	10,3	9,3	11,5
MI02	13,1	13,9	15,8	11,9	13,5
MI03	12,4	11,8	8,1	9,4	10,8
MI04	11,5	13,2	10,9	12,5	11,9
MA01	10,9	11,3	11,6	11,6	11,2
MA02	10,6	12,6	13,0	12,6	11,6
RI01	12,3	14,1	18,9	22,9	15,0
RI02	10,4	8,8	8,7	9,4	9,3

e. Bulk density (fraction [0-2000]µm) (kg dm ⁻³)					
Parcelle	Horizon du sol (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
AR01	1,47	1,50	1,50	1,50	1,49
AR02	1,51	1,35	1,60	1,41	1,47
AR03	1,54	1,54	1,50	1,51	1,52
AR04	1,53	1,39	1,66	1,31	1,47
AR05	1,52	1,52	1,50	1,52	1,51
AR06	1,52	1,50	1,49	1,46	1,50
MI01	1,55	1,49	1,51	1,55	1,53
MI02	1,50	1,54	1,53	1,54	1,53
MI03	1,45	1,54	1,55	1,56	1,52
MI04	1,44	1,58	1,56	1,58	1,54
MA01	1,45	1,55	1,53	1,55	1,52
MA02	1,43	1,54	1,57	1,58	1,53
RI01	1,38	1,50	1,64	1,66	1,54
RI02	1,37	1,24	1,30	1,35	1,32

La densité apparente modifiée est la masse de la fraction du sol [0-2000] µm (tamisage à sec) par unité de volume. Cette densité a été utilisée pour le calcul des stocks d'éléments du sol.

de mil, de maïs et de riz, 55 % (arachide) à 73 % (maïs) étant stockés dans l'horizon 0-20 cm (Figure 3.1 ; voir Tableau 3.2 pour les détails des calculs). Les stocks d'azote ont atteint $1,92 \pm 1,10$ (arachide), $1,96 \pm 0,15$ (mil), $2,71 \pm 0,48$ (maïs) et $6,10 \pm 2,20$ (riz) $t\ ha^{-1}$, avec une distribution verticale similaire à celle du carbone. Les stocks de P_{OD} ont été de $11,3 \pm 0,8$, $35,4 \pm 9,6$, $130,2 \pm 37,0$ et $136,7 \pm 96$ $kgP\ ha^{-1}$, 57 % étant contenus dans l'horizon 0-20 cm du sol.

Le stockage du carbone dans le système plante-sol s'est élevé à $25,0 \pm 0,6$, $27,4 \pm 1,0$, $34,9 \pm 6,5$ et $71,7 \pm 9,6$ $t\ ha^{-1}$ dans les champs d'arachide, de mil, de maïs et de riz. Quatre vingt dix pour cent du carbone et du phosphore et 95 % de N de l'ensemble de l'écosystème ont été stockés dans le sol.

3.3.3. Statut organique du sol en relation avec les autres propriétés du sol

Les analyses de corrélation ont montré les liens statistiquement significatifs suivants ($p\{R=0\} < 0,05$) entre les variables :

- horizon 0-10 cm : les teneurs en C, N et P étaient positivement liées ($R_S = +0,79^{**}$ à $+0,95^{**}$) (Annexe 20a). Le pH (dans l'eau et KCl), Ca, Mg, K, CEC et S étaient corrélés à C, N et P ($R_S = +0,62^*$ à $+0,98^{***}$). Les corrélations de ces propriétés chimiques ont été meilleures avec la teneur en C de la fraction $[0-50]\ \mu m$ (R_S moyen : $+0,85$) qu'avec la teneur en C de la fraction $[50-2000]\ \mu m$ (R_S moyen : $+0,74$). Les éléments fins (argile+limon fin) ont été corrélés seulement avec le pF2,5 ($R_S = +0,67^*$) et le pF4,2 ($R_S = +0,88^*$). Sur le demi-axe positif, C (total et par fraction), CEC, Ca, Mg, K, à la formation de la première composante principale (CP) (inertie relative ou IR : 45 %) de l'ACP (Figure 3.2a). Les parcelles MA étaient situées du côté positif de l'axe, alors que les parcelles AR étaient du côté négatif, les parcelles MI étant nettement isolées près de l'origine de l'axe (Figure 3.2b). La seconde CP (IR : 18 %) a été portée par la texture ; les parcelles MA, MI et AR n'ont pris aucune position particulière le long de cette CP (projections sur le plan CP1xCP3 en Annexe 21),
- horizon 10-20 cm : la texture fine a été négativement corrélée à P, pH, Ca, Mg, Na et S ($R_S = -0,62^*$ à $-0,68^*$), alors que C (total et par fraction) et N n'ont été corrélés à aucune autre variable (Annexe 20b). L'ACP a indiqué que la principale contribution au premier axe (IR : 42 %) était apportée par Ca, P_{OD} , Mg et pH (et C et CEC dans une moindre mesure) (Figure 3.2c). La position des parcelles le long de cet axe était similaire à celle de la première CP dans l'horizon superficiel (Figure 3.2d). La seconde CP (IR : 20 %) a été là aussi conduite par la texture mais n'a pas isolé MA, MI et AR (projections sur le plan CP1xCP3 en Annexe 21),
- horizon 20-30 cm : C a été positivement corrélé à N ($R_S = +0,67^*$) et CEC ($R_S = +0,69^*$) (Annexe 20c). L'azote, le pH et les bases échangeables

ont augmenté de la même manière que les éléments fins, alors que P_{OD} a diminué. Dans l'ACP, la principale CP (IR : 44 %) a été portée par la texture fine et les pFs sur l'axe positif, par le pH sur l'axe négatif (Annexe 21). Les parcelles MA ont été associées aux pH élevés, les parcelles AR à la texture fine. L'interprétation de la seconde CP a été difficile et n'a apporté aucune information claire,

- horizon 30-40 cm : C a été positivement corrélé à N ($R_s=+0,96^{***}$) et négativement à P_{OD} ($R_s=-0,64^*$). C, N, CEC et pFs ont été positivement liés aux éléments fins ($R_s=+0,92^{***}$ à $+0,96^{***}$), alors que P, C:N, pH

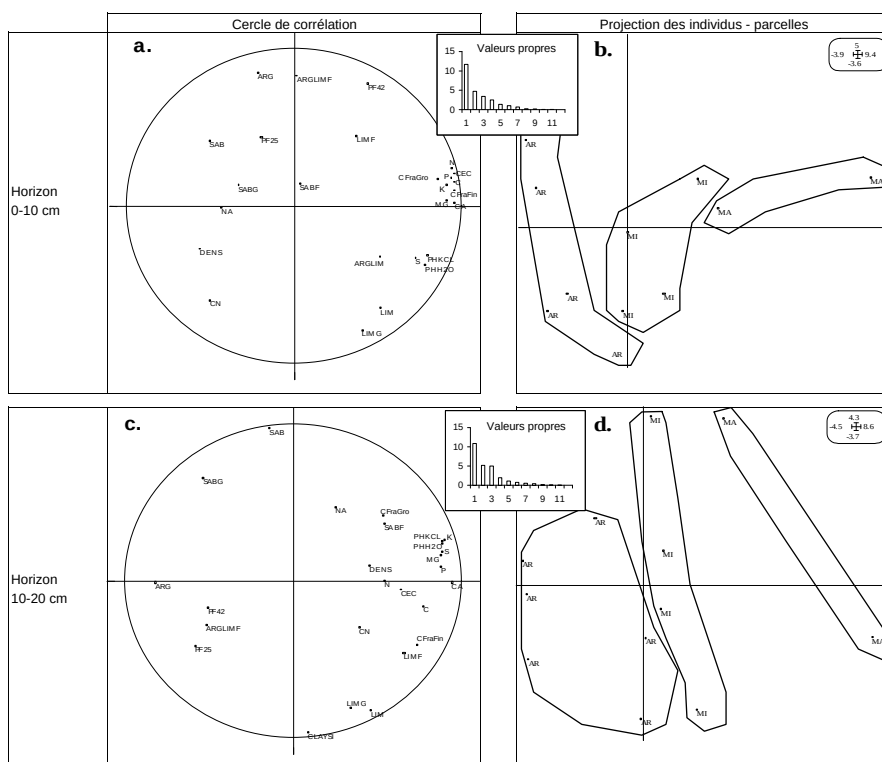


Figure 3.2 Analyse en composantes principales (CP) des propriétés du sol de 12 parcelles cultivées. Cercles de corrélation des variables et projection des individus - parcelles sur le plan CP 1x CP2 : a,b : horizon 0-10 cm ; c,d : horizon 10-20 cm.

Codage des variables : ARG : argile. ARG LIM : argile+limon. ARG LIM F : argile+limon fin. C : carbone. CA : calcium. CFraFin : teneur en carbone de la fraction [0-50] μ m. CFraGro : teneur en carbone de la fraction [50-2000] μ m. CEC : capacité d'échange en cations. CN : rapport C/N. DENS : densité apparente. LIM : limon. LIM G : limon grossier. LIM F : limon fin. K : potassium. MG : magnésium. N : azote. NA : sodium. P : phosphore. PF25 et PF42 : humidité pondérale déterminée pour une succion équivalente à pF2,5 et pF4,2. PHH2O : pH eau. PHKCL : pH KCl. S : taux de saturation. SAB : sable. SAB F : sable fin. SAB G : sable grossier.

Codage des individus - parcelles : AR : culture d'arachide. MI : de mil. MA : de maïs.

Valeurs propres en Annexe 21b.

et S ont montré des tendances opposées aux teneurs en argile+limon fin ($R_S=-0,59^*$ à $-0,64^*$) (Annexe 20d). Les informations dégagées de l'ACP ont été les mêmes que celles détaillées pour l'horizon 20-30 cm (Annexe 21a).

3.3.4. Influence de l'intensité de culture sur le statut organique et les autres propriétés du sol

3.3.4.1. Propriétés chimiques et physiques

La teneur en argile+limon fin a été plus importante dans les champs de brousse que dans les champs de case, particulièrement en dessous de 20 cm de profondeur (26 contre 20 %) (Tableau 3.3a). Cependant, l'intensité de culture n'a pas influencé les propriétés physiques, excepté la densité apparente dans les horizons 10-20 et 30-40 cm. Toutes les propriétés chimiques (y compris C, N et P_{OD}) ont été significativement améliorées dans l'horizon 0-10 cm du sol des champs de case (Tableau 3.3b). Ceci était aussi le cas dans les horizons plus profonds pour P_{OD} , pH, Mg, K et S. La texture a influencé N, pH et Na dans les horizons supérieurs. Pour l'horizon 20-40 cm, l'effet de la texture a été observé sur toutes les propriétés chimiques sauf P_{OD} , Ca, K et S. En conséquence, de plus fortes teneurs de C, N et CEC ont été observées dans les horizons les plus profonds des parcelles de brousse que dans ceux des parcelles de case.

Tableau 3.3 Effet de l'intensité de culture et de la texture (argile+limon fin) sur les propriétés du sol.

a. Propriétés physiques.

Horizon (cm)	Champs de brousse	Champs de case	F		
	m ($\pm$ ET) (n=6)	m ($\pm$ ET) (n=6)	Intens. Cult.	Texture	Total
Teneur en argile + limon fin (%)					
0-10	11,3 $\pm$ 1.2	10,6 $\pm$ 1.0	0,1		
10-20	17,1 $\pm$ 1.3	14,5 $\pm$ 0.9	2,3		
20-30	22,5 $\pm$ 2.5	18,0 $\pm$ 1.2	1,3		
30-40	29,4 $\pm$ 4.3	21,6 $\pm$ 2.3	1,8		
0-40	20,1 $\pm$ 2.0	16,2 $\pm$ 1.0	2,3		
pF2.5 (gH ₂ O 100g ⁻¹ de sol)					
0-10	6,95 $\pm$ 1.02	6,03 $\pm$ 0.44	0,0	7,3 *	3,7
10-20	8,02 $\pm$ 1.13	5,82 $\pm$ 0.59	0,1	15,2 **	8,9 **
20-30	8,80 $\pm$ 1.42	6,28 $\pm$ 0.78	0,1	45,2 ***	26,1 ***
30-40	11,35 $\pm$ 2.03	7,58 $\pm$ 0.99	0,7	134,0 ***	83,6 ***
0-40	8,78 $\pm$ 1.2	6,43 $\pm$ 0.61	2,1	55,9 ***	30,0 ***
pF4.2 (gH ₂ O 100g ⁻¹ de sol)					
0-10	2,70 $\pm$ 0.34	2,82 $\pm$ 0.37	0,5	33,1 ***	16,6 **
10-20	4,03 $\pm$ 0.46	3,03 $\pm$ 0.23	0,1	24,9 ***	16,4 **
20-30	5,35 $\pm$ 0.75	3,78 $\pm$ 0.28	2,1	36,0 ***	24,9 ***
30-40	7,30 $\pm$ 1.22	4,82 $\pm$ 0.66	0,9	184,2 ***	114,6 ***
0-40	4,85 $\pm$ 0.64	3,61 $\pm$ 0.26	0,3	134,0 ***	79,5 ***
Densité apparente (kg dm ⁻³)					
0-10	1,52 $\pm$ 0.01	1,47 $\pm$ 0.02	5,1	2,6	3,6
10-20	1,47 $\pm$ 0.03	1,54 $\pm$ 0.01	5,2 *	0,3	2,7
20-30	1,54 $\pm$ 0.03	1,54 $\pm$ 0.01	0,7	0,1	0,4
30-40	1,45 $\pm$ 0.03	1,56 $\pm$ 0.01	23,9 ***	0,4	13,3 **
0-40	1,50 $\pm$ 0.01	1,53 $\pm$ 0.00	12,2 **	0,2	6,9 *

$p\{H_0 : F_{obs} > F_{th} = 0\} : * < 0,05 ; ** < 0,01 ; *** < 0,001$.

Données en Annexe 22.

Tableau 3.3 (suite) b. Propriétés chimiques

Horizon (cm)	Champs de brousse	Champs de case	F		
	m (±ET) (n=6)	m (±ET) (n=6)	Intens. Cult.	Texture	Total
Carbone (g kg⁻¹)					
0-10	4,49 ±0.19	7,54 ±1.00	31,0 ***	0,9	15,6 **
10-20	3,66 ±0.16	4,17 ±0.50	0,7	0,8	0,5
20-30	3,32 ±0.17	2,75 ±0.19	2,3	1,4	2,8
30-40	3,40 ±0.24	2,62 ±0.15	8,3 *	134,1 ***	103,2 ***
0-40	3,72 ±0.11	4,27 ±0.40	2,5	0,8	1,3
Azote (g kg⁻¹)					
0-10	0,36 ±0.02	0,65 ±0.11	33,6 ***	6,2 *	18,9 ***
10-20	0,31 ±0.02	0,34 ±0.04	0,2	1,0	0,5
20-30	0,30 ±0.02	0,24 ±0.02	1,1	9,5 *	7,2 *
30-40	0,32 ±0.03	0,24 ±0.03	7,3 *	56,2 ***	48,7 ***
0-40	0,32 ±0.02	0,37 ±0.04	2,9	2,0	1,7
Phosphore_{OD} (10⁻³g kg⁻¹)					
0-10	2,52 ±0.21	16,32 ±6.43	22,9 **	0,2	11,4 **
10-20	1,80 ±0.20	11,08 ±4.20	20,4 **	3,4	19,2 ***
20-30	1,73 ±0.21	8,62 ±2.64	19,2 **	0,5	12,2 **
30-40	1,52 ±0.15	8,30 ±2.47	19,4 **	1,5	15,3 **
0-40	1,89 ±0.14	11,08 ±3.82	21,6 **	2,6	18,8 ***
pH (H₂O)					
0-10	5,92 ±0.08	6,52 ±0.06	55,5 ***	10,2 *	34,8 ***
10-20	5,44 ±0.13	6,45 ±0.09	26,4 ***	6,7 *	27,5 ***
20-30	5,23 ±0.17	6,25 ±0.16	58,2 ***	21,5 **	58,5 ***
30-40	5,20 ±0.17	6,07 ±0.20	7,5 *	4,3	9,5 **
0-40	5,45 ±0.13	6,32 ±0.12	49,6 ***	24,2 ***	64,0 ***
pH (KCl)					
0-10	5,15 ±0.12	5,93 ±0.12	18,0 **	4,0	11,7 **
10-20	4,63 ±0.17	5,69 ±0.14	25,2 ***	5,7 *	25,4 ***
20-30	4,44 ±0.17	5,42 ±0.20	10,6 *	10,0 *	15,5 **
30-40	4,34 ±0.17	5,21 ±0.24	5,1	2,7	6,3 *
0-40	4,64 ±0.15	5,56 ±0.17	8,3 *	12,3 **	18,1 ***
Ca (meq 100g⁻¹sol)					
0-10	1,32 ±0.13	2,75 ±0.39	13,2 **	0,0	6,7 *
10-20	1,06 ±0.17	1,84 ±0.27	4,6	1,3	5,0 *
20-30	0,99 ±0.13	1,35 ±0.16	3,2	0,7	2,8
30-40	1,03 ±0.14	1,20 ±0.15	0,2	0,3	0,2
0-40	1,10 ±0.13	1,79 ±0.22	4,7	1,1	4,8 *
Mg (meq 100g⁻¹sol)					
0-10	0,36 ±0.03	1,03 ±0.13	28,1 ***	0,1	14,1 **
10-20	0,32 ±0.04	0,69 ±0.09	26,8 ***	0,5	14,9 **
20-30	0,35 ±0.04	0,63 ±0.06	47,0 ***	4,7	23,5 ***
30-40	0,40 ±0.05	0,66 ±0.05	80,0 ***	12,8 **	40,0 ***
0-40	0,36 ±0.03	0,75 ±0.06	45,7 ***	4,6	23,2 ***
Na (meq 100g⁻¹sol)					
0-10	0,01 ±0.01	0,00 ±0.00	2,1	0,6	1,5
10-20	0,00 ±0.00	0,00 ±0.00	2,2	11,6 **	5,8 *
20-30	0,01 ±0.00	0,00 ±0.00	6,5 *	2,3	3,5
30-40	0,01 ±0.01	0,01 ±0.00	0,0	0,2	0,1
0-40	0,01 ±0.00	0,00 ±0.00	4,1	1,9	2,2
K (meq 100g⁻¹sol)					
0-10	0,04 ±0.00	0,25 ±0.05	28,5 ***	0,1	14,2 **
10-20	0,04 ±0.00	0,21 ±0.03	21,6 **	0,1	14,0 **
20-30	0,03 ±0.00	0,22 ±0.04	25,5 ***	0,1	14,0 **
30-40	0,03 ±0.00	0,24 ±0.04	28,2 ***	0,6	15,1 **
0-40	0,04 ±0.00	0,23 ±0.03	25,5 ***	0,3	14,5 **
CEC (meq 100g⁻¹sol)					
0-10	2,31 ±0.10	3,69 ±0.48	17,2 **	2,1	9,3 **
10-20	2,49 ±0.08	2,78 ±0.29	1,0	1,4	0,9
20-30	2,70 ±0.12	2,48 ±0.14	0,0	9,3 *	5,2 *
30-40	2,95 ±0.36	2,65 ±0.26	5,3 *	107,7 ***	55,6 ***
0-40	2,61 ±0.13	2,90 ±0.22	5,4 *	7,8 *	4,7 *
Taux de saturation (%)					
0-10	74,5 ±5.2	109,5 ±3.8	33,6 ***	2,4	18,8 ***
10-20	57,3 ±7.4	98,2 ±5.0	9,5 *	3,1	10,6 **
20-30	51,5 ±4.9	89,3 ±6.8	28,8 ***	4,3	22,9 ***
30-40	54,8 ±9.9	81,3 ±5.7	3,7	3,3	5,6 *
0-40	59,5 ±6.3	94,6 ±4.1	16,5 **	7,1 *	20,3 ***

3.3.4.2. Qualité de la MOS

Le taux de recouvrement du carbone après fractionnement a atteint 97 % variant cependant de 70 à 117 % (Tableau 3.4a,b). Ces variations pourraient être dues aux techniques différentes de préparation des échantillons fractionnés et non fractionnés (NF), aux pertes en carbone solubles dans l'eau et à la méthode d'analyse.

Tableau 3.4 Qualité de la MOS évaluée par le fractionnement de la MOS dans les horizons du sol des champs de mil, maïs et riz.

a. horizon 0-10 cm									
Parcelle	Fraction 0-50 µm			C/N	Fraction 50-2000 µm			C/N	Taux de recouvrement du fractionnement ((1)+(2))/C ₁
	Poids (g 100 g ⁻¹ sol)	Teneur en C en g kg ⁻¹ de fraction	sol (1)		Poids (g 100 g ⁻¹ sol)	Teneur en C en g kg ⁻¹ de fraction	sol (2)		
AR01	19,4	14,38	2,79	12,1	80,6	0,92	0,74	37,8	90
AR02	18,7	16,54	3,09	12,2	81,3	1,25	1,02	34,9	93
AR03	25,6	14,43	3,70	13,4	74,4	1,38	1,03	23,8	93
AR04	19,0	18,10	3,45	13,6	81,0	0,85	0,69	28,2	82
AR05	18,9	15,18	2,87	12,1	81,1	0,88	0,72	26,5	85
AR06	23,2	12,73	2,95	12,5	76,8	1,35	1,04	25,2	93
MI01	17,1	30,95	5,29	13,1	82,9	2,31	1,92	28,8	103
MI02	19,7	17,92	3,53	13,4	80,3	1,26	1,01	16,4	87
MI03	19,2	22,16	4,24	13,9	80,8	3,15	2,54	27,0	103
MI04	28,7	17,11	4,91	14,3	71,3	1,55	1,11	25,9	101
MA01	17,3	29,03	5,02	11,8	82,7	5,28	4,36	22,7	110
MA02	25,7	29,94	7,70	12,0	74,3	8,00	5,95	26,5	114
RI01	77,0	20,51	15,80	12,9	23,0	12,28	2,82	26,0	128
RI02	82,5	25,47	21,01	12,8	17,5	16,64	2,91	22,1	125

b. horizon 10-20 cm									
Parcelle	Fraction 0-50 µm			C/N	Fraction 50-2000 µm			C/N	Taux de recouvrement du fractionnement ((1)+(2))/C ₁
	Poids (g 100 g ⁻¹ sol)	Teneur en C en g kg ⁻¹ de fraction	sol (1)		Poids (g 100 g ⁻¹ sol)	Teneur en C en g kg ⁻¹ de fraction	sol (2)		
AR01	25,2	9,23	2,32	10,8	74,8	<0,2	<0,15		
AR02	26,0	10,30	2,68	12,5	74,0	1,29	0,96	48,0	110
AR03	27,1	10,88	2,95	12,7	72,9	1,11	0,81	31,7	88
AR04	23,8	11,65	2,77	12,4	76,2	0,31	0,24	26,2	80
AR05	27,8	9,07	2,52	9,7	72,2	0,58	0,42	44,3	78
AR06	30,6	9,66	2,96	13,1	69,4	0,58	0,40	26,0	91
MI01	22,5	13,39	3,01	13,2	77,5	1,08	0,84	42,6	109
MI02	22,5	9,86	2,22	15,6	77,5	0,41	0,32	12,9	70
MI03	26,9	10,71	2,88	11,0	73,1	0,62	0,45	26,6	88
MI04	31,8	8,80	2,80	13,2	68,2	0,47	0,32	24,9	84
MA01	25,0	9,51	2,38	11,0	75,0	1,02	0,76	32,4	84
MA02	33,1	14,66	4,86	14,2	66,9	1,84	1,23	32,2	91
RI01	74,3	15,12	11,23	14,9	25,7	3,66	0,94	41,0	117
RI02	85,8	21,43	18,39	11,7	14,2	6,63	0,94	22,4	117

Taux de recouvrement du fractionnement calculé par le rapport [(1) + (2)] : [taux de carbone du sol non fractionné (voir Tableau 3.2a)].

La masse de la fraction [0-50] µm a varié de 17 à 33 % dans les horizons 0-10 et 10-20 cm des sols de plateau et de glacis, alors qu'elle s'élevait à 80 % dans les sols de bas-fond. Dans l'horizon 0-10 cm, la concentration du carbone dans la fraction fine a atteint 20,3 g kg⁻¹, la teneur en C, 6,2 g kg⁻¹. Dans l'horizon 10-20 cm, ces valeurs étaient respectivement de 11,7 et 4,6 g kg⁻¹. La concentration en carbone était beaucoup plus faible dans la fraction [50-2000] µm, allant de 4,1 (0-10 cm) à 1,5 (10-20 cm) g kg⁻¹, avec des différences importantes entre les sols sableux et argileux. Il en a résulté une faible contribution de la fraction grossière au C total du sol (2 des 7,6 g kg⁻¹ et 0,7 des 5,3 g kg⁻¹ dans les horizons respectifs 0-10 et 10-20 cm) comparée à celle de la fraction fine.

Pour une parcelle donnée, le rapport C/N du sol NF est resté constant dans l'ensemble du profil et a atteint 12 (Tableau 3.2d). Les valeurs extrêmes (9,3-16,6) ont été trouvées dans les champs de riz. Le C/N a varié fortement entre les fractions, étant de 12,7 dans la fraction fine et s'élevant à 29 dans la fraction grossière (Tableau 3.4ab).

Tableau 3.5 Effet de l'intensité de culture et de la texture (argile +limon fin) sur la qualité de la MOS évaluée par la concentration et la teneur en carbone et le rapport C/N dans le sol non fractionné et dans les fractions fines et grossières du sol.

a.

Horizon (cm)	Champs de brousse m (±ET)	Champs de case m (±ET)	F		
			Intens. Cult.	Texture	Total
C/N du sol non fractionné					
0-10	12,7 ±0.5	12,0 ±0.5	2,0	10,9 **	6,1 *
10-20	11,9 ±0.9	12,4 ±0.4	0,1	0,1	0,2
20-30	11,3 ±0.3	11,6 ±1.1	0,6	4,5	2,2
30-40	10,8 ±0.4	11,2 ±0.6	0,0	1,9	1,1
0-40	11,7 ±0.4	11,7 ±0.4	0,7	5,0	2,5

b.

Horizon (cm)	Fraction (µm)	Champs de brousse m (±ET)	Champs de case m (±ET)	F		
				Intens. Cult.	Texture	Total
Concentration en carbone (g kg ⁻¹ fraction)						
0-10	0-50	15,23 ±0.77	24,52 ±2.55	13,6 **	0,3	7,1 *
	50-2000	1,11 ±0.10	3,59 ±1.06	20,7 **	4,2	11,8 **
10-20	0-50	10,13 ±0.41	11,16 ±0.96	0,1	0,1	0,2
	50-2000	0,66 ±0.19	0,91 ±0.22	0,7	0,5	0,4
Teneur en carbone (g kg ⁻¹ sol)						
0-10	0-50	3,14 ±0.15	5,12 ±0.58	23,3 ***	1,9	12,2 **
	50-2000	0,87 ±0.07	2,82 ±0.80	13,1 **	2,9	7,6 *
10-20	0-50	2,70 ±0.10	3,02 ±0.39	0,2	0,0	0,1
	50-2000	0,48 ±0.14	0,65 ±0.15	0,9	0,7	0,6
C/N dans les fractions						
0-10	0-50	12,7 ±0.3	13,1 ±0.4	0,2	0,0	0,1
	50-2000	29,4 ±2.3	24,5 ±1.8	0,8	0,1	0,5
10-20	0-50	11,9 ±0.5	13,0 ±0.7	1,5	0,1	1,1
	50-2000	35,2 ±4.6	28,6 ±4.0	0,1	0,7	0,7

$p\{H_0 : F_{obs} > F_{th} = 0\} : * < 0,05 ; ** < 0,01 ; *** < 0,001$.

Voir les données dans le Tableau 3.2 et le Tableau 3.4.

La teneur en COS total était plus élevée dans les champs de case que dans les champs de brousse, les fractions fines et grossières contribuant de façon identique à ce gain (Tableau 3.3b ; Tableau 3.5b). Cependant, les valeurs de l'accroissement relatif de C ont différé selon les fractions. La concentration en C s'est améliorée de 40 % entre la brousse et les champs de case dans la fraction [0-50] µm fraction, de 150 % dans la fraction grossière. L'évolution différentielle a été particulièrement remarquable dans deux parcelles de maïs, dans lesquelles les accroissements relatifs ont été de 70 et 130 % dans chacune des fractions fines et grossières ; dans ces parcelles, la contribution de la fraction grossière à l'augmentation du carbone total du sol (comparé aux autres parcelles -mil et arachide-) a ainsi été plus important que celle de la fraction fine. Des tests statistiques sur le statut du C dans chaque fraction ont montré des résultats très similaires à ceux obtenus sur les sols NF, c'est à dire des accroissements significatifs de la concentration de C (Tableau 3.5b). Les rapports C/N des sols fractionnés et NF ont été relativement indépendants de l'intensité de culture.

3.3.4.3. Les stocks de carbone, d'azote et de phosphore assimilable du sol

Les différences moyennes de stocks de C (exprimés en profondeur équivalente de sol) entre les champs de case (mil et maïs) et les champs de brousse ont été de 60 % dans l'horizon 0-10 cm ($11,1 \pm 1,4$ contre $6,8 \pm 0,3$ t ha⁻¹) mais seulement 16 % dans l'horizon 0-40 cm ($25,8 \pm 2,4$ contre $22,3 \pm 0,7$ t ha⁻¹) (Tableau 3.6). Des différences similaires ont été trouvées pour les stocks d'azote : ils ont été de 950 ± 150 dans les champs de case contre 540 ± 30 kg ha⁻¹ dans les champs de brousse pour l'horizon 0-10 cm , et 2210 ± 220 contre 1920 ± 110 kg ha⁻¹ pour l'horizon 0-40 cm. En considérant les valeurs exprimées en masse équivalente, des hausses significatives sur les valeurs cumulées des stocks de C et N dans l'auréole de case n'ont pu être mises en évidence que jusqu'à 20 cm de profondeur (Tableau 3.6a). L'accroissement des stocks de carbone a été bien réparti entre les deux fractions dans les horizons 0-10 et 0-20 cm (la fraction grossière y a été responsable de respectivement 54 et 52 % de cette hausse) (Tableau 3.6b). Le stock de P_{OD} du sol a montré des augmentations plus radicales. Les stocks de P_{OD} pour les champs de case ont été plus de six fois plus grands que ceux des champs de brousse pour l'horizon 0-10 cm (à profondeur équivalente: $23,7 \pm 9,2$ contre $3,8 \pm 0,3$ kg ha⁻¹). Ce rapport a été légèrement plus faible pour l'horizon 0-40 cm ($67,0 \pm 23,0$ contre $11,3 \pm 0,8$ kg ha⁻¹).

Les parcelles de maïs – qui recevaient les taux de fumure ou d'ordures ménagères les plus élevés - ont contribué pour une part importante aux différences entre champs de brousse et champs de case : leurs stocks de C, N et P_{OD} ont été respectivement de 1,3, 1,4 et 3,3 plus importants que ceux des cultures de mil.

Tableau 3.6 Effet de l'intensité de culture et de la texture (argile+limon fin sur le stock de carbone, d'azote et de phosphore assimilable du sol (calculé à masse de sol équivalente).

a. sol non fractionné						
Horizon (cm)	Champs de brousse		Champs de case		F	
	m (±ET) (n=6)		m (±ET) (n=6)		Intens. Cult.	Texture
Stock de carbone (t ha ⁻¹)						
0-10	6,9 ±0,3		11,5 ±1,5		31,0 ***	0,9
0-20	12,5 ±0,5		17,7 ±2,2		18,7 **	0,3
0-30	17,5 ±0,6		21,8 ±2,4		5,7 *	0,1
0-40	22,6 ±0,7		25,7 ±2,3		3,1	0,9
Stock d'azote (kg ha ⁻¹)						
0-10	546 ±26		983 ±164		30,0 ***	4,8
0-20	1026 ±52		1486 ±216		13,3 **	3,4
0-30	1471 ±78		1847 ±225		5,8 *	1,8
0-40	1955 ±117		2209 ±221		2,8	2,8
Stock de phosphore _{OD} (kg ha ⁻¹)						
0-10	3,9 ±0,3		24,9 ±9,8		22,9 **	0,2
0-20	6,6 ±0,5		41,5 ±16,0		19,1 **	0,2
0-30	9,2 ±0,7		54,3 ±19,8		23,7 ***	3,0
0-40	11,5 ±0,9		66,8 ±22,9		21,2 **	2,4
b. Fractions du sol						
Horizon (cm)	Champs de brousse		Champs de case		F	
	m (±ET)		m (±ET)		Intens. Cult.	Texture
Stock de carbone dans les fractions (t ha ⁻¹)						
0-10	0-50	5,40 ±0,28	7,51 ±0,63		13,8 **	0,2
	50-2000	1,48 ±0,10	3,97 ±1,01		10,0 *	0,0
0-20	0-50	10,19 ±0,44	12,73 ±1,15		7,0 *	1,8
						3,7

La parcelle de référence pour les calculs à masse de sol équivalente a été AR03.
 $p\{H_0 : F_{obs} > F_{th} = 0\} : * < 0,05 ; ** < 0,01 ; *** < 0,001$.
 Données en Annexe 23 et Annexe 24.

3.3.5. Influence de la gestion des apports organiques sur le statut organique du sol

La seconde série d'Anovas plus précises testant l'influence de cinq pratiques organiques à l'échelle de la sous-parcelle a apporté des différences significatives entre les traitements quant aux propriétés du sol, particulièrement concernant la densité apparente du sol (Tableau 3.7). Dans l'horizon 0-10 cm, les traitements pouvaient être classés ainsi, selon la teneur en carbone et les tests T sur les moyennes des moindres carrés : CasParcOrd ($10,26 \pm 1,05 \text{ g kg}^{-1}$) > Cas = CasParc ($6,27 \pm 0,63 \text{ g kg}^{-1}$) > BrJa = BrParc ($4,26 \pm 0,41 \text{ g kg}^{-1}$). Dans l'horizon 10-20 cm, CasParcOrd a eu une teneur en C plus élevée alors que les autres traitements ont montré des valeurs similaires. L'évolution de la teneur moyenne en carbone est devenue moins claire en dessous de cette profondeur, du fait de teneurs différentes en éléments fins entre les traitements. En fait, la contribution de la gestion à la variabilité du COS a été significative pour les horizons 0-10, 10-30 et 0-40 cm seulement. Le stock de C et la teneur en C ont montré des tendances similaires. Dans l'horizon 0-10 cm, les pratiques les plus efficaces pour mettre en réserve le carbone organique ont été : CasParcOrd ($15,4 \pm 1,6 \text{ tC ha}^{-1}$)

Tableau 3.7 Effet de la gestion des apports organiques sur les propriétés physiques et le statut organique du sol.

Profondeur (cm)	BrJa m (±ES) (n=10)	BrParc m (±ES) (n=8)	Cas m (±ES) (n=6)	CasParc m (±ES) (n=8)	CasParcOrd m (±ES) (n=8)	F		
						Gestion	Texture	Total
Fraction [0-50]µm (g 100g ⁻¹ sol)								
0-10	21,6 ±1,1	21,0 ±1,5	18,0 ±0,7	23,9 ±2,4	21,5 ±2,2	1,6		
10-20	25,5 ±0,5 ^a	29,2 ±1,0 ^a	22,5 ±0,6 ^b	29,3 ±1,8 ^a	29,1 ±3,4 ^a	5,1 **		
20-30	28,9 ±1,2	31,9 ±1,5	26,2 ±1,6	31,2 ±2,4	27,7 ±3,2	2,0		
30-40	33,6 ±2,6	38,3 ±2,0	33,0 ±2,2	37,7 ±3,0	28,3 ±2,5	2,6 *		
0-40	27,4 ±1,1 ^{ab}	30,1 ±0,8 ^a	24,9 ±0,8 ^b	30,6 ±1,9 ^{ab}	26,7 ±2,6 ^{ab}	2,7 *		
Densité apparente (kg dm ⁻³ sol)								
0-10	1,53 ±0,01 ^a	1,52 ±0,01 ^{ab}	1,54 ±0,01 ^b	1,44 ±0,01 ^c	1,45 ±0,03 ^a	4,3 **	1,0	3,7 **
10-20	1,44 ±0,03 ^c	1,51 ±0,01 ^{ab}	1,51 ±0,02 ^{ab}	1,56 ±0,01 ^a	1,54 ±0,02 ^{bc}	4,5 **	1,5	3,8 **
20-30	1,59 ±0,03 ^a	1,50 ±0,01 ^a	1,52 ±0,01 ^a	1,56 ±0,01 ^a	1,55 ±0,02 ^b	4,2 **	0,8	3,5 *
30-40	1,42 ±0,04 ^b	1,49 ±0,01 ^a	1,54 ±0,00 ^a	1,57 ±0,01 ^a	1,57 ±0,02 ^b	8,9 ***	0,7	7,4 ***
0-40	1,49 ±0,01 ^b	1,51 ±0,00 ^a	1,53 ±0,01 ^a	1,53 ±0,01 ^a	1,53 ±0,02 ^b	3,6 *	1,2	2,9 *
Teneur en carbone (g kg ⁻¹ sol)								
0-10	4,92 ±0,15 ^c	4,26 ±0,41 ^c	6,39 ±0,62 ^b	6,27 ±0,63 ^b	10,26 ±1,05 ^a	17,0 ***	2,1	13,6 ***
10-20	3,87 ±0,18 ^a	3,73 ±0,19 ^a	3,55 ±0,33 ^a	3,74 ±0,33 ^a	5,20 ±0,73 ^a	1,1	0,8	1,2
20-30	3,39 ±0,12 ^a	3,29 ±0,33 ^{ab}	2,73 ±0,09 ^{bc}	2,53 ±0,35 ^c	2,97 ±0,34 ^{ab}	5,5 **	20,3 ***	8,5 ***
30-40	3,33 ±0,27 ^a	3,08 ±0,22 ^{ab}	2,74 ±0,25 ^{ab}	2,88 ±0,26 ^{ab}	2,36 ±0,13 ^b	2,1	13,0 **	5,5 ***
0-40	3,87 ±0,09 ^b	3,59 ±0,20 ^b	3,85 ±0,17 ^{ab}	3,86 ±0,33 ^b	5,20 ±0,51 ^a	4,8 **	4,9 *	4,0 **
Stock de carbone en équivalent de masse de sol (t ha ⁻¹)								
0-10	7,5 ±0,2 ^c	6,5 ±0,6 ^c	9,7 ±0,9 ^b	9,4 ±0,9 ^b	15,4 ±1,6 ^a	17,0 ***	2,4	13,7 ***
0-20	13,4 ±0,5 ^{bc}	12,1 ±0,8 ^c	15,2 ±1 ^{ab}	15,0 ±1,3 ^{bc}	23,1 ±2,5 ^a	9,1 ***	3,2	7,7 ***
0-30	18,3 ±0,4 ^{bc}	16,9 ±1,1 ^c	19,1 ±0,9 ^{ab}	18,6 ±1,6 ^{bc}	27,2 ±2,8 ^a	5,7 **	4,3 *	4,7 **
0-40	23,0 ±0,5 ^{ab}	21,3 ±1,2 ^c	23,0 ±1 ^{ab}	22,7 ±1,9 ^{bc}	30,6 ±2,9 ^a	4,2 **	5,1 *	3,5 *

Voir description des traitements dans la Figure 3.1. Deux valeurs moyennes avec des lettres différentes varient significativement dans leur moyenne des moindres carrés ($\alpha=0,05$; test T apparié). $p\{H_0 : F_{obs} > F_{th} = 0\} : * < 0,05$; ** < 0,01 ; *** < 0,001.

La texture est identifiée par la masse relative de sol de la fraction [0-50] µm sans destruction de la MOS.

Le plateau de référence pour les calculs à masse équivalente de sol a été choisi parmi l'un des plateaux du champ AR03.

Données en Annexe 25.

> Cas = CasParc ($6,27 \pm 0,63 \text{ tC ha}^{-1}$) > BrJa = BrParc ($4,26 \pm 0,41 \text{ tC ha}^{-1}$). En raison d'une accumulation différentielle d'argile au fond du profil de sol, la classification des cinq traitements selon les stocks cumulés de carbone jusqu'aux horizons les plus profonds, a été difficile. Par exemple, CasParcOrd

a enregistré les stocks de C plus importants jusqu'à une profondeur de 40 cm ; mais dans l'ensemble du profil, les traitements Cas et BrJa se sont classés second et troisième en terme de stocks maximaux de carbone.

Les flux de C, N et P liés aux apports organiques ont été calculés pour les champs Cas, CasParc et CasParcOrd (Figure 3.3). L'apport en C a été estimé à $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ pour le traitement Com en 1997. Il a atteint $5,3 \text{ t ha}^{-1}$ dans les parcelles fumées (traitement CasParc), avec des restitutions importantes des résidus de culture non pâturés au sol. Cette valeur était proche des résultats du traitement CasParcOrd ($6,3 \text{ t ha}^{-1}$), qui a bénéficié de la fumure et d'ordures ménagères. Les plus grandes différences ont été observées parmi les trois traitements en considérant les apports en azote et en phosphore. Ces apports ont été de $24,2 \text{ kgN ha}^{-1}$ pour le traitement Com, soit moins du cinquième de la valeur pour le traitement CasParc. L'apport en N pour le traitement CasParcOrd a été environ le double de celui pour le traitement CasParc. Les mêmes tendances ont été enregistrées pour le P_t .

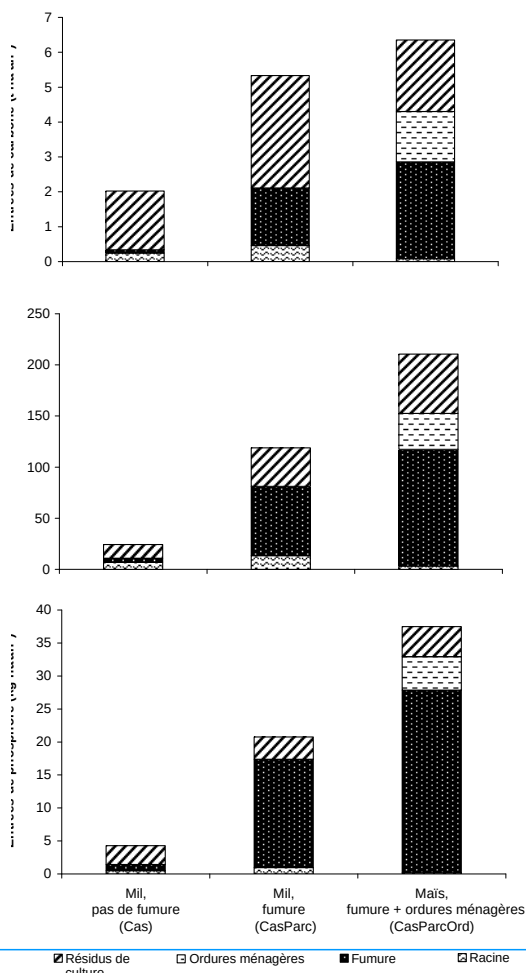


Figure 3.3 Entrées de carbone, d'azote et de phosphore dans les champs de case selon trois modes de gestion organique de la fertilité.

Hypothèse : (1) composition chimique des déjections fraîches ($\text{g } 100\text{g}^{-1} \text{ MO sèche}$) : C : 35 (de Ridder and van Keulen, 1990) ; N : 1,44 ; Pt : 0,35 (Hamon, dans Coulomb et al., 1980). (2) 80 % des résidus de culture sont restitués au sol par piétinement par le bétail.

Note : l'exudation racinaire de carbone et la fixation biologique d'azote ne sont pas incluses.

Données en Annexe 26.

Par conséquent, les rapports C/N des apports organiques ont été respectivement de 84, 45 et 30 dans les parcelles Com, CasParc et CasParcOrd ; les rapports C/P_t ont été respectivement de 474, 257 et 169.

3.4. Discussion

3.4.1. La biomasse des cultures, un outil à usages multiples pour l'agriculture

Dans cette région, les grains produits dans les cultures sont utilisés pour les besoins alimentaires (céréales) ou commercialisés (arachide). En raison de la disponibilité en bois et du déficit en main d'œuvre, les résidus de culture sont laissés sur place. Ce n'est pas le cas pour l'arachide, dont les fanes sont stockées à la ferme et données en complémentation aux veaux, aux bœufs et aux petits ruminants. Les champs sont laissés à la vaine pâture après la récolte. La valeur alimentaire des pailles varie selon l'espèce cultivée. Par exemple, dans notre étude, le mil produit quatre fois plus de biomasse que l'arachide, mais l'arachide, qui est une légumineuse, stocke davantage d'azote. La valeur alimentaire des mauvaises herbes est plus difficile à estimer, puisqu'elle dépend de la composition des espèces adventices, et qu'elle n'a fait l'objet que d'un petit nombre d'études. Cependant, la teneur plus élevée en N et P_t des mauvaises herbes que des pailles (sauf pour l'arachide), les observations locales sur le comportement du bétail au pâturage pendant les premiers jours de divagation sur les parcelles (Chapitre 5), et les résultats de Lamers *et al.* (1996) indiquent tous une valeur alimentaire meilleure pour les mauvaises herbes que pour le mil qui leur est associé. Les moyens de mieux utiliser les adventices en complémentation pour les animaux devraient donc être étudiés, en les associant à des fourrages de moins bonne valeur comme les résidus de culture.

La vaine pâture conduit à une consommation incomplète des résidus de culture, en raison du piétinement des mauvaises herbes et des pailles de culture et de la souillure par l'urine. Ainsi, seulement 20 à 50 % de la biomasse laissée sur place serait prélevée par le bétail (Quilfen et Milleville, 1983 ; ce travail, Chapitre 5). La vaine pâture économise du travail, non du fourrage, mais il faut se rappeler que la biomasse non consommée n'est pas perdue pour l'écosystème (voir ci-dessous).

Bien que souvent considérés comme la clé d'une agriculture durable dans les savanes (Pieri, 1989 ; Brown *et al.*, 1994), les études publiées sur la biomasse souterraine des cultures restent rares. Pour les sols sableux de la zone sahélienne, Chopart (1980) a estimé la biomasse racinaire de l'arachide et du mil, au moment de la récolte, à 0,27 et 0,28 t ha⁻¹ ; cela ne représente que 7 % et 24 % de nos résultats, mais ceux-ci incluent la

biomasse racinaire des adventices ligneuses et herbacées. Charreau et Nicou (1971) ont donné pour le mil et le maïs des biomasses racinaires plus importantes (1,5 et 2,0 t ha⁻¹) que nos propres estimations, et des valeurs similaires pour l'arachide. Les rapports tige/racine du mil et de l'arachide relevés dans notre étude étaient en accord avec leurs résultats. Cependant, la pertinence de telles comparaisons est limitée, car l'allocation de carbone à la biomasse souterraine par la plante est influencée par beaucoup de facteurs comme le sol, le climat, les maladies, les interactions avec les systèmes racinaires adventices et les techniques d'échantillonnage (Mordelet, 1993). La biomasse racinaire dans les écosystèmes villageois de succession post-culturelle s'élève à plus de 18,3 et 34,8 t ha⁻¹ dans les jeunes (<10 ans) et les vieilles jachères (Chapitre 1), ce qui est respectivement 4,9 fois (jachères jeunes) et 9,3 fois (jachères âgées) plus important que dans les cultures.

3.4.2. Gestion des terres et propriétés du sol

Nos résultats généraux sont plus ou moins en accord avec ceux de Prudencio (1993) au Burkina Faso, qui a trouvé que seuls les champs très proches des cases montraient un meilleur statut organique du sol en comparaison de ceux des champs de brousse. Lors d'une enquête nationale conduite à travers la Gambie, Peters et Schulte (1994) rapportent une amélioration de la teneur organique du sol dans les champs de maïs seulement, c'est à dire ceux qui jouxtent les cases. Au contraire, les teneurs en carbone et en azote ne sont pas significativement différentes entre les champs de mil et d'arachide, qui n'ont reçu que peu ou pas de fumure ; dans notre étude, la teneur en carbone a été significativement plus élevée dans les champs de mil de l'auréole de case que dans les champs d'arachide de l'auréole de brousse, et ce pour l'horizon 0-10 cm seulement.

A un instant donné, le taux de carbone résulte d'un équilibre entre les apports (résidus, engrais, déchets) et les pertes organiques (récolte, pâturage, feu, minéralisation), conduisant ainsi au concept de valeur seuil minimale des entrées en carbone pour assurer le maintien de la teneur en COS (de Ridder and van Keulen, 1990). Cette valeur dépend des conditions édaphiques et climatiques locales qui contrôlent les effets de l'érosion et du lessivage (Brouwer et Powell, 1998), et les taux de renouvellement de la MOS (Feller, 1993).

3.4.2.1. Influence des propriétés intrinsèques du sol

Dans notre étude, le contrôle de la teneur en carbone par la fraction limon+argile, bien établi dans les sols tropicaux, a été vérifié dans les horizons inférieurs à 20 cm. La gestion des terres a clairement été la principale source de variation des propriétés chimiques du sol dans l'horizon 0-20 cm. Un zonage vertical de l'influence de la texture et de la gestion a aussi été mis en évidence sous culture semi-permanente (voir Chapitre 2). D'un point de vue méthodologique, de nouvelles études sur l'influence de

la gestion des terres sur le statut organique de sols similaires d'Afrique de l'Ouest, pourraient être limitées à l'analyse de l'horizon 0-20 cm.

3.4.2.2. Statut chimique du sol des champs cultivés dans les auréoles de case et de brousse

L'amélioration des propriétés chimiques des sols de l'auréole de case, comparés à ceux de l'auréole de brousse, résulte essentiellement de volumes différents d'apports organiques. Ces apports améliorent les propriétés chimiques du sol de trois façons : (1) ils sont une source directe de carbone et de nutriments, (2) ils contribuent pour une bonne part à l'augmentation de la CEC, (3) ils stimulent les mécanismes biologiques (Feller, 1995a ; Asadu *et al.*, 1997). Par exemple, la disponibilité accrue d'un élément tel que le phosphore peut résulter aussi bien d'une augmentation du stock de P_t –ce qui est probablement le cas ici, au moins dans les champs les plus fumés ; mais des mesures supplémentaires de P_t sont nécessaires- qu'une restitution de P non assimilable jusque là adsorbé sur l'argile et restitué par substitution avec des composés organiques ou par modification du pH du sol (Jones and Wild, 1975 ; Feller, 1995a).

La manière dont la MOS améliore les propriétés du sol dépend de sa localisation dans les fractions du sol (Feller *et al.*, 2000). Dans les sols tropicaux à argile de type 1/1, la MOS stable complexée avec l'argile et les limons de la fraction [0-50] μm contrôle la capacité de stockage et d'échange en nutriments. Nos résultats concordent avec ces faits, puisque les variables pH_{KCl} , Ca, Mg, K, CEC et S ont été plus fortement corrélées à la teneur en carbone de la fraction [0-50] μm qu'à celle de la fraction [50-2000] μm . Le faible rapport C/N de la fraction fine témoigne aussi du fait que la matière organique de cette fraction résulte de complexes organo-minéraux. Le carbone stocké dans la fraction [50-2000] μm est généralement reconnu pour avoir un taux de renouvellement plus rapide et pour assumer des fonctions biologiques (apport d'énergie et de nutriments à la microfaune et à la microflore du sol). Nos résultats s'accordent avec les résultats généraux, puisque les composées organiques isolés dans la fraction [50-2000] μm ont montré un rapport C/N élevé (29), indiquant un apport de débris végétaux fraîchement incorporés, susceptibles d'être oxydés par le catabolisme microbiologique.

Pour les champs de case, la contribution de ces fractions à l'accroissement de la MOS a été équivalente (excepté dans les champs de maïs). Cependant, dans les sols sableux tropicaux, les variations de la teneur en carbone dues à la gestion des terres ont généralement lieu dans la fraction grossière (Feller and Beare, 1997). La date de l'échantillonnage choisie pourrait expliquer une telle différence entre nos résultats et ceux des autres études. Les prélèvements ont été réalisés en fin de saison des pluies, alors qu'une minéralisation saisonnière importante de la MOS est susceptible de se produire, essentiellement dans les fractions ayant un fort taux de renouvellement.

3.4.2.3. Qualité des apports organiques

La teneur en COS dépend non seulement du climat local et des conditions pédologiques mais aussi du volume et de la qualité chimique de la matière organique apportée au sol. L'effet de la fumure seule sur le statut du carbone dans le sol est généralement nul ou faible (Schleich, 1986 ; Diouf, 1990), ou modéré, et limité au sous-sol (Powell, 1986 ; Bacyé, 1993 ; Feller, 1995a). Mais une information insuffisante sur l'intensité de la fumure rend les comparaisons avec d'autres travaux assez difficiles.

Dans notre étude, deux traitements (Cas et CasParc) recevant des quantités de carbone différentes avaient des stocks de COS similaires, alors que deux traitements (CasParc et CasParcOrd) recevant les mêmes quantités de carbone affichaient des stocks de COS différents (Figure 3.1, Figure 3.3 et Tableau 3.7). Les rapports C/N et C/P différents de ces amendements organiques pourraient expliquer ces résultats, car ces rapports jouent un rôle clé dans la décomposition des résidus organiques.

En conditions plus sèches, Feller *et al.* (1981 ; 1987) ont déjà montré que des additions d'azote minéral aux amendements de paille et de compost stabilisent significativement la teneur en COS. Des taux d'azote plus élevés dans les apports organiques dissuadent la microflore de minéraliser la MOS, qui a généralement une teneur plus forte en N que la biomasse végétale fraîche (Pieri, 1989). Les propriétés biochimiques du carbone structural (rapport "neutral detergent fibre : cellular content" comme le conseille Feller, 1979) ou la teneur en enzymes (Mathur, 1982) pourraient aussi jouer un rôle dans les effets variés de la paille, des racines, des ordures ménagères et de la fumure animale, sur la teneur en COS.

3.4.3. Une approche à l'échelle du village : complémentarité agroécologique des systèmes de culture continue et semi-permanente

Sur notre site d'étude, la culture permanente et les pratiques associées d'intensification ont des effets plus importants que la jachère sur l'amélioration du statut chimique des sols (voir Chapitre 2). Les différences sont particulièrement remarquables pour les variables P_{OD} , Ca, K, CEC, S et pH. Cependant, l'amélioration de ces propriétés est limitée essentiellement à l'horizon 0-10 cm, excepté pour P_{OD} . D'un autre côté, le maintien des propriétés du sol dans l'auréole de case repose surtout sur la conservation des auréoles de brousse et de savane. En effet, ces zones de pâturage accueillent le bétail durant la saison humide, où celui-ci se nourrit, évitant ainsi tout dommage aux cultures. Et durant la saison sèche, elles fournissent les agriculteurs en fumier puisque environ 60 % des besoins en fourrage du bétail sont satisfaits par la végétation de cette zone (Chapitre 5). Le potentiel des transferts organiques d'origine animale pour compenser l'exportation d'éléments minéraux à la récolte, a été décrit dans des régions plus sèches que celle de Kolda (de Leeuw *et al.*, 1994 ; Powell *et al.*, 1996 ; Buerkert et Hiernaux, 1998). Les apports d'éléments minéraux dans l'auréole de case

ne sont pas seulement liés à la fumure mais aussi à la récolte des cultures, ainsi qu'à la collecte de bois de feu qui représente une grande perte de phosphore pour les écosystèmes locaux de jachère (Chapitres 1 et 5).

Il est à retenir que quelques années de jachère suffisent à augmenter les teneurs en C, N, P_{OD}, Mg et CEC du sol, à condition que la capacité de rejet des adventices ligneuses ait été conservée grâce à de longues périodes de jachère (Chapitre 2). Par exemple, la teneur en carbone de l'horizon 0-20 cm atteint 5,2 g kg⁻¹ dans des jachères âgées de 1 à 10 ans, ce qui est proche des valeurs mesurées dans les champs de l'auréole de case (5,9 g kg⁻¹).

3.4.4. Considérations méthodologiques : pertinence de la matière organique du sol comme indicateur de la qualité du sol et de la durabilité agricole

L'étude de la distribution et de la dynamique du carbone dans l'auréole des cultures continues du village et dans les cultures semi-permanentes périphériques (Chapitre 2) remet en question le lien entre le statut organique du sol défini par la teneur en carbone, et la fertilité des agroécosystèmes de savanes, et, plus largement, la durabilité des pratiques agricoles.

Sous climat tempéré, où des régimes thermiques du sol froids à tempérés dominant, la teneur en COS est très bien reliée à la qualité du sol et à la santé de l'écosystème (Gregorich *et al.*, 1996), ainsi qu'aux rendements (Bockstaller *et al.*, 1997). Sous les tropiques, son utilisation a été sérieusement critiquée (Sanchez et Miller, 1986 ; Greenland *et al.*, 1992 ; Crétenet, 1996), d'autant plus qu'il s'avère difficile de définir la valeur optimale de la SOM servant d'indicateur de la qualité durable du sol (Pieri, 1989 ; Almasie, 1996). Les interprétations agroécologiques de la teneur en COS, sans considérations méthodologiques, sont discutables et limitées dans les sols sableux des savanes ouest-africaines, et ce pour deux raisons principales.

(1) La teneur en carbone total du sol ne fournit que des informations limitées sur le rôle agroécologique du carbone dans les sols sableux tropicaux de savanes.

Excepté dans les zones montagneuses ou pour des sols bien pourvus chimiquement, la productivité des écosystèmes tropicaux n'est pas pendant la période de croissance limitée par la température, mais par les éléments minéraux (Murphy and Lugo, 1986 ; Anderson et Spencer, 1991). Ceci est particulièrement vrai dans les savanes ouest-africaines (Jones and Wild, 1975 ; Pieri, 1989). Les écosystèmes de savane subissent une dissipation considérable d'énergie auxiliaire, ce qui conduit à une faible disponibilité en nutriments et à une déstabilisation de la structure du sol (lessivage, encroûtement et érosion). En raison d'une texture grossière et d'une faible teneur en matière organique, les propriétés physiques du sol (stabilité et porosité) reposent beaucoup sur le biote du sol (systèmes racinaires pérennes), et sur les complexes organo-minéraux liés par des colles

biogènes à fort taux de renouvellement résultant de l'activité de la faune (galeries et déjections de termites et de vers de terre) et de la microflore. La réponse du biote aux contraintes climatiques et pédologiques s'est aussi traduite par une gestion conservatoire des nutriments, stockés dans la biomasse racinaire ou dans des composés organiques stables (Menaut *et al.*, 1985). Ainsi, les mécanismes biologiques ont une position cruciale dans les processus aboutissant à la nutrition des plantes. Ils pourraient être considérés comme des substituts à la faiblesse des mécanismes chimiques de recyclage des nutriments, en raison d'une CEC basse dans les sols sableux. La biomasse vivante et l'activité biologique exercent ainsi un contrôle important sur les propriétés physiques et sur les dynamiques des éléments dans les sols de savanes d'Afrique de l'Ouest (Chotte *et al.*, 1995). Cela a trois implications. La première est que la caractérisation de la qualité de la MOS est nécessaire pour un meilleur diagnostic agroécologique de la qualité du sol basé sur l'étude du statut organique du sol. Cette étude a clairement indiqué que la fraction grossière ([20-2000] ou [50-2000] μm) est la plus pertinente à étudier (Feller *et al.*, 2000). Cependant, pour évaluer finement la "fertilité" biologique du sol en climat tropical tel que celui de notre site d'étude, le statut organique de cette fraction devrait être caractérisé avec précision au début de la saison des pluies (voir ci-dessous). La seconde implication, dans cette région, est que la contribution des composantes biologiques et édaphiques au statut organique du sol est d'une grande importance (c'est à dire l'inventaire de la faune, la biomasse microbienne et la biomasse racinaire) ; les stocks de carbone racinaire devraient aussi être intégrés au calcul des stocks de COS. Enfin, troisièmement : un sol "fertile" de savane devrait être vu comme un système vivant dynamique. Les avancées récentes en thermodynamique appliquées à la théorie des écosystèmes, suggèrent que les systèmes vivants soient considérés comme des systèmes ouverts, auto-organisés, maintenus loin de l'équilibre thermodynamique (la mort). Ceci implique l'établissement d'un flux continu d'énergie à travers le système sol (Toussaint and Schneider, 1998), nécessairement couplé à une dissipation de matière (carbone) (Straskraba *et al.*, 1999). Dans cette approche, les pertes de carbone par le système sol dues au catabolisme faunique et microbien et à la redistribution spatiale par les termites, et le faible potentiel de séquestration du carbone qui en découle, devraient être considérés comme le prix à payer pour le maintien de l'organisation du sol et de son bon fonctionnement (Perry *et al.*, 1989). Dans cette perspective, l'accent devrait être mis sur les flux de carbone (directement en rapport avec les émissions de carbone gazeux, ou indirectement en rapport avec la production de litière et de petites racines) et pas seulement sur les stocks. Un changement reste à faire, d'une conception statique/structurelle vers une conception dynamique/énergétique du rôle de la matière organique, comme support pour les agroécosystèmes tropicaux pauvres en éléments minéraux.

(2) Influence sur le COS d'autres facteurs indépendants des pratiques de gestion.

La variabilité des propriétés physiques intrinsèques du sol telles que la texture peut mener à un diagnostic agroécologique erroné si l'on considère la seule teneur en carbone du sol. Pour surmonter un tel inconvénient, Feller (1995b) a proposé de lier linéairement le COS à la teneur en argile+limon fin pour constituer un indicateur potentiel de qualité des sols tropicaux à argile faiblement active. L'application de cette relation aux 23 parcelles de culture et de jachère décrites dans cette étude (Chapitre 2) permettrait d'attribuer une bonne qualité de sol aux deux tiers des parcelles (Figure 3.4). Mais quoique satisfaisante pour les champs de case, la relation ne permettrait pas

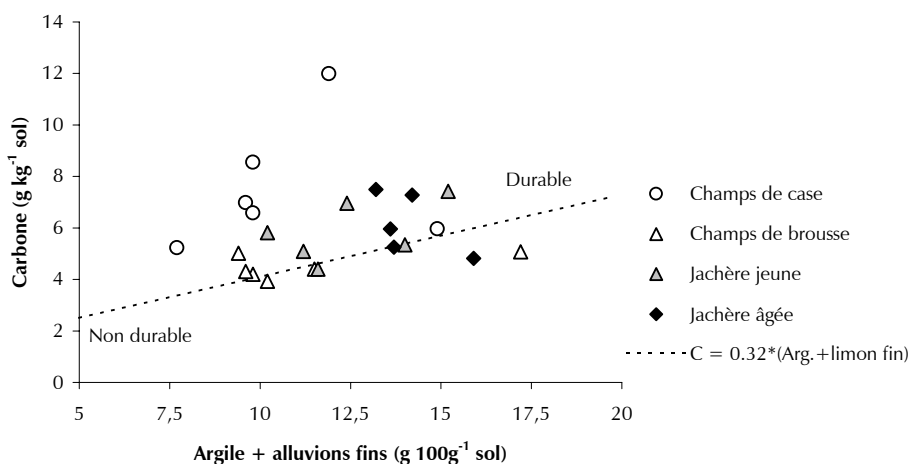


Figure 3.4 Diagnostic de la qualité du sol de 23 parcelles de culture et de jachère (ce Chapitre + Chapitre 2) selon le critère de Feller (1995b) basé sur la teneur en carbone et la teneur en éléments fins.

Jachère jeune : 0-9 ans. Jachère âgée : plus de 9 ans.

Données en Annexe 27.

de séparer les champs de brousse et les jachères âgées qui sont cependant les plus fertiles selon les agriculteurs.

Un autre facteur souvent négligé influençant le COS est la date d'échantillonnage. La loi de Van't Hoff – qui établit que la température et les constantes cinétiques des réactions chimiques augmentent ensemble – implique en effet un taux de renouvellement de la MOS plus élevé en climat tropical qu'en climat tempéré (Jenkinson and Ayanaba, 1977 ; Greenland *et al.*, 1992), et donc à de grandes variations saisonnières potentielles de la teneur en COS. En dehors de Fearnside et Barbosa (1998), peu d'auteurs des souciés de l'importance de cet aspect dans les sols tropicaux. Cette

négligence est bien illustrée par le manque d'indications sur les dates d'échantillonnage dans la plupart des études liées au COS. A notre connaissance, aucune étude méthodologique exhaustive n'a été menée sur les variations saisonnières du COS. Cependant, des variations interannuelles pouvant atteindre jusqu'à 80 % d'une année à l'autre sur des parcelles de culture itinérante dans des plaines amazoniennes saisonnièrement inondées ont été mises en évidence (Zarin *et al.*, 1998). Dans une succession de jachère humide en Inde, Saxena et Ramakrishnan (1986) ont noté des variations saisonnières du COS atteignent jusqu'à 40 % dans l'horizon 0-10 cm. Les mêmes auteurs font état d'une perte de 30 % du COS six mois après la conversion de la jachère en culture. Feller (1981) a indiqué une diminution de 20 % de la teneur en carbone dans les quatre mois après un semis de mil dans une parcelle expérimentale du Sénégal. En fait, la date de l'échantillonnage pourrait être d'une importance particulière dans la détermination de la teneur en COS dans les sols sableux des savanes d'Afrique de l'Ouest car :

- le carbone de la biomasse racinaire contribue significativement au stock total de carbone organique du sous-sol. Cette contribution atteindrait 30 % dans les jachères étudiées (Parties I et II).
- les stocks de carbone du sol, et les flux annuels à travers celui-ci sont de la même ampleur. Dans notre étude, les apports en carbone peuvent représenter des volumes importants, comparés aux stocks de carbone dans l'horizon 0-20 cm des champs de case (non compris l'exudation et la mortalité racinaire avant récolte). Schaefer (1974) a démontré que les émissions annuelles de carbone-CO₂ d'un sol ferrugineux d'une savane subhumide de Côte d'Ivoire pouvaient représenter jusqu'à 75 % du stock total de COS.
- les apports en carbone dans les jachères et les écosystèmes cultivés de savanes sont très localisés dans le temps (Menaut *et al.*, 1985).

Nous suggérons ainsi que la seule texture grossière des sols de notre site d'étude, puisse ne pas être totalement responsable du faible potentiel de stockage du carbone dans les différents agroécosystèmes présentés au Chapitre 2 et ici même (à l'exception des champs bien pourvus en MO jouxtant les cases) à la fin de la saison des pluies. Nous suggérons un possible nivellement des stocks organiques du sous-sol au début de la saison des pluies, dû à une réhumectation du sol. Cette hypothèse est appuyée par nos résultats sur le fractionnement de la MOS (voir 3.3.4.2. et le Chapitre 2).

3.4.5. Gestion de la matière organique dans les systèmes de culture des savanes et cycle global du carbone

Cette étude suggère des perspectives limitées d'amélioration de la

séquestration du carbone dans les systèmes de culture traditionnels des savanes ouest-africaines. En dehors des propriétés intrinsèques du sol, les raisons en sont (1) la stabilité limitée des gains en carbone organique dans les sols suite à une gestion intensive de la fumure et des résidus, (2) les hauts niveaux d'apports en carbone nécessaires, qui restent loin des disponibilités en matière organique dans la sous-région (Williams *et al.*, 1995).

Parce que la séquestration durable du carbone ne peut avoir essentiellement lieu que dans la biomasse ligneuse vivante, les pratiques agroforestières comme la plantation de haies, la réhabilitation des parcs et les jachères améliorées, associées aux engrais minéraux locaux comme le minerai phosphaté, pourraient être recommandées. Woomer *et al.* (1998) ont estimé que de telles améliorations peu onéreuses pourraient doubler la quantité du carbone stocké dans l'ensemble du système de production dans les hautes terres d'Afrique de l'Est.

Cependant, la contribution des écosystèmes de savane à la limitation globale des émissions de carbone gazeux ne devrait pas nécessairement impliquer une séquestration locale de carbone, surtout si cela ne conduit pas à une source immédiate de revenu pour les agriculteurs (Brown and Lugo, 1990). La fixation de la population dans les savanes est un moyen de prévenir une plus ample déforestation et des pertes ultérieures en carbone dans les écozones voisines plus humides. Cela peut être réalisé par une intensification durable des cultures. Favoriser la séquestration du carbone à travers l'adoption de cultures et d'arbres à systèmes racinaires plus importants, le développement de plantations pérennes et l'usage d'engrais est bien sûr pertinent (Woomer *et al.*, 1998). Mais maximiser les flux de carbone à travers le système protège aussi celui-ci d'un crash écologique. Dans ce but, des moyens plus efficaces de gestion des ressources organiques, visant à limiter les pertes en carbone pendant les cycles biogéochimiques courts (feu, vente de résidus) devraient être mis en œuvre. Néanmoins, le succès de telles pratiques reposera fortement sur une meilleure intégration de l'élevage aux stratégies de culture, et sur l'adoption par les agriculteurs de pratiques agricoles comme le fanage, les cultures de couverture, le paillage, le compostage, et le labour minimal. La gestion organique des "ingénieurs" biologiques du sol tels que les termites et les vers de terre est également prometteuse (Lavelle *et al.*, 1998 ; Mando, 1998). Mieux les systèmes de culture durables des savanes imiteront des écosystèmes naturels dans la manière dont ils stockent et recyclent le carbone, les nutriments et l'énergie, plus durables ils seront (Brown and Thomas, 1990). En même temps, toute évaluation opérationnelle de la disponibilité en carbone et en éléments minéraux et des options de gestion devrait être réalisée à l'échelle de l'exploitation et du village, eu égard à l'organisation collective de la tenure foncière et aux structures sociales en Afrique de l'Ouest (Defoer *et al.*, 1998 ; Woomer *et al.*, 1998) (Chapitre 4 et Chapitre 5).

PARTIE II.

**STATUT ORGANIQUE
DES AGROECOSYSTEMES
D'UNE SAVANE OUEST-AFRICAINE :**

APPROCHE TERROIR

CHAPITRE 4.

BILANS SPATIALISES DE CARBONE, D'AZOTE ET DE PHOSPHORE A L'ECHELLE D'UN TERROIR DE SAVANE OUEST-AFRICAINE

I - LES STOCKS



Champ de mil à la récolte

CHAPITRE 4.

BILANS SPATIALISES DE CARBONE, D'AZOTE ET DE PHOSPHORE A L'ECHELLE D'UN TERROIR DE SAVANE OUEST-AFRICAINE

I - LES STOCKS

RESUME

Les systèmes agropastoraux des savanes ouest-africaines dépendent beaucoup de la disponibilité de la matière organique pour satisfaire les besoins locaux en nourriture, en fourrage et en bois, et maintenir la qualité du sol. C'est pourquoi les stocks de carbone, d'azote et de phosphore du sol (horizon 0-20 cm ; mesure de P assimilable uniquement) et de la biomasse végétale (aérienne et souterraine jusqu'à 40 cm de profondeur) en relation avec l'organisation agro-sociale, ont été évalués pour un terroir du Sud Sénégal à la fin de la saison des pluies.

Les principales caractéristiques du système agricole ont été une densité de population égale à 33 hab. km⁻² et une charge animale de 51 unités de bétail tropical (UBT ; 1 UBT = 250 kg de poids vif) par kilomètre carré. Les jachères, les cultures vivrières (céréales pluviales et riz) et de rente (arachide, coton) ont représenté 46, 25 et 17 % des 258 ha gérés par le village. Des contrastes importants ont été trouvés entre les agriculteurs, en particulier au sujet de la disponibilité du bétail. Par conséquent, la vaine pâture et le parage de nuit pourraient conduire à des transferts de fertilité déséquilibrés entre les champs des petits éleveurs et ceux des gros éleveurs.

Le village avait une organisation en auréoles concentriques avec un gradient positif d'intensification et de production alimentaire de la savane vers

les habitations. L'auréole de case a été principalement consacrée à la production alimentaire ; elle a couvert 8 % de la surface et compté pour 5, 7 et 14 % des stocks de C, N et P de l'ensemble du terroir villageois. L'auréole de brousse entourant l'auréole de case s'est étendue sur 73 % du terroir et a emmagasiné entre 66 et 71 % des stocks de C, N et P du village. Le bas-fond (rizière) s'est étendu sur 6 % de la surface et a stocké 9 % du carbone et 16 % de l'azote et du phosphore , le reste du village étant occupé par une palmeraie.

Les stocks de C, N et P dans la végétation et le sol ont atteint 29,7, 1,52 et 28,6 10^{-3} t ha⁻¹. Les principaux lieux de stockage du carbone ont été le sol (52 %), la biomasse aérienne ligneuse (22 %), les souches (8 %) et les grosses ($\varnothing > 2$ mm) racines (8 %).

Dans les conditions de la croissance démographique actuelle (2,5 %), les pertes simulées de carbone dues à l'expansion de l'espace cultivé, devraient conduire à une émission de 0,38 tC ha⁻¹ an⁻¹ pendant les 31 prochaines années, ce qui est beaucoup moins important que les chiffres enregistrés dans les zones tropicales plus humides, mais indique une crise agroécologique possible dans les prochaines décennies.

MOTS CLE

Azote, Biomasse végétale, Carbone, Phosphore, Savane, Sénégal, Sol, Stock, Système agropastoral

4.1. INTRODUCTION

La plupart des systèmes de production traditionnels en Afrique de l'Ouest, en particulier ceux des savanes, partagent deux grandes caractéristiques (Ruthenberg, 1971) :

- de faibles besoins d'apports exogènes (engrais, énergie, pesticides), n'autorisant souvent qu'une agriculture extensive, et reposant sur l'usage de la jachère et de la fumure animale,
- une forte cohésion sociale, engendrant une tenure foncière et des règles de gestion des terres communautaires et autorisant parfois une intensification très localisée.

Alors que la croissance annuelle de sa population a été de 2,7 %, l'Afrique subsaharienne a connu une diminution de sa consommation d'engrais chimiques depuis le début des années 90 (Naseem and Kelly, 1999). Afin de combler les ruptures d'approvisionnement en énergie, en engrais et en main d'œuvre, les agriculteurs ont généralement organisé leur terroir villageois selon un schéma d'auréoles concentriques qui est une caractéristique générale des systèmes agropastoraux autarciques (Mazoyer and Roudard, 1997). De leurs champs de case vers les zones périphériques, les agriculteurs ont établi un gradient décroissant d'intensification agricole et de contrôle foncier, permettant de distinguer trois principales auréoles (Pélissier, 1966 ; Ruthenberg, 1971 ; Prudencio, 1993) :

- l'auréole de case. Elle est réservée à la culture continue, grâce à des pratiques intensifiées de gestion de la fertilité, à savoir la fumure animale et l'épandage d'ordures ménagères. Cette auréole assure la sécurité alimentaire et est cultivée préférentiellement par rapport aux autres unités de gestion de l'espace (UGE),
- l'auréole de brousse. Les systèmes de culture y sont moins stables et les cultures à la fois de rente et vivrières. Une agriculture semi-permanente côtoie plus ou moins une agriculture continue selon les propriétés initiales du sol, les besoins alimentaires et de trésorerie et la disponibilité en bétail. Les jachères sont courtes à longues et constituent un réservoir de terre qui peut être facilement défriché en fonction de différents facteurs tels que la disponibilité en main d'œuvre,
- l'auréole de savanes ou de forêts, qui n'a pas été cultivée depuis plusieurs décennies et est soumise à une appropriation communautaire. Cette auréole agit comme une source de fourrage, de bois et d'autres sous-produits ligneux.

Sur la frange la plus humide de la ceinture des savanes ouest-africaines (SOA), ces systèmes agropastoraux ont été principalement maintenus par

une gestion soignée de la matière organique (MO), grâce à l'établissement de transferts verticaux comme ceux survenant au cours de la jachère, et de flux horizontaux grâce au bétail pendant leur divagation diurne et le parcage nocturne.

La MO endogène (carbone fixé localement) a été gérée par la population comme un outil à usages multiples pendant des décennies et peut ainsi être considérée comme une ressource. La matière organique est un continuum de formes carbonées, de la biomasse vivante aux composés humiques. Elle fournit à la population des aliments, du bois de feu et des matériaux de construction. Elle procure du fourrage aux animaux. Elle convoie les nutriments et l'énergie vers le sol tout en assurant l'intégrité de la structure de l'écosystème sol. Dans les sols ferrugineux fortement lessivés, à texture grossière et à argile faiblement active, qui dominent dans les SOA, ces fonctions sont d'une extrême importance, puisque la matière organique du sol assure les propriétés physiques, chimiques et biologiques de celui-ci (Jones and Wild, 1975 ; de Ridder and van Keulen, 1990 ; Asadu *et al.*, 1997 ; Feller and Beare, 1997). Cependant, de telles pratiques ne se sont montrées adaptées qu'à un contexte de faible densité démographique (van der Pol, 1992 ; Floret *et al.*, 1993). Depuis quelques décennies, les SOA ont connu un rapide accroissement de leur population. Ceci, ajouté à une politique foncière nationale incertaine, entraîne un besoin croissant en terres, en bois et en fourrage, remettant en question les pratiques de jachère et même de fumure (Dugué, 2000). La réduction du temps de jachère et des surfaces périphériques disponibles pendant la période de culture, l'épuisement de la végétation ligneuse, la baisse des restitutions en résidus de culture au sol et la privatisation des terres, et donc des ressources organiques, menacent toutes la reproductibilité des pratiques traditionnelles organiques.

L'évaluation de la ressource organique à l'échelle parcellaire est un premier pas vers la définition de nouveaux systèmes agricoles viables. Dans un village des SOA du Sud-Sénégal, cette évaluation a permis d'apporter des éléments de compréhension sur le rôle de la matière organique dans la durabilité de la productivité des écosystèmes (Chapitres 1, 2 et 3). Il a été montré que l'accroissement rapide du stockage de la biomasse végétale peut se produire dans les jachères et fournir aux agriculteurs des biens, ainsi qu'améliorer les propriétés chimiques du sol (carbone, azote, CEC, pH et magnésium). Cependant, une telle évolution repose principalement sur le maintien des souches, et bien que la plupart des caractéristiques de la biomasse végétale et du sol n'évoluent pas au-delà de 10 années de jachère, de longues périodes de jachère sont nécessaires pour la réinstallation de ces souches. D'un autre côté, le statut chimique de l'auréole de case est supérieur à celui de l'auréole de brousse ; le volume des apports en carbone ne pouvant rendre compte seul de l'accroissement de la teneur en MOS, qui dépend aussi de la qualité (biochimie, teneur minérale) de la MO restituée aux parcelles (paille, fumier, ordures ménagères).

Pourtant, davantage d'informations - en particulier sur la durabilité des systèmes de culture - peuvent être déduites de la dynamique du carbone (C), de l'azote (N) et du phosphore (P) en passant de l'échelle de la parcelle à celle du terroir villageois (Landais and Lhoste, 1993 ; Izac and Swift, 1994 ; Krogh, 1997). Les raisons en sont :

- une connexion fonctionnelle entre les UGE (auréoles de case et de brousse) à travers la gestion de l'élevage, par exemple,
- des pratiques collectives de gestion de la fertilité, et de la tenure foncière, au moins à l'échelle de l'exploitation,
- des bilans en carbone et azote des parcelles à pondérer nécessairement en fonction de la surface des parcelles, des propriétés inhérentes du sol, et de l'histoire des cultures, pour des estimations plus précises.

Il est probable que les SOA, de plus en plus peuplées, se tournent vers une agriculture minière (van der Pol, 1992), et, à moins qu'un meilleur accès aux intrants chimiques soit possible, la durabilité de ces systèmes agricoles dans les années à venir devrait encore pouvoir être estimée par une évaluation précise des stocks de carbone et d'éléments minéraux stockés sur place, à l'échelle du village. Comme l'ont mentionné Stoorvogel *et al.* (1993a), ce genre d'étude manque encore.

Les objectifs de cette étude étaient de (1) décrire l'organisation sociale, fonctionnelle et spatiale d'un système agropastoral dans la manière dont elle contrôle la production de MO et le stockage du carbone, de l'azote et du phosphore, (2) donner des bilans globaux de C, N et P d'un terroir villageois (cultures, jachères de moins de 18 ans, palmeraie) du Sud-Sénégal en fonction de l'utilisation de l'espace et de la gestion de la fertilité, (3) estimer les tendances futures des stocks de carbone de ce village selon différents scénarios dépendant de l'efficacité de l'agriculture et de l'évolution des besoins des agriculteurs.

4.2. METHODES

4.2.1. Caractéristiques du site

L'étude a été conduite au Sénégal, dans le village de Sare Yorobana, Région de Haute-Casamance, Département de Kolda. Sare Yorobana appartient au district de Dioulacolon et est situé à 12°49'N et 14°53'O. Le village a été choisi pour sa représentativité des systèmes agropastoraux rencontrés dans la frange sud de la région, bien que la variabilité concernant la densité de population, la propriété animale et les pratiques agricoles soit de règle en Haute-Casamance (Fanchette, 1999b).

Une description détaillée du climat, du sol et de la végétation du site peut être trouvée dans les Chapitres 1, 2 et 3.

Le climat est de type tropical subhumide avec des précipitations allant de mai à octobre et atteignant 960 mm an⁻¹ sur la période 1978-1997 (Figure 4.1) (Service de la Météorologie Nationale, station de Kolda).

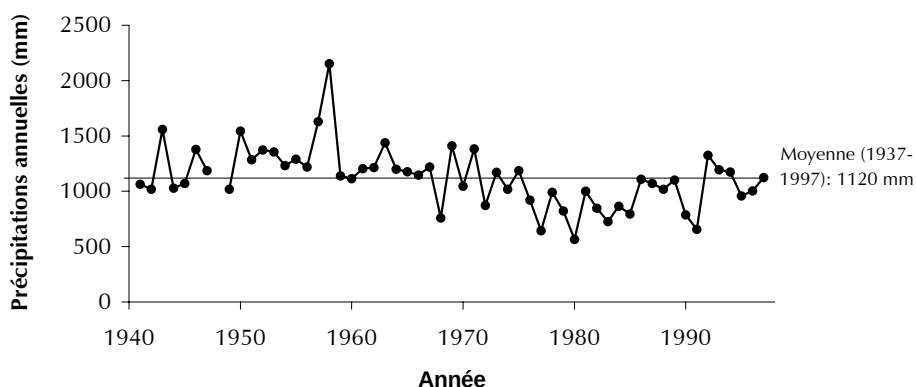


Figure 4.1 Précipitations annuelles moyennes pendant les 60 dernières années (Service de la Météorologie Nationale, station de Kolda). Données en Annexe 28.

Le paysage est assez plat, et la toposéquence typique est constituée d'un plateau, d'un glacis et d'un bas-fond saisonnièrement inondée. Les sols du plateau et du glacis sont des sols tropicaux ferrugineux, sablo-limoneux (Baldensperger *et al.*, 1967), décrits comme des Lixisols (FAO, 1998b). Le bas-fond est formé de sols hydromorphes argilo-limoneux (Gleysols typiques). Les propriétés du sol dépendent peu (sauf pour le phosphore) de la gestion des terres dans les horizons inférieurs à 20 cm de profondeur (Chapitres 2 et 3). Les teneurs en C, N et P assimilable (mesuré d'après la méthode Olsen modifiée par Dabin 1967, et noté P_{OD}) s'élèvent respectivement à 5,1 (C), 0,39 (N) et $2,3 \cdot 10^{-3}$ (P) g kg⁻¹ dans les jachères, 4,1 (C), 0,33 (N) et $2,2 \cdot 10^{-3}$ (P) dans les cultures de l'auréole de brousse, 5,9 (C), 0,49 (N) et $13,7 \cdot 10^{-3}$ (P) g kg⁻¹ dans l'auréole de case, et 15,2 (C), 1,4 (N), et $21,6 \cdot 10^{-3}$ (P) g kg⁻¹ dans les rizières (*Oryza sativa* L.) de bas-fond. Le village de Sare Yorobana appartient au plus ancien foyer de peuplement Peulh dans la région de Haute-Casamance (Pélissier, 1966 ; Fanchette, 1999b). Avant la guerre d'indépendance menée contre leurs maîtres Mandingue au milieu du 19^{ème} siècle, une distinction avait déjà été établie parmi les Peulh, entre la noblesse - les premiers migrants Peulh authentiques - et ceux qu'ils avaient réduits en esclavage pendant les guerres contre d'autres groupes ethniques avec l'aide des Mandingues. Ces esclaves ont été progressivement et culturellement intégrés dans le groupe ethnique

Peulh, mais ont formé une nouvelle caste, celle des captifs (Pélissier, 1966). Bien que l'esclavage ait été aboli depuis longtemps, la hiérarchie reste marquée entre les lignages nobles et captifs ; les mélanges ont rarement lieu entre eux.

4.2.2. Caractérisation du système de production

4.2.2.1. Organisation spatiale

Bien que l'élevage extensif s'étende largement au-delà des frontières du village, seul le territoire géré par la communauté (selon les règles coutumières) a été considéré dans cette étude. La cartographie a débuté en 1996 à l'aide d'un théodolite. Elle a été mise à jour en 1997 en utilisant une boussole. Les champs (cultivés ou non) ont été identifiés en tant qu'unité de propriété, alors que les parcelles faisaient référence à l'utilisation de l'espace (un champ comprenant au moins une parcelle, souvent plusieurs, avec des frontières entre parcelles changeant d'une année à l'autre). Seules les jachères de moins de 18 ans ont été cartographiées ; fixer des limites à des jachères plus âgées s'est en effet révélé quasiment impossible du fait de la repousse de la végétation et des indications peu fiables des agriculteurs, ce qui mettait en évidence la faiblesse de l'appropriation de ces terres. La rizière gérée par le village a été cartographiée d'un bloc en raison de la grande complexité de la tenure foncière. Un système de positionnement global (GPS) a été utilisé afin de fixer les limites de la palmeraie.

La base de données a été gérée avec le système d'information géographique Atlas (SMI, 1993), avec lequel les variables topologiques ont été calculées (surface, distance aux habitations).

Une caractérisation systématique de l'histoire des parcelles et de leur gestion a été réalisée grâce à des enquêtes sur le terrain avec les agriculteurs. L'historique culturel, la propriété, l'usage et les raisons de la mise en jachère ont été enquêtés. La typologie locale des champs hors bas-fond a également été étudiée. Globalement, cette typologie sépare (1) les champs en culture continue de céréales (champs de case, ou *bambe* dans la terminologie locale), les cultures étant essentiellement le mil (*Pennisetum glaucum* L.), le maïs (*Zea mays* L.) et le sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench) (2) et les champs de culture semi-permanente (champs de brousse, appelés *kene* et *segueli*), consacrés à l'arachide (*Arachis hypogea* L.) et au coton (*Gossypium hirsutum* L.) principalement. Bien que les critères mis en avant pour classer les parcelles entre champs de case et champs de brousse changeaient selon les agriculteurs, les enquêtes sur le passé culturel indiquent que les champs de case pouvaient être correctement définis comme ceux ayant été continuellement cultivés en céréales durant les 10 dernières années.

Ces enquêtes ont permis de calculer l'intensité de culture ou IC (définie comme la proportion d'années durant lesquelles la parcelle a été cultivée lors des 10 dernières années) pour chaque parcelle.

4.2.2.2. Organisation sociale

Dans les sociétés locales de Casamance, comme c'est le cas dans la plupart des sociétés des SOA, la cohésion sociale et la prise de décision ne sont pas établies à l'échelle du ménage, mais à l'échelle de l'exploitation (Pélissier, 1966 ; Achterstraat, 1983). Une exploitation est ici représentée par une communauté de voisins, avec ou sans liens familiaux, partageant les mêmes cultures vivrières, les mêmes greniers à céréales, et, le plus souvent le même troupeau d'animaux. Une analyse multivariée a été menée pour établir une typologie agro-sociale des exploitations de Sare Yorobana, sur la base de la structure de la population (taille de la population, besoins alimentaires "UN", force de travail "UT"), des moyens de production (animaux "UBT", équipement "Equ", surface possédée "SP" et emploi de saisonniers "Sai"), et de la gestion de l'espace (répartition des cultures vivrières " %SViv", des cultures de rente " %SRent" et des jachères " %SJac").

Toutes les exploitations ont été enquêtées au sujet de la structure de leur population permanente et saisonnière (taille, âge). Ces données brutes ont été utilisées pour calculer la variable "population à nourrir" notée "UN" (exprimée "en unités à nourrir") ; dans ce but, nous avons choisi d'attribuer 0,5 unité à tout habitant de moins de 15 ans, et une unité à chaque adulte ("Adu"). La variable "force de travail" notée "UT" (exprimée en unité de travail) a été calculée grâce à l'attribution des coefficients suivants fonctions de l'âge et du sexe de la population de la concession (tiré de FIA-SLE, 1990) : (1) âge 15-59 ans : femme=0,5 ; homme=1 (2) âge < 15 ans : femme=0,2 ; homme=0,5. Les moyens de production enquêtés ont été : la disponibilité en bétail "UBT" exprimée en unité de bétail tropical (1 UBT = 250 kg de poids vif), le nombre de charrues, de sarclours et de semoirs possédés (rassemblés en une variable "Equ") et l'emploi de travailleurs saisonniers "Sai". Certaines des variables ont été "normalisées" après avoir été divisées par les variables relatives au peuplement ("Adu", "UT" ou "UN"). La typologie des exploitations a été effectuée grâce à une analyse en composantes principales (ACP) faite avec le logiciel ADE 4 (Thioulouse *et al.*, 1997). La matrice comptait 16 lignes (exploitations) et 10 colonnes (variables simples et composées décrites ci-dessus ; voir la légende de la Figure 4.5 pour la liste complète des variables et de leurs abréviations). Les corrélations de Spearman ont été calculées avec la procédure CORR du logiciel SAS 6.14 (Hatcher and Stepanski, 1994).

4.2.3. Evaluation des stocks de carbone, d'azote et de phosphore à l'échelle du terroir villageois

4.2.3.1. Mesure sur le terrain de la biomasse végétale récoltée

La biomasse récoltée (épis de céréales, gousses d'arachide, grains de coton) a été pesée sur place au moment de la récolte, parcelle par parcelle

lorsque cela était possible. Un échantillon de chaque parcelle a été rapporté au laboratoire afin de déterminer la teneur en eau (séchage à 60°C jusqu'à poids constant). Les résultats de chaque parcelle ont été exprimés en rendement de matière sèche à la récolte.

4.2.3.2. Stocks de matière sèche, de carbone, d'azote et de phosphore dans les autres composantes de la biomasse végétale

Des régressions ont été utilisées afin d'estimer le stock total de biomasse végétale de chaque parcelle. Le rendement de la récolte dans les parcelles en culture et l'âge des jachères étaient des variables facilement mesurables, qui ont ainsi été utilisées comme indicateurs pour estimer la biomasse (1) de la paille, des adventices herbacées et des racines des cultures jusqu'à 40 cm de profondeur dans les champs cultivés, (2) des arbres et de la strate herbacée, de la litière, des souches, et des racines fines et épaisses des jachères (jusqu'à 40 cm). Des régressions linéaires ont été établies pour les cultures, utilisant les données du Chapitre 3 plus celles de quatre parcelles supplémentaires, deux en culture intercalée de mil et de maïs (MlxMA01 et MlxMA02), et deux en culture de sorgho (SO01 et SO02) (situation en Annexe 1). Les méthodes d'échantillonnage et de mesure des rendements en biomasse ont été strictement équivalentes à ceux présentés au Chapitre 3. La procédure REG et le test F ont été réalisés sur SAS 6.14. Les régressions non linéaires (fonctions de type logistique) ont été utilisées dans les jachères pour évaluer les stocks de C, N et P dans la biomasse végétale comme des fonctions de la durée des jachères (Chapitre 1). Lorsque les régressions n'étaient pas statistiquement satisfaisantes, les biomasses moyennes rapportées par les deux travaux précédemment cités ont été utilisées.

Certaines des composantes de la biomasse végétale des champs cultivés n'ont pu être reliées au rendement à la récolte. Cela a été le cas pour la biomasse aérienne et souterraine (BA et BS) des adventices ligneuses. Celle-ci a plutôt été estimée liée à l'intensité de culture (IC), selon le modèle suivant basé sur des observations de terrain : $IC > 0,75$: BA ligneuse, biomasse des grosses racines et des souches = 0 ; $IC \leq 0,75$: BA = 0,32 t ha⁻¹, biomasse des grosses racines = 3,38 t ha⁻¹, biomasse des souches : 7,48 t ha⁻¹ (selon les résultats du Chapitre 1). Parce que la valeur du seuil de l'IC a été choisie à partir d'observations qualitatives, un test de sensibilité a été appliqué en recalculant la biomasse végétale totale à l'échelle du village après modification du seuil de l'IC de plus ou moins 10 % de sa valeur.

Les teneurs en C, N et P des Chapitres 1 et 3 ont alors été appliqués afin de convertir les stocks de MS en stocks de C, N et P.

Du fait du manque de données pour la palmeraie et pour certaines composantes de la biomasse de sorgho et de coton, des données bibliographiques ont été utilisées (voir Tableau 4.5).

4.2.3.3. Stocks de carbone, d'azote et de phosphore assimilable dans les sols

Les teneurs en C, N et P_{OD} ont été calculées à partir des mesures des 25 parcelles du village (cultures et jachères) présentées dans les Chapitres 2 et 3. Les données des stocks du sol ont été calculées jusqu'à 20 cm seulement puisque les stocks de C, N et P ne sont que légèrement influencés par l'utilisation de

Tableau 4.1 Estimation des stocks de carbone (en t ha⁻¹), d'azote et de phosphore assimilable (en kg ha⁻¹) (horizon 0-20 cm) pour le calcul des bilans à l'échelle du village, en fonction de l'utilisation de l'espace (dans le cas des jachères et des rizières), de l'auréole de gestion, de la proximité d'une concession et de l'intensité de culture (IC).

Usage de la terre	Jachère	Riz	Autre			
			de case		de brousse	
			oui	non	oui	non
Auréole						
Contiguïté à une concession						
IC ≤ 0,5					oui	non
C (t ha ⁻¹)	15,4	41,2	21,3	14,5	12,9	11,7
N (kg ha ⁻¹)	1282	3796	2000	1175	989	989
P (kg ha ⁻¹)	7,2	56,3	77,8	17,9	6,4	6,4

Source : Chapitres 2 et 3

l'espace en dessous de cette profondeur (excepté le P dans l'auréole de case ; voir Chapitres 2 et 3). Les critères pris en compte pour les valeurs de stocks dans le sol ont été : l'auréole de gestion, la proximité d'une habitation, l'utilisation de l'espace (jachère, riz) et l'intensité de culture (voir Tableau 4.1).

4.2.3.4. Etablissement d'un bilan agropastoral simplifié

L'autosuffisance de chaque exploitation, par rapport à ses besoins en fourrage et en fumier pendant la saison sèche de 1996-1997, a été calculée. Les hypothèses suivantes ont été faites : (1) consommation : 15,4 kgMS par kg de poids métabolique (PM) (Ickowicz *et al.*, 1998) (2) production fécale moyenne pendant le parcage de nuit : 8,74 kgMS kgPV⁻¹ (ibid.) (3) besoin minimal annuel de fumier d'une culture de céréales : 2,5 tMS ha⁻¹ (de Ridder and van Keulen, 1990 ; Berger, 1996). Le volume de fourrage disponible d'une exploitation a été défini comme la somme de la biomasse de paille et de mauvaises herbes dans les champs cultivés, et comme celle de la biomasse herbacée dans les parcelles de jachère appartenant à l'exploitation.

4.2.4. Prédiction de l'évolution du statut du carbone dans le village

Afin de prévoir comment le statut organique du terroir villageois peut évoluer dans les prochaines décennies, une représentation simplifiée de sa dynamique a été réalisée en utilisant une fonction liant les stocks de carbone à l'utilisation de l'espace, elle-même liée à la disponibilité de la fumure et aux besoins des populations. L'initialisation a été effectuée pour l'année 1997 par une représentation simplifiée du territoire d'après les données présentées ici et au Chapitre 5. Les simplifications initiales ont essentiellement consisté à grouper les cultures de mil, sorgho et maïs en un seul label d'utilisation de l'espace "céréales pluviales" et à considérer l'arachide comme la seule culture de rente (les champs de coton ont été remplacés par les champs d'arachide). Les suppositions suivantes ont été

effectuées pour le modèle statique de base, selon les critères dérivant de la situation réelle de 1997 (ce Chapitre et Chapitre 5) :

- croissance annuelle de la population fixée à 2,5 % (UNDP, 1999),
- besoins alimentaires et de trésorerie constants : 180 kg de céréales, 210kg de gousses d'arachide, exprimés en kg de MS par an et par habitant,
- rendement constant d'arachide ($1,29 \text{ tMS gousse ha}^{-1}$),
- production constante de riz irrigué (13 tMS ; surface et rendement stables),
- rendement de céréales pluviales comme une fonction linéaire de la disponibilité en fumier (mis en évidence pour le mil dans le Chapitre 5). Les paramètres de la régression ont été fixés à : pente = 0,0659 tonnes de MS grain par tonne de matière organique de fumier appliqué pendant le parage nocturne, et ordonnée à l'origine = $0,664 \text{ t ha}^{-1}$. Ces valeurs ont été calculées sachant que le rendement moyen en MS des céréales pluviales a atteint $0,795 \text{ t ha}^{-1}$ en 1997 pour un volume disponible de fumier de $1,99 \text{ tMS ha}^{-1}$, alors que les parcelles non fumées ont eu des rendements de seulement $0,664 \text{ t ha}^{-1}$. En tenant compte des travaux de Gueye et Ganry (1981) et Fernandes (1999), un seuil a été fixé à $6 \text{ tMS de fumier ha}^{-1}$, au-delà duquel les rendements ne pouvaient pas augmenter,
- rapport constant entre la surface des jachères de moins de 10 ans (nommées "jachères jeunes") et celle des parcelles de culture pluviale (0,56 en 1997),
- en cas de manque de terre, priorité donnée à la satisfaction des besoins alimentaires, puis aux besoins en trésorerie,
- disponibilité en UBT par habitant constante = 1,55,
- disponibilité constante en fourrage (pas de modification des performances zootechniques par rapport à 1997).

La palmeraie n'a pas été considérée dans le modèle, puisque aucune mesure directe des stocks de carbone n'y a été pratiquée, et parce qu'elle n'est guère susceptible d'être mise en culture dans les années à venir du fait de la pauvreté chimique de ses sols.

Selon le scénario témoin décrit plus haut, quatre scénarios alternatifs ont été construits en croisant :

- L'accroissement du rendement des céréales ("R") suite à des pratiques culturales améliorées (acquisition d'apports chimiques, matériel végétal génétiquement amélioré ...). Deux niveaux d'accroissement ont été testés : 30 et 100 %,
- L'accroissement du niveau de vie de la population ("N"), c'est à dire une élévation de 30 % du besoin en céréales et en arachide par tête, entraînant une augmentation de 30 % de la disponibilité en UBT par tête.

Les variables de sortie en découlant ont été la distribution de l'utilisation des terres (parmi les champs de céréales, ceux d'arachide, les jachères âgées -de plus de 10 ans- et les jachères jeunes) et le stock de carbone dans le système plante-sol (biomasse aérienne, biomasse souterraine et biomasse végétale+sol).

4.3. RESULTATS

4.3.1. Organisation spatiale des systèmes de production

Le village de Sare Yorobana couvre 256 ha (plus 2 ha pour les habitations et les jardins de cases), sur lesquels 46 % sont occupés par les jachères, 25 % par les cultures vivrières et 17 % par les cultures de rente (Tableau 4.2). L'utilisation et la gestion de l'espace dépendent à la fois de la géomorphologie et de la distance depuis le village (Figure 4.2 ; Figure 4.3).

Quatre UGE appropriées par les habitants du village (non compris l'auréole de forêt et de savane) peuvent être distinguées :

Tableau 4.2 Répartition des surfaces (ha) selon l'utilisation de l'espace en fonction de l'auréole de gestion et de la géomorphologie dans le terroir de Sare Yorobana.

Gestion	Auréole de brousse		Auréole de case	Palmeraie	Rizière	Total
	Plateau	Glacis				
Mil x maïs	0,0	0,4	5,6			6,0
Maïs	0,6	0,8	1,8			3,2
Mil	10,6	12,1	10,6			33,2
Sorgho	1,4	2,3	1,0			4,7
Coton	5,6	1,2	1,8			8,7
Arachide	25,8	9,1	0,7			35,6
Jachère	100,0	16,7	0,0			116,7
Palmeraie				31,9		31,9
Riz					16,2	16,2
Total	144,0	42,6	21,5	31,9	16,2	256,2

«Mil x maïs» = culture intercalaire de mil et de maïs.

- (1) l'auréole de brousse, installée essentiellement sur le plateau et couvrant 73 % de la surface possédée par le village (SPV) (Tableau 4.2). C'est l'auréole la plus éloignée des habitations. Seul un peu plus de 40 % de la surface est cultivé, le reste étant laissé en jachère, courte ou longue. Les cultures de rente (essentiellement le coton et l'arachide) couvrent 60 % des cultures. Les raisons de la mise en jachère sont différentes et conduisent à distinguer deux sortes de jachères. Cinquante neuf pour cent de ces jachères résultent en effet du déplacement des villages de la limite du plateau vers le milieu du glacis suite à la diminution des précipitations annuelles depuis le début des années 80. L'autre type de jachère est entièrement intégré au système de production, puisque les raisons mises en avant pour leur maintien ont été la gestion de la fertilité (55 %), et le manque de terre et de semence (35 et 23 %) (une ou plusieurs raisons pouvant être citées par les paysans).
- (2) l'auréole de case est située uniquement sur le glacis et représente moins de 8 % de la surface du village, mais le tiers de l'assolement en céréales. Le choix des céréales est clairement influencé par la proximité du village (Figure 4.3), les parcelles les plus proches étant plantées en maïs ou en mil intercalé avec du maïs.
- (3) la palmeraie (*Elaeis guineensis* Jacq.) est en bas de pente du glacis. Elle couvre 12 % de la SPV.
- (4) les rizières représentent seulement 6 % de la S, mais 26 % de la ceinture des céréales. Parce que seules les femmes cultivent généralement le riz, la gestion de l'eau se réduit à de petites digues, spécialement sur la frange la plus sèche de cette UGE.

Les pratiques de la jachère et de la fumure sont spatialement dissociées parmi les parcelles du village (Figure 4.4). La majorité de la surface impliquée dans le système de culture du village bénéficie rarement de la jachère ou bien d'une fumure. La plupart des parcelles qui connaissent régulièrement une période de jachère, n'ont pas été fumées, alors que les parcelles de culture continue ont bénéficié de forts apports en fumier.

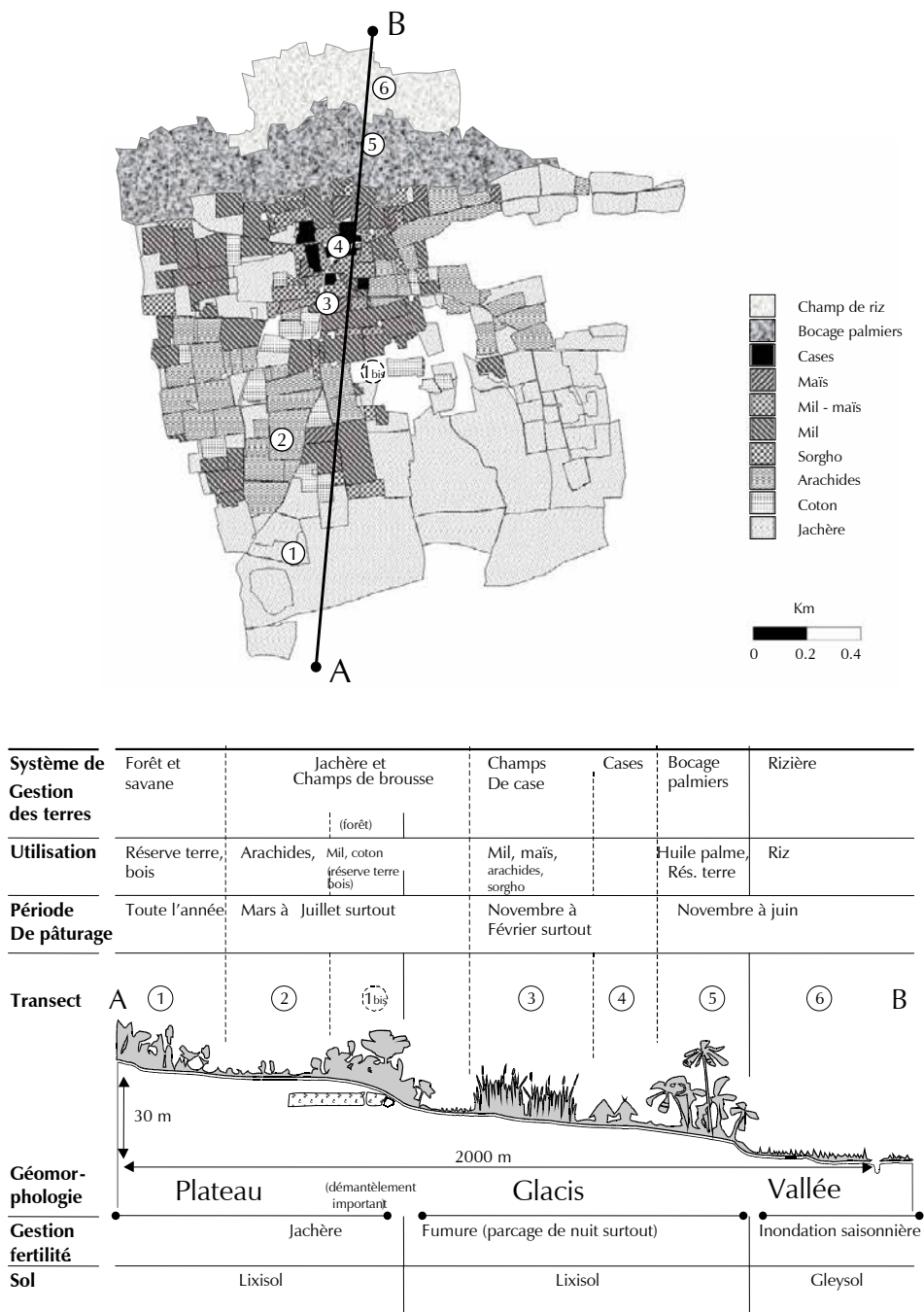


Figure 4.2 Organisation spatiale et utilisation de l'espace dans le terroir de Sare Yorobana.

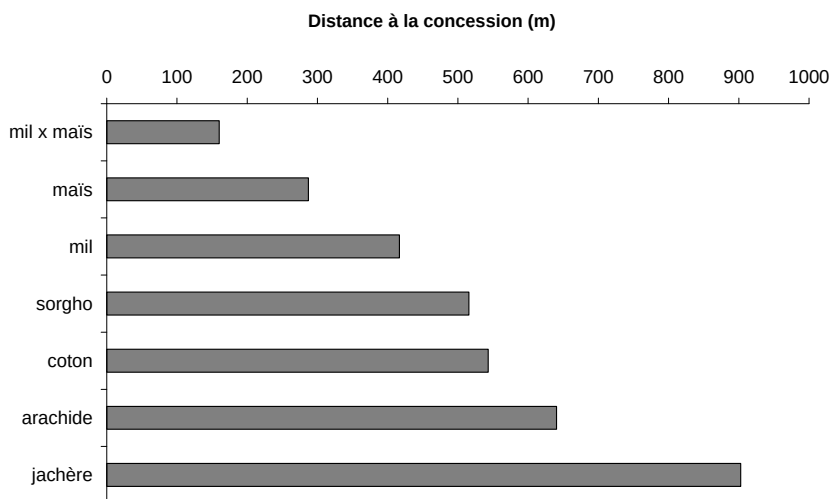


Figure 4.3 Distribution spatiale de l'utilisation de l'espace illustrée par la distance des parcelles cultivées à la concession. Données en Annexe 29.

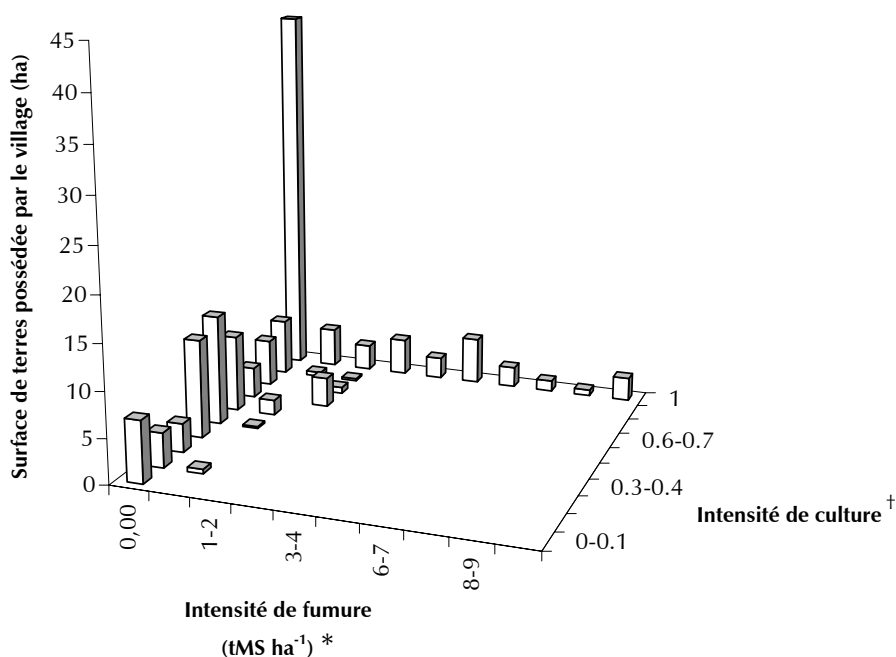


Figure 4.4 Complémentarité spatiale entre intensité de culture et fumure animale dans le système agropastoral du terroir de Sare Yorobana.

* appliqué durant la saison sèche 1996-1997 (parcage nocturne seulement).

† défini comme la proportion de campagnes agricoles durant lesquelles la parcelle a été cultivée entre 1987 et 1997.

Données en Annexe 30.

4.3.2. Organisation sociale

La population permanente de Sare Yorobana était composée de 268 habitants en juin 1997, sur lesquels plus de la moitié avait moins de 15 ans (Tableau 4.3). Les travailleurs saisonniers ont contribué pour 15 % à la force de travail. Le village possédait 415 UBT. La densité de population correspondante, par rapport à la surface possédée par le village, serait de 104 hab./km² et de 162 UBTkm⁻². Cependant, de vastes surfaces de terres non appropriées restent encore sur le plateau. Ainsi, les valeurs de densité précédentes devraient être modifiées en tenant compte de la surface réellement exploitée par le village, qui va bien au-delà de celle possédée par les habitants de Sare Yorobana (voir Chapitre 5). Par exemple, la surface totale explorée par le bétail pendant la saison sèche afin de satisfaire ses propres besoins en fourrage est de 812ha ; dans ces conditions, la densité réelle de population serait de 33 hab. km⁻² et de 51 UBT km⁻².

Tableau 4.3 Statistiques élémentaires caractérisant 16 exploitations de Sare Yorobana.

Variable	Unité	Moyenne $\pm$ ET	Médiane	Intervalle	Village
Population	(personnes)	15,9 $\pm$ 2.3	13,5	3-32	268
- dont adultes :	(personnes)	7,7 $\pm$ 1	8,0	2-16	129
Force de travail ⁽¹⁾	(unité de travail)	7,3 $\pm$ 1	7,6	1.5-15.2	124
Bétail	(UBT) ⁽²⁾	26,0 $\pm$ 8.2	14,3	0-99.6	415
Gestion de la terre:	(%surface)				
- culture vivrière		29 $\pm$ 3	31	4-45	30
- culture de rente		32 $\pm$ 4	38	2-56	32
- jachère		39 $\pm$ 7	29	6-93	38
Terres possédées ⁽³⁾	(ha)	8,8 $\pm$ 1.5	7,6	1-22.6	144
Équipement ⁽⁴⁾		4,3 $\pm$ 0.9	3,5	0-14	76
Rendement					
- arachide	(t gousse/ha)	1,28 $\pm$ 0.13	1,30	0.4-2.3	1,29
- mil (monoculture)	(t grain/ha)	0,91 $\pm$ 0.13	0,83	0.3-2.1	1,13
- mil (monocult. et cult. intercalaire)		1,03 $\pm$ 0.12	0,91	0.4-2.0	1,12

(1) voir 4.2.2.2. pour la définition

(2) unité de bétail tropical ; 1 UBT = 250 kg de poids vif

(3) par exploitation (n'inclut pas les plus vieilles jachères possédées collectivement par le village)

(4) défini comme la somme du nombre de charrues, sarclours et semoirs détenus par l'exploitant. Pour plus de données voir l'Annexe 31.

Le village est composé de 18 exploitations. Parmi les 16 exploitations les plus typiques, une grande disparité des valeurs a été observée, quelles que soient les variables, y compris les moyens de production tels que la terre, la taille des troupeaux (illustré aussi sur la Figure 4.7), et l'équipement. Le rendement en mil a atteint 1,1 tMS de grains ha⁻¹, et celui de l'arachide 1,3 tMS de gousses ha⁻¹. La composante principale (CP) (inertie relative ou IR : 40 %) de l'ACP réalisée sur les variables caractérisant la structure des exploitations a été orientée principalement par la disponibilité en terre ("SP", "SP/Adu") et le bétail ("UBT", "UBT/Adu") sur le demi-axe positif,

par la disponibilité en main d'œuvre rapportée aux besoins alimentaires sur l'exploitation ("UTPm/UNPm") sur le demi-axe négatif (Figure 4.5). La seconde CP (IR : 25 %) a plutôt été un gradient de l'intensité de culture, avec la proportion de jachères (" %SJac") sur le demi-axe positif, et la proportion de cultures de rente (" %SRent") et la disponibilité en cheptel ("UBT", "UBT/Adu") sur le demi-axe négatif. Des corrélations de Spearman particulièrement significatives ont été trouvées entre "UBT" et "SP" (+0,80***), "SP/Adu" et "UTSai/UTTot" (+0,67**), et "UTPm/UNPm" et "UTSai/UTTot" (-0,58*) (Annexe 32). La troisième CP n'a pas donné d'informations claires (Annexe 34a).

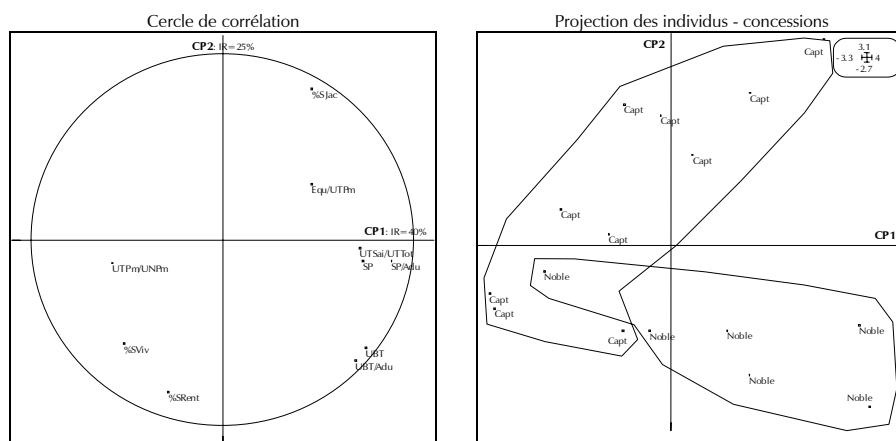


Figure 4.5 Analyse en composantes principales (CP) de la structure de 16 des 18 concessions du village de Sare Yorobana : cercles de corrélation des variables et projection des individus - concessions (1ère et 2ème CP).

« : » signifie « rapport ».

Adu : taille de la population adulte (15 ans et plus). Capt : captif. Equ : équipement (voir 4.2.2.2.). SP : surface possédée. UNPm : unité à nourrir permanente (voir 4.2.2.2.). UBT : taille du troupeau (en unité de bétail tropical). UT : unité de travail (voir 4.2.2.2.). Pm/Sai/Tot : population permanente, saisonnière, totale. %SJac, %SViv, %SRent : parts respectives de surface consacrées à la jachère, aux cultures vivrières et aux cultures de rente (en % de SP).

Données en Annexe 33 et projections sur le plan CP1xCP3 et valeurs propres des composantes principales en Annexe 34.

4.3.3. Stockage de matière sèche, de carbone, d'azote et de phosphore à l'échelle du village

4.3.3.1. Régressions entre rendement en grain et biomasse végétale des champs cultivés

Toutes les cultures ont montré des régressions très significatives ($p < 0,01$) entre le rendement en épi ou gousse et le rendement grain (Tableau 4.4). Les relations ont été très significatives entre le rendement en épi ou gousse et la production de paille. Mais de faibles corrélations ont été trouvées entre le rendement en épi ou gousse et celui en mauvaises herbes, excepté dans les champs de mil. Cependant, une régression simplifiée, sans ordonnée à l'origine a dû être proposée pour les mauvaises herbes dans le mil, afin de construire un modèle cohérent (qui évite des rendements prédits négatifs, par exemple). Les régressions sur la biomasse des petites racines étaient généralement significatives et positives dans l'horizon 0-40 cm, mais aucun modèle linéaire n'a pu être adapté aux données racinaires sur le maïs.

Tableau 4.4 Régressions entre rendements des composantes de la biomasse végétale.
Modèle : $\text{Rendement Composante} = a * \text{Rendement Récolte} + b$.
«Récolte» représente les (1) épis de mil, de sorgho, de riz et de maïs (2) gousses d'arachide.

Composante	a	b	Moyenne	F	R ²	n	Remarque
		(t ha ⁻¹)	(t ha ⁻¹)				
Arachide							
Tige	0,967	0,602	1,07	40,92 ***	0,61	28	
Adventice ligneux	0,366	0,0183	0,353	1,8	0,06	28	Utiliser la moyenne
Adventice herbacée	-0,00579	0,490	0,485	0,0	0,00	28	Utiliser la moyenne
Racine fine	0,153	0,425	0,569	4,5 *	0,17	24	
Racine épaisse							Fixé à 0
Mil							
Paille	3,587	0,231	7,53	16,7 **	0,54	16	
Adventice herbacée	0,770	-0,7477	0,818	10,3 **	0,42	16	Régression utilisée: Grain = 0.628 * Panicule (F:14.7**)
Paille (si intercalé avec maïs)	3,310	0,1408	4,112	9,6 *	0,62	8	
Grain (si intercalé avec maïs)	-0,830	3,318	2,322	0,5	0,08	8	Utiliser la moyenne
Racine fine	0,389	0,123	0,914	5,2 *	0,27	16	
Racine épaisse	0,173	-0,0764	0,275	0,5	0,03	16	Utiliser la moyenne
Maïs							
Paille	0,812	0,877	3,43	53,3 ***	0,79	16	
Adventice herbacée	-0,0152	1,245	1,175	0,0	0,00	8	Utiliser la moyenne
Racine fine	-0,0170	0,397	0,319	0,4	0,06	8	Utiliser la moyenne
Racine épaisse	0,00041	0,0196	0,0215	0,0	0,00	8	Utiliser la moyenne
Sorgho							
Paille	3,404	1,146	9,80	6,9 *	0,54	8	
Adventice herbacée	-0,337	2,124	1,27	1,2	0,17	8	Utiliser la moyenne
Riz							
Paille	0,624	1,462	3,306	16,8 **	0,74	8	
Adventice herbacée	0,073	0,027	0,244	6,0	0,50	8	Utiliser la moyenne
Racine fine	-0,591	5,026	3,277	12,5 *	0,68	8	Valable pour 1.16<Panicule<5.38
Racine épaisse	-0,022	0,132	0,067	15,8 **	0,72	8	Valable pour 1.16<Panicule<5.39

$p\{H_0 : F=0\} : * < 0,05 ; ** < 0,01 ; *** < 0,001$.
Données utilisées pour les régressions en Annexe 35.
Racines fines : diamètre entre 0 et 2 mm. Grosses racines : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises)

4.3.3.2. Les stocks gérables de matière sèche, de carbone, d'azote et de phosphore à l'échelle du village

La biomasse végétale moyenne (aérienne et souterraine jusqu'à 40 cm de profondeur) stockée dans le terroir villageois a été de 37,3 tMS ha⁻¹, sur lesquelles 58 % étaient dans la biomasse aérienne (Tableau 4.5). De grandes variations ont été obtenues entre les UGE. Des stocks plus faibles par hectare ont été trouvés dans l'auréole de case. Ils se sont élevés à seulement 16 % de ceux observés dans l'auréole de brousse, avec les différences les plus importantes dans le sol. La biomasse des arbres a représenté environ 61 à 77 % de la biomasse végétale et a expliqué pourquoi les stocks les plus grands de la biomasse végétale étaient observés dans les parcelles non cultivées (jachères, palmeraie).

Les stocks de carbone moyens étaient de 29,7 t ha⁻¹ (41,1 t ha⁻¹ en incluant les stocks de carbone de l'horizon 20-40 cm) (Figure 4.6a, Tableau 4.5). Les observations réalisées sur la MS de la biomasse végétale s'appliquent ici aussi. Le stockage total s'est élevé à 7607 tC. La distribution verticale dans les principales composantes a été la suivante (en %) : sol (0-20 cm) : 52 ; ligneux aériens : 22 ; souches : 8 ; grosses racines : 8. Spatialement, le stockage a eu lieu surtout dans la partie non cultivée de l'auréole de brousse (57 %), la palmeraie (14 %), la partie cultivée de l'auréole de brousse (14 %) et la rizière (9 %). La densité maximale de carbone a été trouvée dans les rizières (43,7 t ha⁻¹, 94 % dans le sol) et dans les jachères du plateau (38,5 t ha⁻¹, 40 % dans le sol).

Les stocks moyens d'azote ont été de 1,52 t ha⁻¹, essentiellement situés dans le sol (87 %) (Figure 4.6b). La seconde contribution est venue de la BA des arbres, avec 6 % du stock total. Quarante six pour cent des 389 tN stockées dans le village étaient situés dans les jachères de l'auréole de brousse, les principaux autres sites étant surtout les cultures de l'auréole de brousse (21 %), les rizières (16 %) et la palmeraie (11 %). Les stocks maximaux par hectare ont été trouvés dans les rizières (3,85 t, 99 % dans le sol) et dans les jachères des auréoles de brousse et de case (plage de valeurs : 1,46-1,56 t ha⁻¹, 82-88 % dans le sol).

Tableau 4.5 Stocks moyens de MS, de carbone, d'azote et de phosphore dans quelques agroécosystèmes de Sare Yorobana en fonction de l'auréole de gestion et de l'utilisation de la terre (biomasse végétale jusqu'à 40 cm de profondeur, sol jusqu'à 20 cm de profondeur).

a. Matière sèche (t ha⁻¹)

Compartment	Auréole de brousse						Auréole de case						Palmeraie	Champ de riz	Village
	Jachère	Arachide	Coton	Sorgho	Mil	Auréole	Mil	Mil(x maïs)	Mais	Coton	Auréole				
Arbre	28,1	0,1	0,2	0,2	0,1	17,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0 ⁽¹⁾⁽²⁾	0,0	16,6	
Adv. herb./lign.	3,6	0,5	0,0 [†]	1,3	0,7	2,5	0,7	2,3	1,2	0,0 [†]	1,1	3,0 ⁽³⁾	0,2	2,3	
Récolte	-	1,3	1,2	0,7	1,1	0,4	1,1	1,0	1,2	0,9	1,1	-	1,3	0,5	
Paille	-	1,8	1,5 ⁽⁴⁾	3,4	4,1	1,0	4,2	3,4	1,8	1,1 ⁽⁴⁾	3,5	-	2,3	1,2	
Litière	2,1	0,0	0,0 [†]	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0 [†]	0,0	2,1 ⁽⁵⁾	0,0	1,2	
Total aérien	33,8	3,7	3,0	5,5	5,9	22,8	6,0	6,7	4,2	1,9	5,7	35,1	3,9	21,7	
Souche	11,8	2,6	5,1	3,6	1,2	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3 ⁽¹⁾⁽⁶⁾	0,0	6,0	
Racine épaisse	11,3	1,2	2,3	1,9	0,8	7,5	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	5,3 ⁽¹⁾⁽⁶⁾	0,1	6,1	
Racine fine	2,5	0,6	1,0 ⁽⁷⁾	1,0 ⁽⁸⁾	0,5	1,8	0,5	0,5	0,3	0,9 ⁽⁷⁾	0,6	14,7 ⁽¹⁾⁽⁶⁾	4,2	3,4	
Total souterrain	25,5	4,4	8,3	6,5	2,6	17,6	0,8	0,8	0,3	0,9	0,8	20,0	4,3	15,6	
Total	59,3	8,1	11,3	12,0	8,5	40,4	6,8	7,5	4,5	2,8	6,5	55,1	8,2	37,4	

b. Carbone (t ha⁻¹)

Compartment	Auréole de brousse						Auréole de case						Palmeraie	Champ de riz	Village
	Jachère	Arachide	Coton	Sorgho	Mil	Auréole	Mil	Mil(x maïs)	Mais	Coton	Auréole				
Arbre	10,6	0,0	0,1	0,1	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,8 ⁽⁵⁾	0,0	6,5	
Adv. herb./lign.	1,3	0,2	0,0	0,4	0,2	0,9	0,2	0,8	0,3	0,0	0,4	1,1 ⁽⁶⁾	0,1	0,8	
Récolte	-	0,6	0,6	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	-	0,4	0,2	
Paille	-	0,6	0,7	1,3	1,5	0,4	1,5	1,3	0,6	0,5	1,3	-	0,7	0,4	
Litière	0,7					0,4					0,0	0,7 ⁽⁵⁾		0,4	
Total aérien	12,5	1,4	1,4	2,0	2,1	8,5	2,2	2,4	1,4	0,9	2,1	15,6	1,2	8,4	
Souche	4,3	1,0	1,9	1,4	0,5	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	
Racine épaisse	4,1	0,4	0,9	0,7	0,3	2,7	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	2,4 ⁽⁶⁾	0,0	2,3	
Racine fine	0,8	0,2	0,4	0,3	0,2	0,6	0,2	0,2	0,1	0,4	0,2	6,6 ⁽⁶⁾	1,3	1,4	
Total souterrain	15,4	12,1	11,9	11,8	11,7	14,1	15,2	16,8	18,1	14,5	15,9	9,9 ⁽¹¹⁾	41,2	15,4	
Total	24,7	13,7	15,2	14,2	12,7	20,5	15,5	17,0	18,2	14,9	16,2	18,9	42,5	21,3	

c. Azote (kg ha⁻¹)

Compartment	Auréole de brousse						Auréole de case						Palmeraie	Champ de riz	Village
	Jachère	Arachide	Coton	Sorgho	Mil	Auréole	Mil	Mil(x maïs)	Mais	Coton	Auréole				
Arbre	118	5	10	7	2	76	0	0	0	0	0	249	0	86	
Adv. herb./lign.	23	5	0	16	9	17	9	30	18	0	15	20	2	16	
Récolte	-	37	21	8	13	10	14	12	14	15	14	-	8	9	
Paille	-	31	26	9	11	8	11	9	15	18	12	-	9	8	
Litière	11	-	-	-	-	7	-	-	-	-	0	11 ⁽⁵⁾	-	6	
Total aérien	152	78	57	41	35	117	34	51	47	33	41	279	20	125	
Souche	46	9	18	12	4	32	0	0	0	0	0	0	0	23	
Racine épaisse	43	4	8	8	5	29	3	3	0	0	2	42 ⁽¹⁾	1	27	
Racine fine	20	10	10	10	6	16	6	5	4	9	6	118 ⁽¹⁾	32	29	
Total souterrain	1282	989	989	989	989	1173	1263	1451	1611	1175	1341	860 ⁽¹¹⁾	3796	1314	
Total	1391	1012	1024	1020	1003	1249	1272	1459	1615	1184	1350	1020	3829	1392	

d. Phosphore (kg ha⁻¹)

Compartment	Auréole de brousse						Auréole de case						Palmeraie	Champ de riz	Village
	Jachère	Arachide	Coton	Sorgho	Mil	Auréole	Mil	Mil(x maïs)	Mais	Coton	Auréole				
Arbre	13,8	0,5	1,0	0,7	0,2	8,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	nd	0,0	7,3	
Adv. herb./lign.	2,1	0,3	0,0	2,3	1,2	1,6	1,3	4,2	4,5	0,0	2,3	nd	0,5	1,6	
Récolte	-	2,2	3,9	1,6	2,6	0,9	2,6	2,4	2,4	2,7	2,5	-	1,8	1,1	
Paille	-	1,5	6,9	2,3	2,8	1,0	2,8	2,3	3,6	4,8	2,9	-	2,2	1,2	
Litière	0,0					0,0					0,0	nd		0,0	
Total aérien	16,0	4,6	11,7	7,0	6,8	12,3	6,7	8,9	10,5	7,5	7,7	0,0	4,5	11,3	
Souche	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	nd	0,0	1,7	
Racine épaisse	3,5	0,2	0,5	0,5	0,3	2,3	0,2	0,2	0,0	0,0	0,2	nd	0,1	1,9	
Racine fine	1,1	0,4	4,4	0,7	0,4	1,0	0,4	0,4	0,2	4,0	0,7	nd	2,3	1,0	
Total souterrain	7,2	6,4	6,4	6,4	6,4	6,9	24,3	37,9	49,5	17,9	30,0	nd	56,3	12,7	
Total	14,9	7,0	11,2	7,6	7,1	12,2	24,9	38,5	49,8	21,9	30,8	nd	58,6	17,3	

Racines fines : diamètre entre 0 et 2 mm. Grosses racines : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises)

† fixé à 0

‡ teneur en carbone fixée à celle du mil

*** palmeraie non comprise**

Sources : (1) Dufrene et al., 1990 ; (2) Jaffre, 1984 ; (3) Blanfort, 1991 ; (4) Déat et al., 1976 ; (5) Chapitre 1 ; (6) Jacquemard, 1995 ; (7) Poulain, 1977 ; (8) Chopart, 1980 ; (9) taux de carbone pour toutes les composantes provenant de (6) ; (10) teneur en carbone fixée à celle de la biomasse herbacée des jachères de 1 à 9 ans donné dans le Chapitre 1 ; (11) Baldensperger et al (1967) et Annexe 4 ; (12) tous les taux de P total proviennent de (4).

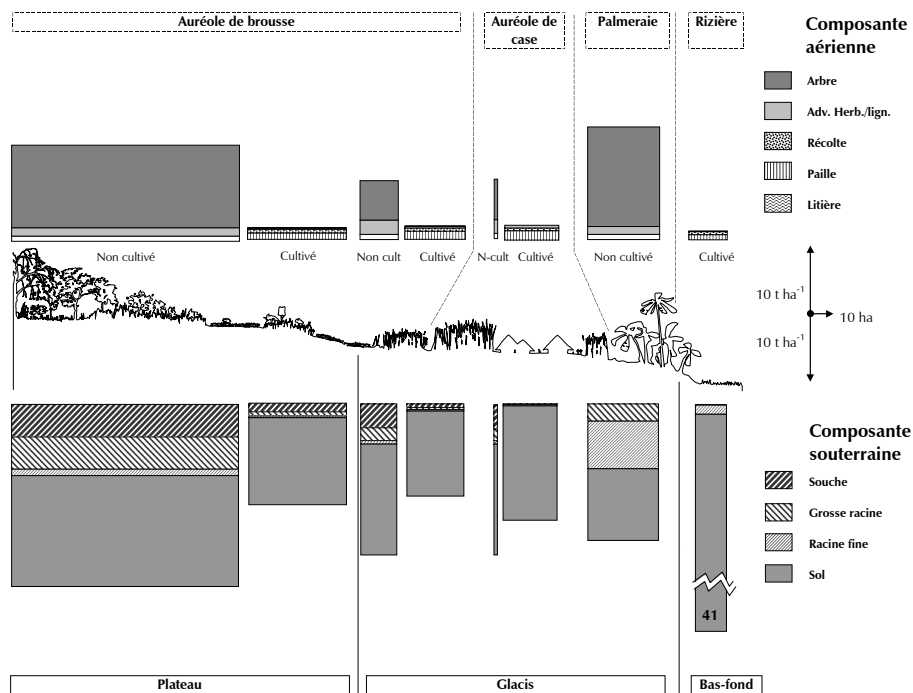


Figure 4.6a Stocks de carbone dans la biomasse végétale et dans le sol du terroir villageois de Sare Yorobana en fonction de la géomorphologie, de l'auréole et de l'utilisation de l'espace (cultivée, non cultivée).

Echelle horizontale : surface du système de gestion de l'espace. Echelle verticale : stock d'éléments par hectare. Ainsi, le stock de chaque composante de chaque unité est proportionnel à la surface du rectangle correspondant. Racines fines : diamètre entre 0 et 2 mm. Grosses racines : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises). Données en Annexe 36a.

Les stocks de phosphore (P_{total} dans la biomasse végétale plus POD dans le sol ; palmeraie non incluse) ont montré des schémas de distribution verticale et horizontale un peu différents (Figure 4.6c). Les stocks moyens ont atteint $28,6 \text{ kg ha}^{-1}$ dans l'ensemble du terroir villageois. Les principaux réservoirs de P ont été le sol (44 %) et la BA des arbres (26 %). La part stockée entre les autres composantes n'a pas excédé 10 %. Quoique faible (4 % restant), la contribution de la biomasse récoltée (épi et gousse) a été quatre fois plus grande quand elle était exprimée en stocks de P que calculée en stocks de C ou N. Le principal réservoir a été trouvé dans les jachères de l'auréole de brousse (56 %), dans les champs de riz (16 %), dans les parcelles cultivées de l'auréole de brousse (15 %) et dans l'auréole de case (14 %). Les densités spatiales maximales en P ont été observées dans le riz ($63,2 \text{ kgP ha}^{-1}$, 89 % dans le sol), dans les champs de case ($38,5 \text{ kgP ha}^{-1}$, 78 % dans le sol), et dans les jachères du plateau ($32,5 \text{ kgP ha}^{-1}$, 22 % dans le sol).

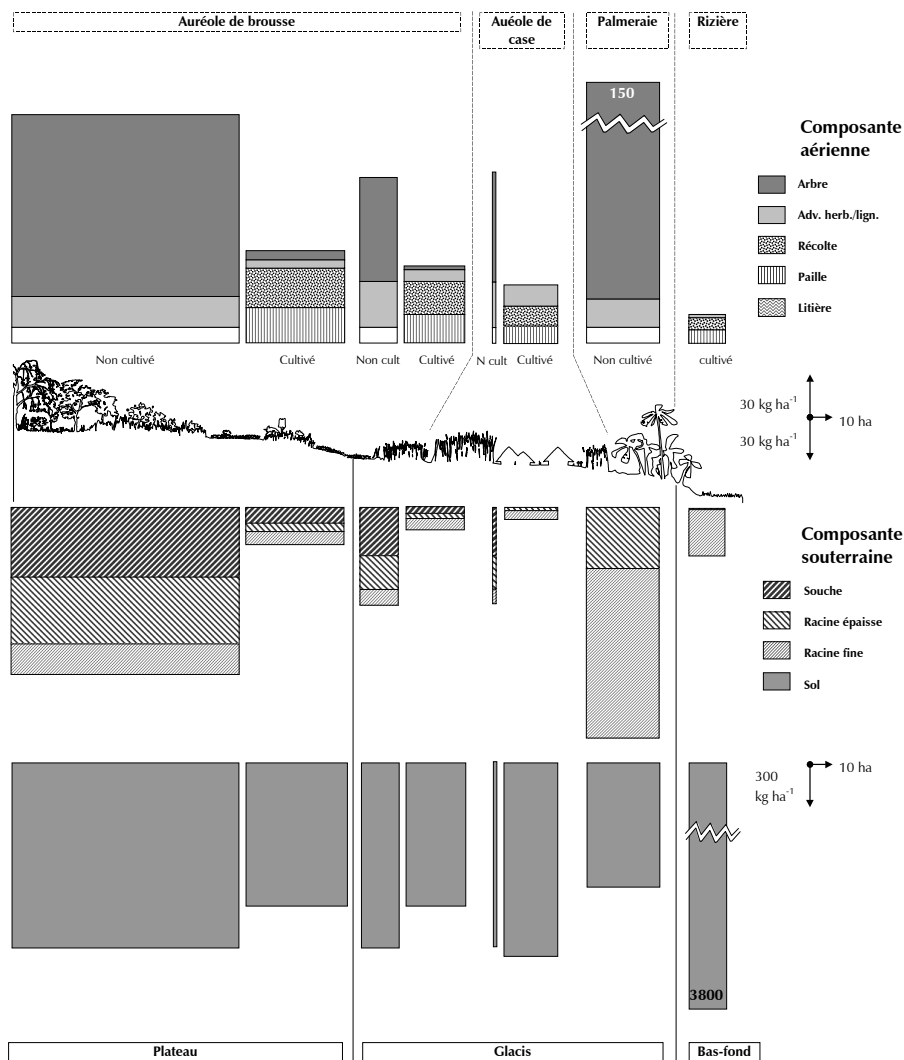


Figure 4.6b Stocks d'azote dans la biomasse végétale et le sol du terroir villageois de Sare Yorobana en fonction de la géomorphologie, de l'auréole et de l'utilisation de l'espace (cultivée, non cultivée).

Echelle horizontale : surface du système de gestion de l'espace. Echelle verticale : stock d'éléments par hectare. Ainsi, le stock de chaque composante de chaque unité est proportionnel à la surface du rectangle correspondant.

Racines fines : diamètre entre 0 et 2 mm. Grosses racines : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises).

Données en Annexe 36b.

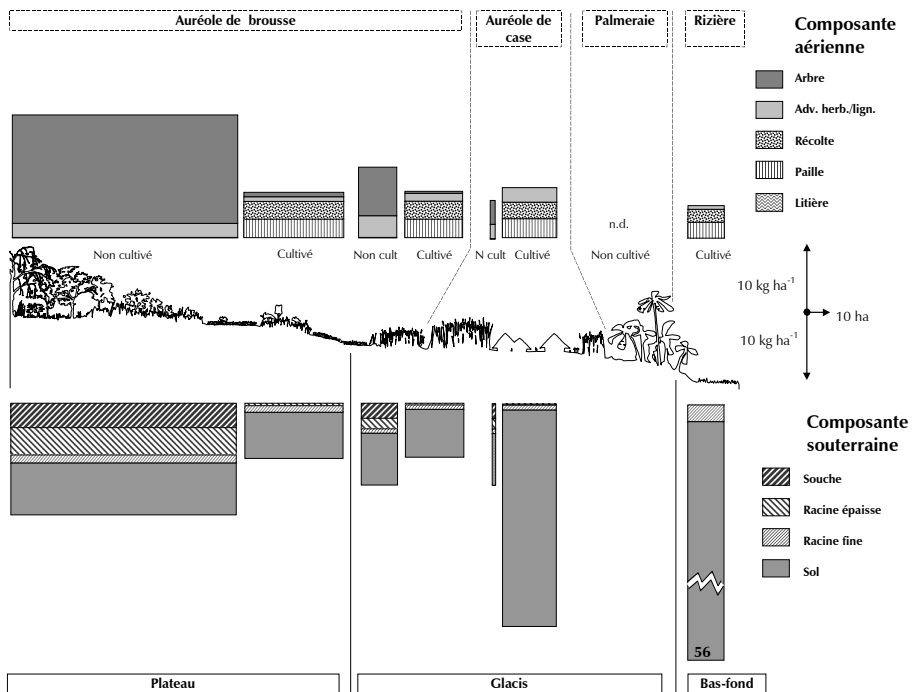


Figure 4.6c Stocks de phosphore dans la biomasse végétale et dans le sol du terroir villageois de Sare Yorobana en fonction de la géomorphologie, de l'auréole et de l'utilisation de l'espace (cultivée, non cultivée).

Echelle horizontale : surface du système de gestion de l'espace. Echelle verticale : stock d'éléments par hectare. Ainsi, le stock de chaque composante de chaque unité est proportionnel à la surface du rectangle correspondant..

Racines fines : diamètre entre 0 et 2 mm. Grosses racines : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises).

Sol : P_{OD} assimilable seulement.

Données en Annexe 36c.

4.3.3.3. Un bilan agropastoral simplifié

Le potentiel d'autosuffisance pour les besoins en fumier et en fourrage pour les 17 exploitations a beaucoup varié et était lié à la taille du troupeau (Figure 4.7). Six des concessions, chacune possédant au moins 30 UBT, ont pu satisfaire leur besoin en fumier pendant la saison de culture 1997. Cependant, les plus gros éleveurs n'étaient pas autosuffisants quant à leur besoin en fourrage. Finalement, seules cinq exploitations ont produit assez de fumier et de fourrage pour satisfaire à leurs besoins.

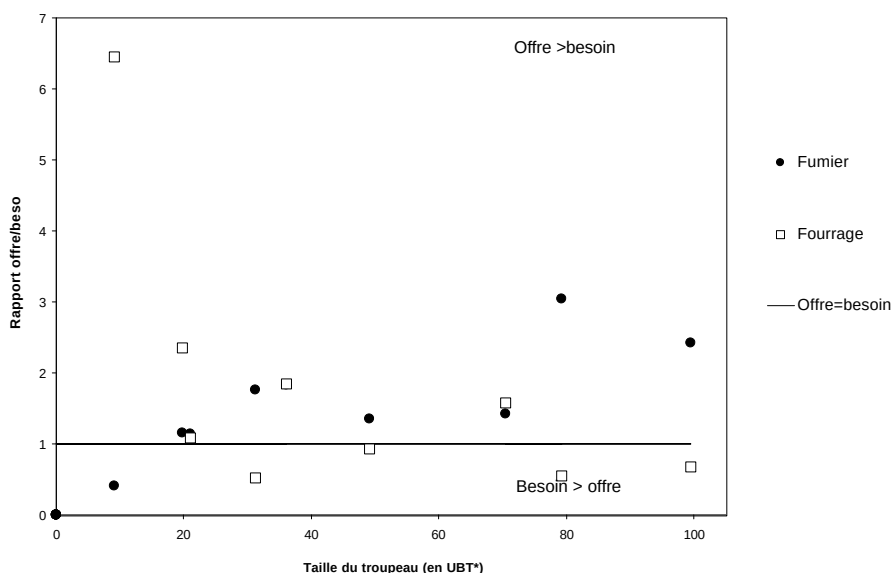


Figure 4.7 Taux d'autosuffisance en fumier et disponibilité en fourrage dans les exploitations de Sare Yorobana selon un bilan agropastoral simplifié.

* unité de bétail tropical = 250 kg de poids vif.

Données en Annexe 37.

4.3.3.4. Impact de la relation entre intensité de culture et biomasse ligneuse sur le bilan de carbone du terroir

Diminuer de 10 % le seuil initial (0,75) de l'intensité de culture, utilisé pour estimer les stocks de biomasse des adventices ligneuses dans les champs de culture, n'a pas modifié de plus de 7 % les différents termes du bilan de carbone de l'auréole de culture (Figure 4.8). Cependant, l'augmenter de 10 % a conduit à un accroissement de 15 % de la biomasse ligneuse, de 7 % de l'ensemble de la biomasse végétale, et de moins de 1 % du stock de carbone de tout l'écosystème cultivé. En incluant la surface non cultivée, les variations n'ont pas excédé 2,5 %, quels que soient les hypothèses et le réservoir considérés.

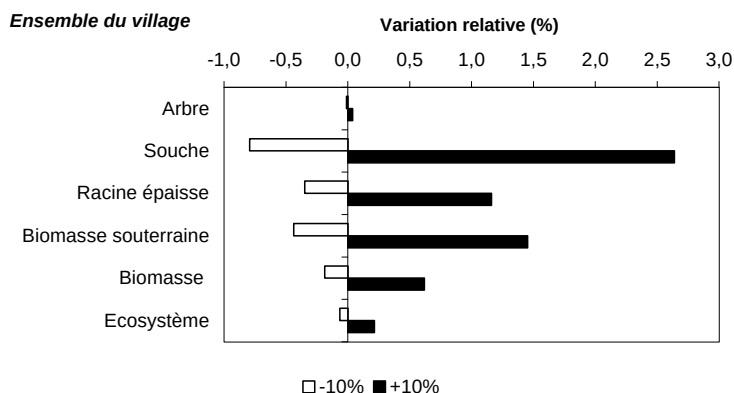
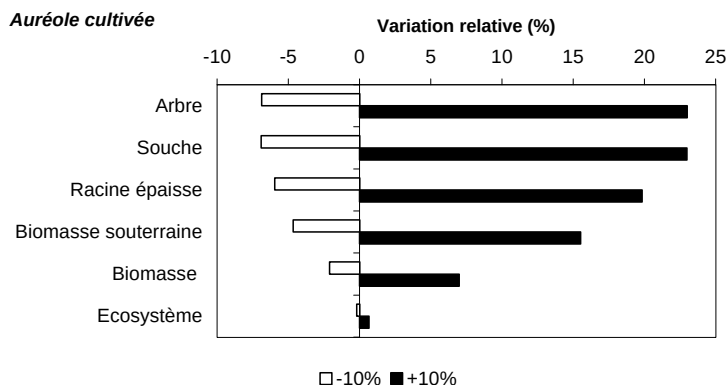


Figure 4.8 Analyse de sensibilité sur le calcul du stockage du carbone en fonction du seuil de l'intensité de culture déterminant la biomasse des adventices ligneuses dans les champs cultivés : impact d'une variation de plus ou moins 10 % de ce seuil sur les estimations des stocks de carbone.

Données en Annexe 38.

4.3.4. Perspectives sur les futurs stocks de carbone

4.3.4.1. Utilisation de l'espace

Dans le scénario de base, les jachères âgées disparaîtraient dans 15 ans (date initiale : 1997), et aucune jachère ne se maintiendrait après 2027 (Figure 4.9). La surface en arachide, et donc la satisfaction des besoins en trésorerie, pourraient être conservées pendant 48 ans. Une augmentation de 100 % du rendement de céréale permettrait de garder les jachères pendant 15 années supplémentaires. Un accroissement du rendement en céréale et du niveau de vie de 30 % conduirait à une disparition plus rapide des jachères que dans le scénario initial, alors qu'un accroissement de 100 % du rendement en céréale compenserait une augmentation de 30 % des revenus des agriculteurs (Annexe 39).

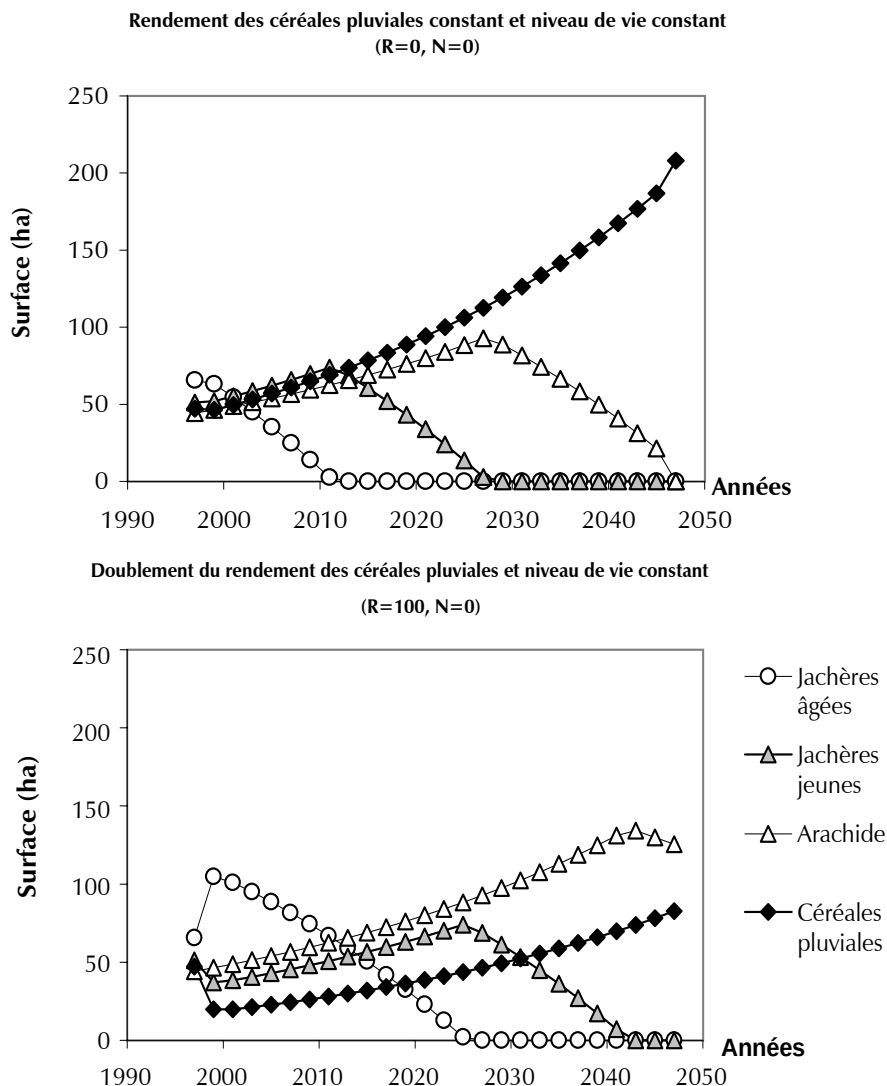


Figure 4.9 Evolution de l'utilisation de l'espace dans le village de Sare Yorobana pour la période 1997-2047 selon un modèle statique (voir description dans le texte).
Jachères jeunes : 0-9ans. Jachères âgées : 10 ans ou plus.
Données en Annexe 39.

4.3.4.2. Stockage du carbone dans le système villageois

Les stocks de carbone dans la BA et la BS végétales aussi bien que dans l'ensemble du terroir villageois devraient enregistrer des chutes importantes dans les prochaines décennies (Figure 4.10). Dans le scénario de base (aucun changement dans les performances des cultures ni dans les besoins

alimentaires ou en trésorerie) les stocks de carbone dans la BA pourraient baisser de 75 % en 31 ans, soit une perte de $0,19 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Au-delà de cette période, un léger accroissement devrait apparaître, à hauteur de $0,02 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ stable pendant 17 ans avant qu'un équilibre ne soit atteint. Le carbone de la BS pourrait chuter de 84 % en 2046. La perte annuelle serait de $0,20 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pendant les 15 prochaines années, s'abaissant encore à $0,09 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ durant les 16 suivantes. Les pertes totales de carbone du système (y compris celles du sol) s'élèveraient à 38 % jusqu'à 2028, avec une légère remontée à partir de cette date. Cela signifierait une diminution de $0,38 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pendant 31 années, avec seulement $0,04 \text{ tC}$ venant du sol. Une augmentation du rendement en céréales ou du niveau de vie de 30 % ne changerait pas les stocks totaux en carbone au-delà d'une durée de 37 ans, mais elle changerait la vitesse à laquelle un état stable serait atteint et ainsi le niveau d'émission de carbone. Par exemple, dans les cinq scénarios, les pertes annuelles en carbone du système plante-sol pendant la période 1997-2012 seraient de (en $\text{tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) :

- témoin : 0,50,
- rendement +30 % : 0,29,
- rendement +100 % : 0,03,
- rendement +30 % avec niveau de vie +30 % : 0,58,
- rendement +100 %, niveau de vie +30 % : 0,39.

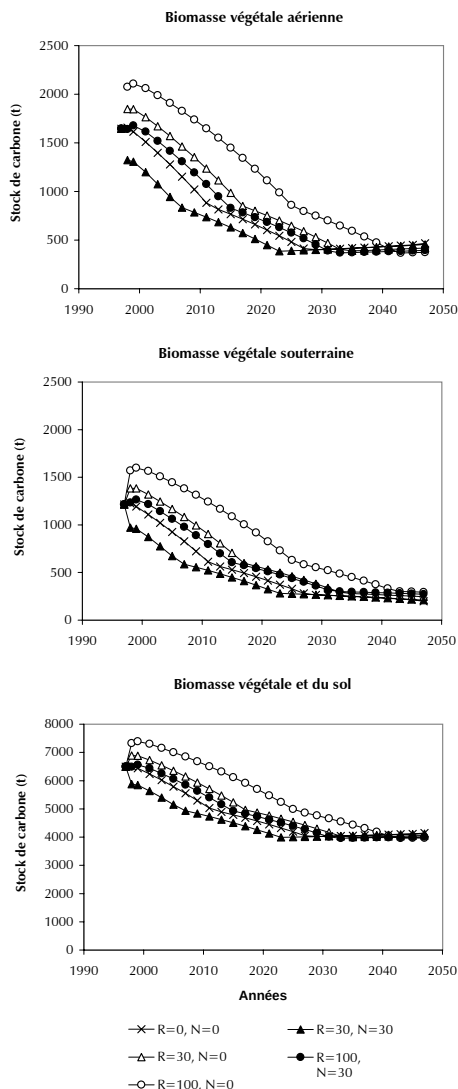


Figure 4.10 Evolution du stock de carbone dans le système plante-sol du terroir villageois de Sare Yorobana pour la période 1997-2047 prédite par modélisation (voir description dans le texte).

«R» = accroissement relatif (%) du rendement en céréale par rapport à la valeur de 1997.

«N» = accroissement relatif (%) du niveau de vie par rapport à la valeur de 1997.

Données en Annexe 40.

4.4. DISCUSSION

4.4.1. Organisation sociale et dynamique du système de production

Du fait de l'histoire autant que de savoirs différents (les Peulhs sont des éleveurs) l'élevage chez les Peulhs est géré principalement par la caste noble (Pélissier, 1966 ; Fanchette, 1999b). Deux autres critères sociaux, qui influencent le fonctionnement des systèmes de production dans les exploitations nobles, et résultent d'un niveau d'éducation plus élevé chez les nobles que dans les lignages des captifs, sont : de plus forts besoins monétaires et des migrations fréquentes des jeunes vers la ville. Subvenir à des besoins élevés en nourriture et en trésorerie avec une main d'œuvre limitée est donc une contrainte pour la reproductibilité des systèmes de production des lignages nobles. Ces contraintes sont généralement évitées grâce à l'élevage qui permet : (1) un fort potentiel de fumure et ainsi de bons rendements en céréales pour un faible coût en travail, (2) un bon approvisionnement en force de travail animal, ce qui est crucial à certains moments du calendrier agricole comme les labours, les semis et les sarclages, (3) un fond de capital minimum permettant d'obtenir un meilleur équipement et l'emploi d'une main d'œuvre saisonnière. Les lignages des captifs comptent plutôt sur une importante main d'œuvre permanente, et sur la pratique de la jachère (qui est spatialement complémentaire de la fumure ; Figure 4.4). L'épandage de fumier pendant la divagation diurne des troupeaux est la compensation limitée offerte par les gros éleveurs aux plus petits. Une preuve de la valeur agronomique qu'accordent les agriculteurs à ce type d'accord est apportée par l'interdiction ferme de prélever des résidus de culture d'une parcelle d'un voisin afin de nourrir son propre cheptel à la ferme. L'échange reste déséquilibré du point de vue des éléments minéraux, car les gros éleveurs maintiennent la santé de leurs animaux -qui sont leur capital et leur moyen de production- à moindre coût, grâce à l'existence d'une ressource créée par le travail de ceux qui ne possèdent que quelques animaux, ou même aucun (Figure 4.7). Ceci a aussi été rapporté par Dugué (1985) dans une région plus sèche de l'Afrique de l'Ouest.

Cependant, le rapport de force entre les exploitations qui possèdent le fourrage et celles qui possèdent les animaux, pourrait être inversé dans le futur. La privatisation de la terre et des ressources organiques habituellement observée lorsqu'il y a une augmentation de la densité de population, remet invariablement en question la pratique de la vaine pâture et conduit vers une réduction du cheptel (Lericollais and Milleville, 1993 ; Dugué, 1998b). Tout programme de développement visant à intensifier l'élevage, notamment par l'usage de la stabulation, devrait prendre en compte les modifications possibles qu'il implique sur les règles traditionnelles de gestion collective de la matière organique à l'échelle du village.

4.4.2. Interrelations entre les fonctions agroécologiques des systèmes de gestion de l'espace et leur statut en carbone, en azote et en phosphore en début de saison sèche

Chacun des quatre principaux systèmes de gestion de l'espace identifiés dans le village de Sare Yorobana (auréoles de brousse et de case, palmeraie et rizières) joue un ou plusieurs rôles spécifiques dans le système de production défini par le village. Ces rôles sont révélés par l'organisation spatiale de la gestion des terres et par les distributions verticales et horizontales de C, N et P.

4.4.2.1. L'auréole de brousse

Parce que c'est la plus éloignée des habitations et parce que sa tenure foncière n'est pas fixée, l'auréole de brousse ne reçoit qu'une faible attention quant à la gestion de sa fertilité, comme en témoigne une fumure rare (voir Chapitre 5). La fertilité des parcelles repose presque entièrement sur la pratique de la jachère qui restaure le statut énergétique et minéral du sol, développant ainsi l'activité biologique, et qui permet le contrôle des mauvaises herbes et des maladies. L'amélioration de la qualité des sols peut être rapide après l'abandon des cultures, à condition que de longues périodes de jachère soient maintenues, pour garantir l'aptitude de la végétation ligneuse à rejeter. Cependant, les jachères ne sont pas forcément liées aux problèmes de fertilité. Les parcelles de jachère qui ne résultent pas d'un mouvement des habitations vers le bas-fond, il y a une vingtaine d'années, peuvent aussi jouer le rôle de réserves de terres, jusqu'à ce que davantage de main d'œuvre et de semences soient disponibles dans les exploitations. L'auréole de brousse abrite seulement un tiers des céréales vivrières, mais presque toutes les cultures de rente (arachide et coton) (Tableau 4.2). Les cultures de rente sont gérées individuellement par chaque ménage et non en communauté au sein de l'exploitation. L'auréole de brousse est le plus grand réservoir de carbone du village, non seulement parce qu'elle est la plus grande UGE, mais aussi à cause des quantités importantes de biomasse ligneuse aérienne et souterraine (Figure 4.6a). Cette biomasse représente la principale source de bois de chauffe pour le village. Les ressources fourragères de qualité se trouvent dans les jeunes jachères uniquement. Cependant, le feuillage vert des arbres des jachères les plus âgées a une forte valeur qualitative en fin de saison sèche, quand la biomasse herbacée ne contient presque plus d'azote (Richard et al., 1991). La valeur nutritive des résidus de culture (quantité, qualité) repose sur le type de plante considéré (comme dans le cas du stock d'azote dans la biomasse des cultures ; voir Tableau 4.5). Les céréales fournissent de grands volumes de faible qualité, alors que les tiges d'arachide, ne donnant que de faibles rendements comparés au mil, sont riches en azote (Figure 4.6b). Elles sont donc récoltées et utilisées comme complément alimentaire pour les ovins, les veaux et les bœufs pendant la saison sèche. L'adoption

du coton, introduit en 1997 à Sare Yorobana aux dépens des arachides, pourrait entrer en conflit avec l'élevage, puisque les résidus du coton ont une faible valeur minérale, et sont même toxiques du fait de l'application de produits chimiques pour la protection des cultures.

4.4.2.2. L'auréole de case

Des gradients positifs d'investissement dans la fertilité, dans le travail et dans la sécurisation foncière, sont observés de l'auréole de brousse vers l'auréole de case, comme l'ont signalé Prudencio (1993) au Burkina Faso et Peters et Schulte (1994) en Gambie. La principale fonction de l'auréole de case est d'assurer la sécurité alimentaire des agriculteurs. Une production alimentaire stable est permise par une gestion intensifiée de la fertilité, essentiellement grâce à des pratiques organiques comme la fumure pendant le parage nocturne et la divagation diurne, l'épandage d'ordures ménagères, mais aussi grâce au recyclage des cendres des foyers de cuisine. Un choix minutieux est réalisé au semis entre trois céréales (maïs, mil et sorgho) afin de surmonter la période de soudure en fin de saison sèche *"lorsque les réserves alimentaires sont au plus bas et que la demande énergétique est maximale"* (Prudencio, 1993). Le maïs a le cycle de croissance le plus court, et les plus grandes exigences en nutriments. Il est donc semé à proximité des habitations, où les propriétés chimiques du sol sont les meilleures et le soin aux plantes plus facile (Figure 4.3). Le choix de la culture pure ou de la culture intercalaire avec le mil dépend de la fumure précédente. Au début de la saison sèche, les stocks de carbone et d'azote dans le sol ne sont que légèrement plus élevés dans l'auréole de case que dans l'auréole de brousse. C'est probablement une conséquence de la décomposition massive des apports organiques pendant la saison humide. Cependant, les stocks souterrains de P de l'auréole de case sont plus importants que dans toutes les autres UGE, excepté dans les rizières (Figure 4.6c). Ceci résulte de l'installation de flux de matière organique des surfaces périphériques vers l'auréole de case sous la forme de fumure animale et de la récolte des céréales et du bois (voir Chapitre 5). Comme dans l'auréole de brousse, les résidus de culture et les mauvaises herbes représentent des réservoirs importants d'azote et de phosphore comparé à leur biomasse. Leur teneur élevée en éléments minéraux explique dans une certaine mesure pourquoi ils constituent le fourrage le plus apprécié par le bétail, et pourquoi les champs de case sont pâturés en priorité par rapport aux autres UGE au début de la saison sèche.

4.4.2.3. La palmeraie

Bien que spatialement restreint, la palmeraie abrite une quantité importante de bois de construction et de fourrage. Cependant, du fait de la pauvreté chimique des sols, le fourrage est de faible qualité nutritive et n'est disponible que pendant la saison sèche. Les palmiers fournissent de l'huile, et leur utilisation comme bois de feu est donc limitée. Cette UGE n'est guère

susceptible d'être convertie en culture du fait des contraintes de sol (fertilité chimique et sensibilité à l'érosion), mais des vergers pourraient progressivement remplacer la palmeraie vieillissante.

4.4.2.4. Les rizières

Avec la palmeraie, cette UGE rompt avec le modèle traditionnel concentrique d'utilisation de l'espace observé dans la plupart des systèmes de production des savanes ouest-africaines. Les rizières représentent l'autre coffre-fort alimentaire du village. Chaque année, elles fournissent une production alimentaire stable à des coûts en travail et en gestion de la fertilité relativement faibles, grâce à la fertilité naturelle du sol et à la fourniture gratuite d'eau et de nutriments pendant la saison inondée. Cependant, la production de riz pour l'autoconsommation n'est disponible qu'en décembre du fait du long cycle de croissance des variétés locales de riz. Des faibles teneurs en azote et phosphore et de forts taux de silice font du riz un fourrage de faible qualité ; mais la repousse herbacée durant quelques semaines après la fin des pluies, grâce à la nappe phréatique très proche, explique pourquoi les rizières sont très fréquentées par le bétail pendant la saison sèche (voir Chapitre 5).

4.4.3. Une capacité de stockage du carbone du système de production villageois actuellement limitée

Comparer les stocks de carbone calculés dans cette étude avec d'autres sites de savanes anthropisées est difficile du fait du manque d'études conduites à la même échelle et du fait de l'amplitude des profondeurs jusqu'auxquelles les stocks de carbone ont été calculés. Par exemple, Woomer *et al.* (1998) ont noté des stocks de C de 70 t ha⁻¹ dans les systèmes de production des hautes terres d'Afrique de l'Est, ce qui est 2,4 fois supérieur à nos résultats. Le rapport n'est plus que de 1,6 lorsque sont comparées les moyennes de BA (8 tC ha⁻¹ dans notre étude). Cependant, la pertinence de la comparaison est limitée par le manque d'indications données par Woomer et ses collègues sur les échantillons de profondeur, l'utilisation de l'espace, la composition de la végétation et les propriétés du sol. Les stocks de carbone dans la biomasse végétale des parcelles non cultivées du terroir villageois (21,7 tC ha⁻¹) sont faibles comparés à ceux rapportés par Tiessen *et al.* (1998) dans les savanes et les forêts sèches du monde (50 t C ha⁻¹). Cependant, Woomer (1993) rapporte des stocks de carbone similaires dans la biomasse végétale des forêts sèches de Miombo (27 tC ha⁻¹) et dans les savanes sèches feuillues (22,4 tC ha⁻¹) du sud de l'Afrique, et nos résultats s'élèvent à 62 % de l'estimation moyenne donnée par Adams (1997) pour les écosystèmes de savanes préanthropogènes. Chose prévisible, nos stocks de carbone dans la biomasse végétale ont été supérieurs à ceux trouvés par Tiessen *et al.* (1998) dans les savanes plus sèches et plus dégradées du Centre Sénégal (2,8-5,6 tC ha⁻¹ dans les systèmes non cultivés, 0,7-5,1 tC ha⁻¹ dans les champs en culture, sachant

que la part du carbone dans la biomasse végétale a été de 40 %). Les valeurs de capacité de séquestration du carbone des sols sableux de Sare Yorobana restent faibles comparées à celles observées sous d'autres climats tropicaux secs -sans parler des climats humides- du monde. Ceci suggère des perspectives limitées d'amélioration quantitative du statut carboné dans les agroécosystèmes soudaniens. Un stockage plus rapide et plus important du carbone pourrait avoir lieu dans la biomasse ligneuse. Les stocks de carbone subsistant encore dans les savanes sont les principaux réservoirs d'énergie facilement disponibles, d'éléments minéraux, de matériaux de construction et de biens économiques. Fixer la population dans les savanes, grâce à une meilleure gestion de ces réservoirs, devrait constituer une stratégie prometteuse afin de freiner les migrations vers des dépôts de carbone plus fragiles, comme les forêts humides (Brown and Lugo, 1990).

L'organisation sociale communautaire du travail et de l'utilisation des terres, les politiques nationales actuelles de tenure foncière et le besoin en terre en Afrique de l'Ouest pourraient freiner l'efficacité des programmes de gestion destinés à restaurer la ressource en carbone, en comparaison de ce qui pourrait être attendu en Afrique de l'Est (Woomer *et al.*, 1998). L'évolution vers une sécurisation foncière devrait aider à la restauration de la biomasse végétale et donc des stocks de carbone et d'éléments minéraux des systèmes de production de Haute-Casamance comme d'Afrique subsaharienne, pour les raisons suivantes (Izac, 1997a) : (1) elle ralentirait la coupe des jachères et l'extensification des cultures qui correspondent à un moyen pour les habitants d'étendre leurs droits sur la terre, comme les lois nationales sur la tenure foncière les y autorisent souvent en Afrique de l'Ouest (2) elle permettrait la stimulation des investissements dans les plantations pérennes favorisant la séquestration du carbone tout en assurant aux agriculteurs la possibilité de bénéficier de produits (bois, fourrage, fruits) et de services (fertilité des sols, ombrage) fournis par des jachères plantées améliorées, des haies vives, des vergers, des arbres dispersées dans les champs ou des investissements pour la conservation des sols.

4.4.4. Evolution future des stocks de carbone

Les stocks de carbone devraient, selon les simulations, montrer trois étapes d'évolution liées à la dynamique de gestion des terres (Figure 4.9 et Figure 4.10). La diminution initiale rapide des stocks de carbone (9-25 ans) résulterait de la conversion des jachères âgées en jeunes jachères et de chutes importantes des stocks de carbone dans les arbres et la biomasse racinaire fine. Pendant ce temps, les sols contribueraient peu à la variation, et seulement dans les jachères jeunes remplacées par des cultures de rente

(Chapitre 2). La pente de la courbe du carbone total devrait alors remonter ; elle resterait cependant négative puisque les jeunes jachères disparaîtraient au bénéfice des cultures vivrières et de rente, impliquant la coupe de la végétation secondaire naturelle, la décomposition des souches et des racines et la minéralisation du carbone organique du sol. La troisième étape de l'évolution correspond au remplacement des cultures de rente par des cultures vivrières. Le léger accroissement des stocks de carbone résulterait d'un plus grand stockage de la biomasse végétale dans les cultures de céréales que dans celles d'arachide, et d'un meilleur statut du sol des champs de céréales fumés, puisque la disponibilité du fumier par unité de surface cultivée augmente.

Une atténuation significative de la disparition du carbone pourrait résulter d'une amélioration des rendements en céréales dans des limites raisonnables, selon nos résultats. Cependant, une telle amélioration repose surtout sur des subventions à l'achat d'engrais et sur les politiques d'investissement rurales, c'est à dire sur des décisions prises à un niveau sur lequel les agriculteurs n'ont aucun contrôle. Le niveau de vie des habitants provient plutôt de choix locaux, et pourrait avoir une grande influence sur le bilan de carbone du système de production. Etant donné le contexte socioéconomique et démographique des SOA, et la polyvalence du carbone comme ressource des populations locales, la raréfaction du carbone dans la région devrait bien sûr être considérée d'abord comme indicateur de la perte de santé et de viabilité des systèmes agricoles (Woomer *et al.*, 1998).

Cependant, dans une perspective de changement global, le changement de gestion des terres dans les SOA ne devrait pas compter pour beaucoup dans les rejets anthropogéniques globaux de carbone atmosphérique (Houghton, 1995). Les valeurs des émissions nettes de carbone simulées ici (0,03 à 0,58 tC ha⁻¹ an⁻¹) pendant les dix premières années sont plus élevées que celles estimées par Woomer (1993) pour une gamme de systèmes de culture similaires en Afrique méridionale tropicale sèche (0,07-0,17 tC ha⁻¹ an⁻¹). Quoi qu'il en soit, ils sont plus bas que les taux de rejets de carbone évalués en conditions tropicales humides comme dans le sud du Cameroun (1,2 tC ha⁻¹ an⁻¹ entre 1973 et 1988 selon Kotto-Same *et al.*, 1997), le décalage venant surtout des différences de stocks de carbone dans la biomasse végétale initiale. La pertinence de ces comparaisons repose évidemment autant sur les modèles de séquestration du carbone à l'échelle de la parcelle que sur la part respective des parties cultivées et non cultivées dans les zones considérées.

Un affinement du modèle serait nécessaire pour une meilleure interprétation des résultats de la simulation qui manque de réalisme, notamment pendant la courte phase suivant la modification initiale du rendement en céréales. Prendre en compte la complexité spatiale et fonctionnelle nécessite un passage à un outil plus flexible tel que la modélisation orientée objet (voir Chapitre 5 pour une discussion sur le sujet).

4.4.5. Considérations méthodologiques sur l'estimation des bilans de carbone et d'éléments minéraux à l'échelle du village

Les bilans de carbone et d'éléments minéraux manquent encore à l'échelle du village en Afrique (Prudencio, 1993 ; Stoervogel *et al.*, 1993a). Une des plus importantes contraintes pour leur obtention est d'ordre méthodologique. L'agriculture traditionnelle en Afrique de l'Ouest repose encore sur la diversification des espèces plantées et des pratiques agricoles, et sur la conservation des niches agroécologiques (Olasantan, 1999). L'hétérogénéité des sols (inhérente et biologiquement induite), la physionomie de la végétation et les rendements des cultures impliquent des plans d'échantillonnage précis, intensifs, et l'utilisation de régressions liant des variables facilement mesurables sur le terrain à la valeur des composantes de la biomasse végétal et des stocks du sol. Etablir des régressions demande du travail et des financements. D'où la discussion suivante sur la pertinence de l'application de nos résultats à d'autres sous-régions de l'Afrique subsaharienne.

4.4.5.1. Obtention des stocks de carbone, azote et phosphore dans les champs cultivés

Plusieurs facteurs influencent la production des cultures et des mauvaises herbes, qui peuvent restreindre l'application des régressions établies dans les cultures à d'autres endroits, à des années différentes (Powell, 1984). Parmi eux il y a : l'origine des cultivars, les propriétés du sol, le climat, les maladies et les mauvaises herbes. Cependant, aucune influence significative des maladies ou de mauvaises herbes comme *Striga hermonthica* n'a été notée, et ce quelles que soient les placeaux de mesure. Les données climatiques ont indiqué des précipitations normales pendant les années de mesure (Figure 4.1). Les sols ferrugineux sableux locaux sur lesquels toutes les plantes sauf le riz ont été cultivées sont fréquents dans la sous-région, et font que l'utilisation des relations pourrait être étendue à une zone plus vaste. La variabilité intraspécifique pourrait limiter plus sérieusement l'extrapolation de nos résultats. Cependant, les variétés (ou les mélanges de variétés dans le cas des cultures vivrières traditionnelles) semées dans des zones aux conditions de climat et de sol proches, sont susceptibles de rester phénotypiquement similaires, car les itinéraires techniques traditionnels à faibles intrants sont assez stables dans la sous-région. Dans des conditions comparables de sol et de climat, Egharevba (non daté) a observé des valeurs de biomasse pour le mil très proches de nos résultats. Powell (1984), dans une savane à sols comparables du nord du Nigeria, a établi des régressions entre les composantes du maïs, du mil, du sorgho et de l'arachide. Le rapport des pentes obtenues par la régression de la biomasse en paille sur le rendement épi/gousse, dans notre étude et celle de Powell a été : maïs : 1,0 ; mil : 1,1 ; sorgho : 1,6 ; arachide : 1,3. Dans le cas de l'arachide, Larbi *et al.* (1999) ont observé une forte variabilité des cultivars dans la façon dont ils divisaient la biomasse entre leurs composantes

végétales. Mais nous ne pouvons donner une interprétation définitive pour la différence observée sur le sorgho. Cependant, les estimations présentées ici devraient être testées dans d'autres sites avant d'être appliquées au calcul de bilans organiques en d'autres lieux.

L'estimation de la biomasse ligneuse adventice dans les céréales est difficile. Quantifier la dynamique des arbustes rejetant de souche pendant la période de culture est une tâche difficile, car (1) elle repose sur l'histoire culturale, les méthodes de coupe et les pratiques culturales (2) la biomasse souterraine est difficile à obtenir et montre une faible corrélation avec la biomasse aérienne ligneuse du fait de coupes répétées de la végétation pendant la culture (3) d'autres études sur la production de biomasse par les souches manquent sérieusement (Bohringer *et al.*, 1996). Définir des règles empiriques liant la biomasse ligneuse des cultures à une variable facilement mesurable telle que l'intensité de culture, comme nous l'avons fait, peut n'être ainsi que très intuitive et critiquable. Cependant, le test de sensibilité indique que la modification de la valeur du seuil de l'intensité de culture de plus ou moins 10 % influence peu le stock de carbone des composantes biotiques de l'ensemble de l'écosystème villageois (Figure 4.8).

4.4.5.2. Obtention des stocks de carbone, azote et phosphore dans les parcelles de jachère

L'application des relations utilisées ici liant la quantité de matière sèche, de carbone, d'azote et de phosphore à l'âge de la jachère comme établi dans le Chapitre 1 à d'autres successions secondaires de la sous-région devrait être validée par des mesures de terrain. Bien que les formations de combrétacées sur Lixisols soient étendues en Afrique de l'Ouest, la dynamique de la biomasse ligneuse après abandon des cultures dépend beaucoup de l'histoire des parcelles et, là encore, de l'intensité de culture. A Sare Yorobana, les dynamiques du carbone, de l'azote et du phosphore de la biomasse ligneuse et du sol sont fortement influencées par le maintien des souches ligneuses et de leur capacité de rejet. Sous des densités de population plus fortes, la réduction du temps de jachère devrait conduire à l'épuisement des souches et ainsi à une plus faible repousse de la végétation.

4.4.5.3. Définition de limites spatiales pour l'obtention des stocks de carbone, d'azote et de phosphore du village

Les limites verticales ont été fixées à 40 cm de profondeur pour les racines et 20 cm de profondeur pour le sol, dans notre étude. La littérature et l'accumulation d'argile dans les horizons superficiels du sol indiquent que l'activité racinaire est limitée en dessous de cet horizon, tandis que les études précédentes menées sur le site montrent que la plupart des propriétés chimiques du sol sont indépendantes de la gestion des terres, passé 20 cm de profondeur. Ces limites pourraient s'appliquer aux Lixisols

en général, mais pourraient ne pas être adaptées aux sols d'un autre ordre. Woomer *et al.* (1998), par exemple, rapportent une activité racinaire profonde dans les sols d'Afrique de l'Est, et influence de la gestion des terres sur les stocks de carbone des sols jusqu'à 1,20 m de profondeur.

La façon dont les limites horizontales devraient être définies pour l'obtention des bilans de carbone et d'éléments minéraux d'un agroécosystème villageois comme celui de Sare Yorobana est moins claire. Comme il l'est montré dans le Chapitre 5, la viabilité du système d'élevage repose fortement sur l'utilisation des ressources organiques non gérées par le village, mais qui sont pâturées pendant les saisons humide (à plein temps) et sèche (à temps partiel).

CHAPITRE 5.

BILANS SPATIALISES DE CARBONE, D'AZOTE ET DE PHOSPHORE A L'ECHELLE D'UN TERROIR DE SAVANE OUEST-AFRICAINE

II - LES FLUX



Vaine pâture sur résidus de culture de mil

CHAPITRE 5. BILANS SPATIALISES DE CARBONE, D'AZOTE ET DE PHOSPHORE A L'ECHELLE D'UN TERROIR DE SAVANE OUEST- AFRICAIN - II. LES FLUX

RESUME

La disponibilité de la matière organique dans le système plante-sol, et les usages multiples des ressources organiques, sont d'importants déterminants de la viabilité des systèmes agropastoraux d'Afrique de l'Ouest. La gestion des stocks organiques disponibles au début de la saison sèche a été caractérisée par l'estimation des flux de carbone (C), d'azote (N) et de phosphore (P) provenant de la biomasse entre les différents systèmes d'utilisation de l'espace d'un village du Sud Sénégal.

La récolte des cultures, l'élevage et la cueillette de bois et de pailles ont été responsables respectivement de 27, 59 et 14 % des sorties de carbone hors de l'espace exploité par le village. L'élevage a contribué à 83, 85 et 79 % des restitutions de C, N et P au sol. Les retours provenant des résidus de cultures ont représenté seulement 13 à 15 % du recyclage du carbone et des nutriments.

Les principales pertes de carbone ont été liées à la respiration du bétail, la combustion du bois et les exportations des récoltes des cultures de rente. Ces dernières ont été responsables de la plupart des sorties de d'azote et de phosphore du système, les autres pertes d'éléments minéraux étant principalement les déjections humaines non recyclées.

En conséquence de ces transferts et du recyclage in situ de la biomasse herbacée, des volumes importants de carbone ($3,8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) ont été apportés aux cultures vivrières de l'auréole de case. Des bilans positifs d'azote et de phosphore n'ont été enregistrés que pour les cultures vivrières des auréoles de brousse et de case. Les pertes d'azote et de phosphore

du système se sont chiffrées à -4 kgN et $-1 \text{ kgP ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en tenant compte des flux abiotiques, c'est à dire bien moins que les valeurs admises dans la région.

Les flux simulés de carbone lié aux récoltes, à la collecte du bois, et à l'élevage, doubleraient dans 28 ans sous le fait de la pression démographique. Ces flux égaleraient les stocks de carbone dans la biomasse aérienne dans 27 ans. C'est pourquoi une rapide diminution de la durabilité du système pourrait se produire dans les prochaines décennies si aucune intensification des systèmes de production n'est initiée.

MOTS CLE

Azote, Biomasse végétale, Carbone, Flux, Phosphore, Savane, Sénégal, Système agropastoral

5.1. INTRODUCTION

En Afrique tropicale sèche, les contraintes de sol et de climat, ainsi que l'histoire des hommes, ont généralement donné naissance à des systèmes de production plus ou moins intensifs avec de faibles intrants exogènes (Kowal and Kassam, 1978). Une des principales caractéristiques partagées par les systèmes de production tropicaux autarciques est l'utilisation de la matière organique (MO) comme un outil polyvalent, qui joue des rôles structuraux (construction) et énergétiques, et qui transporte les éléments minéraux (Ruthenberg, 1971). La matière organique est une production évaluable (bien économique) du système, qui fournit des services directs comme l'alimentation des hommes et des animaux, le chauffage, et le logement. Elle est aussi un moyen de contrôler la productivité, voire la viabilité de l'agroécosystème, à condition qu'elle soit soigneusement gérée. Par exemple, le bétail alimenté avec le fourrage produit sur place fournit une force de travail tout en recyclant la matière organique et les éléments minéraux du sol. En Afrique subsaharienne, les pratiques organiques de gestion de la fertilité (fumure, jachère) sont répandues et conditionnent le statut organique du sol, dont dépendent largement les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol dans les tropiques (Kowal and Kassam, 1978 ; Pieri, 1989 ; Floret *et al.*, 1993 ; Tiessen *et al.*, 1994).

Des facteurs tels que l'abandon des mesures politiques d'incitation à l'utilisation d'engrais ou l'insécurité foncière sont susceptibles de maintenir la viabilité des systèmes de production d'Afrique de l'Ouest fortement dépendante de la gestion de la matière organique (Pieri, 1989 ; Naseem and Kelly, 1999). La caractérisation de la dynamique du carbone et des ressources en azote (N) et en phosphore (P) de nature organique devrait ainsi être un moyen d'estimer la durabilité des agroécosystèmes locaux (Woomer *et al.*, 1998 ; Dugué, 2000). Afin d'être opérationnelle, cette évaluation doit, en Afrique de l'Ouest, être réalisée à l'échelle du village car le foncier et l'organisation sociale relèvent généralement de règles communautaires (Landais and Lhoste, 1993 ; Izac and Swift, 1994 ; Defoer *et al.*, 1998).

Une caractéristique remarquable de la dynamique du carbone dans les systèmes de production tropicaux est son comportement fortement saisonnier. La production de biomasse végétale se produit surtout durant la saison humide, même pour la végétation pérenne, conduisant à des stocks organiques maximaux à la fin de la saison des pluies (Kowal and Kassam, 1978). La productivité végétale reste très faible les mois suivants, alors que les activités continues des hommes et des animaux entraînent une exploitation progressive des ressources nouvellement créées. En conséquence, des flux verticaux et des transferts horizontaux importants de carbone et de nutriments liés sont établis jusqu'au retour des pluies. Les agriculteurs gèrent directement certains de ces flux. Les principaux sont liés aux récoltes alimentaires (grains et pailles), aux flux organiques engendrés

par le bétail, à la collecte de bois et de produits non ligneux dans les jachères et en savane.

En dehors des travaux de Woomer *et al.* (1998), Dugué (2000) et Ngamine et Altolna (2000), les tentatives pour quantifier les flux de matière organique à l'échelle de l'exploitation prennent rarement en compte tous les usages de la matière organique. L'intégration agriculture-élevage a fait l'objet de plusieurs études intégrant différents rôles de la matière organique. Le rôle du bétail dans les transferts de fertilité à l'échelle du village est largement reconnu (Landais et Guérin, 1992 ; Landais and Lhoste, 1993 ; Fernandez-Rivera *et al.*, 1994 ; Buerkert and Hiernaux, 1998), mais la spatialisation et la quantification des flux concernant le bétail restent rarement abordées (Murwira *et al.*, 1994 ; Hiernaux *et al.*, 1997 ; Achard *et al.*, 2000). La plupart des bilans en éléments minéraux dans la zone subsaharienne sont réalisés à l'échelle de la parcelle (Bationo *et al.*, 1998) ou de la région (Stoorvogel *et al.*, 1993a ; Stoorvogel *et al.*, 1993b) ; mais peu incluent l'échelle du terroir (Krogh, 1997 ; Defoer *et al.*, 1998). Et lorsqu'ils le font, les bilans en carbone manquent.

Deux hypothèses importantes qui sous-tendent ce travail sont que la viabilité des systèmes de production des savanes ouest-africaines (SOA) repose en grande partie sur la disponibilité de la matière organique, et sur la façon dont cette ressource est gérée pendant la saison sèche. La première hypothèse a orienté la première partie de cette étude (Chapitre 4) ; nous avons quantifié le stock de carbone (C), d'azote (N) et de phosphore (P) en relation avec l'organisation agro-sociale d'un système agropastoral du Sud Sénégal (Chapitre 4). Sur ce terroir villageois, comme cela est souvent le cas dans les SOA, les agriculteurs ont établi une organisation spatiale concentrique, qui présente un gradient positif d'intensité de culture et de la gestion de la fertilité depuis les parcours périphériques et l'auréole de brousse jusqu'à l'auréole de case (Pélissier, 1966 ; Ruthenberg, 1971 ; Prudencio, 1993). Le présent travail est destiné à tester la seconde hypothèse en estimant certains des flux de carbone, d'azote et de phosphore d'origine anthropique et existant au sein du village.

Ici, nous (1) quantifions les principaux flux spatiaux de C, N et P provenant de la biomasse végétale et dus à l'activité humaine, entre les différentes unités de gestion de l'espace (UGE), principalement pendant la saison sèche, avec un accent mis sur l'activité animale, (2) estimons les tendances futures possibles des flux de carbone, sous différents scénarios dépendant de l'efficacité agricole et de l'évolution des niveaux de vie.

5.2. METHODES

5.2.1. Caractéristiques du site

L'étude a été menée à Sare Yorobana (12°49'N, 14°53'O), un village du Sud Sénégal, situé dans la région de Haute-Casamance, dans le Département de Kolda. Bien qu'une grande diversité spatiale soit trouvée au niveau des conditions pédologiques et des modes de tenure foncière, le village est assez représentatif des systèmes agropastoraux de la zone.

Une description détaillée du climat, du sol et de la végétation du site d'étude est faite dans les Chapitres 1, 2 et 3. Les principales caractéristiques naturelles du site sont les suivantes : (1) un climat tropical sec avec 960 mm de précipitations moyennes par an pendant la période 1978-1997, réparties entre mai et octobre, (2) un paysage plat composé de sols tropicaux sableux ferrugineux (ordre des Lixisols ; FAO 1998b) sur le plateau et le glacis, et de Gleysols argileux sur les terres saisonnièrement inondées.

Le système de production (utilisation de l'espace, attribution spatiale des ressources organiques) a été décrit au Chapitre 4. Ce système montre une organisation en auréoles typique des villages ouest-africains. Une auréole de case entoure les habitations. Elle est consacrée aux productions vivrières représentées par la culture continue de céréales, principalement du mil (*Pennisetum glaucum* L.), du maïs (*Zea mays* L.) et du sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench), grâce à la fumure animale et à l'épandage d'ordures ménagères. Au-delà, c'est l'auréole de brousse, qui ceinture l'auréole de case. Plusieurs itinéraires culturels coexistent (selon la disponibilité de la matière organique), mais la rotation culture-jachère. Les cultures vivrières et de rente -arachide (*Arachis hypogea* L.) et coton (*Gossypium hirsutum* L.) dans une moindre mesure- y sont représentées. La limite avec l'auréole forêt/savane marque les limites du village sur le plateau et le glacis ; le village possède aussi une palmeraie (*Elaeis guineensis* Jacq.) et une rizière (*Oryza sativa* L.) en bas-fond.

En 1997, la surface appropriée de façon privée ou communautaire par les 268 habitants était de 260 ha, sur lesquels 110 ha étaient en culture. Cependant, l'espace utilisé par le village s'étend largement au-delà de ces frontières, du fait de l'extensivité de l'élevage. En 1997, le village gérait 410 unités de bétail tropical (UBT ; 1 UBT = 250 kg de poids vif ou PV). Le bétail taurin était composé de l'espèce *Bos taurus*. La race *Ndama* locale est trypano-tolérante, mais n'a que de faibles performances zootechniques (Coulomb, 1976). Les troupeaux sont généralement conduits par un gardien dans l'auréole forêt/savane pendant la saison des cultures et ils sont laissés en libre pâturage pendant la saison sèche (Richard *et al.*, 1991). La vaine pâture est une règle habituelle, mais la fumure durant le parcage nocturne bénéficie aux seuls propriétaires de troupeaux.

Les Peuls sédentaires se sont tournés vers l'agriculture il y a plus d'un siècle, mais sont, à l'origine, des éleveurs, avec des troupeaux de taille très variable selon les exploitations.

5.2.2. Quantification et spatialisation des flux de carbone, d'azote et de phosphore

5.2.2.1. Flux à la récolte

Les flux estimés de C, N et P survenant à la récolte de la biomasse des cultures ont été basés sur les données présentées au Chapitre 4. Les flux de matière organique depuis les champs vers la concession ont englobé les composantes suivantes : épis de mil, de sorgho et de riz ; grains et rafles de maïs ; fanes d'arachide. Les exportations hors du village ont inclus les gousses d'arachide et les graines de coton (autoconsommation négligée). Les restitutions depuis le village vers l'auréole de case ont été : la fraction non comestible des épis de mil, de sorgho et de riz, les rafles de maïs et les restitutions de paille sous forme fécale après ingestion comme complément alimentaire par les petits ruminants, les veaux et les bœufs. Le fractionnement de la biomasse a été effectué par les techniques traditionnelles de pilage manuel.

5.2.2.2. Transferts liés au bétail

Cartographie de l'espace

Deux types de cartographie ont été réalisés afin de spatialiser les flux de matière organique liés à l'activité du bétail. Tout d'abord, la sous-région du district de Dioulacolon, à laquelle appartient Sare Yorobana, a été cartographiée à l'échelle 1:12000 grâce à une photo-interprétation des types physiologiques de végétation. Pour cette étude, sept types de végétation ont été distingués : la savane arborée (strate ligneuse supérieure ou SLS > 7 m de haut) ; la savane arbustive ($2\text{ m} < \text{SLS} < 7\text{ m}$) ; la savane herbacée ($\text{SLS} < 2\text{ m}$) ; les rizières ; les cultures pluviales et les mares (rassemblées sous le terme «Autres» dans la suite du travail). Cette typologie a été utilisée pour caractériser les flux établis dans la zone à l'extérieur du village (excepté pour la palmeraie qui a été incluse dans les savanes de brousse). Une autre cartographie a été effectuée pour toutes les parcelles (cultivées ou non) gérées par le village (voir Chapitre 4 pour le détail de la méthode).

Localisation du bétail

Les mouvements de divagation diurne de trois des 10 troupeaux gérés par le village ont été suivis tous les 10 jours pendant une journée, durant toute la saison sèche 1995-1996. Ces trois troupeaux ont représenté jusqu'à 206 UBT, soit la moitié de la taille du cheptel du village. Leur localisation a été enregistrée toutes les cinq minutes grâce à un système de positionnement global ou à une boussole couplée à un topofil.

Les cartes d'occupation de l'espace et les données de positionnement du

bétail ont été gérées sous le système d'information géographique Atlas (SMI, 1993). Les durées de fréquentation par les animaux de chaque UGE (type de végétation hors du village, parcelle dans le village) ont été calculées par croisement des trajectoires du troupeau avec les cartes d'occupation de l'espace. Ickowicz *et al.* (1998) ont montré que l'activité de pâturage était assez stable pendant la divagation, quelle que soit la gestion des terres ; ainsi, la distribution spatiale des prélèvements de biomasse végétale a été linéairement influencée par les temps de fréquentation. Du fait de faibles changements interannuels dans la gestion des terres et du climat lors de cette étude, la distribution de la fréquentation des différentes UGE par le bétail, enregistrée pendant la saison sèche 1995-1996, a été considérée extrapolable à la saison sèche 1996-1997.

Estimation des prélèvements de biomasse végétale et des déjections par le bétail

Une description détaillée de la méthode utilisée pour obtenir la quantité et la qualité de la production de fèces peut être trouvée dans Ickowicz *et al.* (1998). Les matières organiques fécales excrétées (MOFE) ont atteint 19-48 g MO par kilo de poids métabolique ou PM (pour un animal, poids métabolique = poids vif.^{-0.75}) tout au long de l'année, avec un pic de production en début de saison sèche (voir Tableau 5.3 pour les données de saison sèche). Les déjections ont été bien réparties entre la nuit (53 %) et le jour (47 %). Des index fécaux ont été utilisés pour estimer les prélèvements de matières organiques volontairement ingérées (MOVI) et d'azote à partir des valeurs des MOFE (Guérin *et al.*, 1989). La consommation estimée a varié dans le même sens que la production fécale et a atteint 46-103 gMO kgPV⁻¹ j⁻¹. La teneur en C a été déterminée par chromatographie après combustion à 850°C (Thermoquest NC soil 2000) ; la teneur en P a été mesurée après attaque acide (HCl) des cendres, suivie d'une spectrophotométrie IPC. Le prélèvement de carbone a été évalué selon l'hypothèse que seule la biomasse herbacée était ingérée par le bétail, puisque le fourrage ligneux ne représente que 7 à 14 % du fourrage consommé par les bovins sur le site d'étude (Delacharlerie, 1994). Les teneurs moyennes de carbone, données pour la biomasse herbacée des champs de mil, de maïs, d'arachide et de riz et les jachères dans les Chapitres 1 et 3 ont ainsi été appliqués aux valeurs des prélèvements de matière sèche volontairement ingérée (MSVI) afin de calculer les prélèvements de carbone (les MSVI furent déduites des MOVI en considérant une teneur en cendres de 10 %). Cette méthode n'a pas pu être utilisée pour estimer les prélèvements de phosphore, puisque le bétail sélectionne sans doute les composantes végétales riches en minéraux. Nous avons ainsi estimé les prélèvements totaux de P pendant la saison sèche comme étant égaux aux excréments fécaux de P, corrigées de la variation du stock de P

dans la biomasse des animaux entre le début et la fin de la saison sèche (la teneur en P des animaux étant de 11g kgPV⁻¹ selon Winter, 1999). Nous avons alors réparti ce montant total entre les UST, proportionnellement au temps passé sur chaque unité.

Localisation des parcs nocturnes et impact de la fumure de nuit sur les rendements en mil

Les pratiques de parage ont été étudiées tout au long de la saison sèche 1996-1997. La localisation des parcelles, la date et le nombre d'animaux de chaque enclos ont été enregistrés. En utilisant les données sur l'excrétion de Ickowicz *et al.* (1998), l'intensité des déjections a été calculée (exprimée en tMS ha⁻¹ et en tMO ha⁻¹). Celle-ci a été utilisée pour établir des cartes de densité des déjections, et comme variable explicative afin de prévoir le rendement mesuré dans 25 parcelles de culture de mil (14 dans l'auréole de case ; 11 dans l'auréole de brousse).

5.2.2.3. Besoins énergétiques et de construction

Le besoin en bois de feu a été évalué grâce au recensement de la population (voir Chapitre 4) et au travail de Bazile (1998) mené dans un village du sud du Mali partageant des conditions de climat et des habitudes de vie similaires à ceux de Sare Yorobana. Au Mali, l'auteur a relié la consommation CO en bois (en kgMS hab⁻¹ an⁻¹) à la taille S de la population de l'exploitation de la façon suivante : $CO = 5,68 * S^{-0,73}$. Le bois de feu a été supposé récolté dans les jachères de l'auréole de brousse, puisque la ressource ligneuse stockée dans ces jachères est la plus proche du village. La combustion à la ferme a été considérée comme totale, conduisant à une perte totale du carbone et de l'azote, alors que le phosphore a été restitué à l'auréole de case sous forme de cendres. Les besoins en bois de construction ont été presque impossibles à évaluer du fait de la diversité des utilisations.

Le besoin de chaumes pour la construction du toit a été quantifié. Le poids moyen d'une botte locale de paille a été déterminé à partir de 20 répétitions. Une régression a été déterminée entre le nombre de bottes nécessaires pour le toit (obtenu par enquêtes) et le diamètre des cases (10 répétitions), grâce à la procédure NLIN du logiciel SAS (Hatcher and Stepanski, 1994). La biomasse de paille stockée sur les toits de toutes les habitations a alors été calculée, et un taux de renouvellement -estimé par enquêtes chez les agriculteurs- a été appliqué pour le calcul des flux annuels nécessaires au renouvellement de la biomasse usagée, qui est alors restituée aux champs de case sous forme d'ordures ménagères.

5.2.3. Prévision des flux de carbone

Afin de prévoir comment les flux organiques du terroir villageois pourraient évoluer pendant les prochaines décennies, une représentation simplifiée de sa dynamique a été réalisée grâce à une feuille de calcul liant les stocks

de carbone à la gestion des terres, reliée à son tour à la disponibilité de la fumure et aux besoins des hommes (voir Chapitre 4 pour une description détaillée du modèle). Cinq scénarios ont été testés, combinant trois niveaux de modalités sur l'accroissement des rendements en céréales (0, 30 et 100 %) et deux modalités d'accroissement du niveau de vie (0 et 30 %). Les variables de sortie suivies ont été les flux de carbone (prélèvement de carbone par le bétail, cultures, collecte de bois et de pailles). Le rapport du flux de carbone sur le stock de carbone (comme simulé dans le Chapitre 4) a aussi été examiné comme un indicateur de la viabilité du système sous différentes options de contraintes.

5.3. RESULTATS

5.3.1. Flux actuels de carbone, d'azote et de phosphore

5.3.1.1. Récolte des cultures

Les grains ont représenté 57 à 70 % de la biomasse dans les échantillons d'épis de céréales (Tableau 5.1).

La biomasse végétale récoltée dans les cultures s'est élevée à 185 tMS, ou 69 tC (Figure 5.1a). Soixante quinze pour cent des sorties sont venues de l'auréole de brousse, dont la moitié était exportée sous forme de gousses d'arachide et de grains de coton, le reste étant transféré à la ferme en tant qu'épis de céréales (59 %), et de fanes d'arachide. Une estimation optimiste du recyclage in situ des résidus de culture et des mauvaises herbes s'est élevée à 45 tC (pertes dues au feu non comprises). Dix-huit tonnes de carbone provenant de la biomasse végétale non comestible et des restitutions fécales de la consommation des fanes, ont été transférées depuis la ferme vers les parcelles jouxtant les habitations. Ces restitutions ont compensé les prélèvements d'azote et de phosphore dus aux récoltes des cultures vivrières de l'auréole de case. Dans l'ensemble, 46 % de N et 35 % de P récoltés ont été exportés (Figure 5.2a, Figure 5.3a), et 511 kgN et 99 kgP ont été perdus dans les fosses septiques (Tableau 5.2).

Tableau 5.1 Partition de la biomasse végétale récoltée dans les cultures de céréales à Sare Yorobana. Toutes les données sont en pourcentage.

	Grain	Fractions non comestibles de l'épi	Rafle	Spathe	n
Maïs	70,4 ±0.5		18,3 ±0.5	11,3 ±0.5	16
Mil	61,0 ±1.5	39,0 ±1.5			24
Sorgho	67,1 ±1.3	32,9 ±1.3			8
Riz	57,5 ±2.5	42,5 ±2.5			8

± : erreur type.

Données en Annexe 35.

5.3.1.2. Flux liés à l'élevage

Prélèvements

La taille des troupeaux a légèrement diminué de 422 têtes (novembre 1996) à 404 (juin 1997) (Annexe 42). L'excrétion fécale azotée a varié de 1,0 à 2,0 gN kgPM⁻¹ (Tableau 5.3). L'ingestion journalière de N a été estimée entre 1,2 et 2,4 gN kgPM⁻¹. Les plus fortes valeurs d'ingestion et d'excrétion azotée ont été enregistrées au début de la saison sèche. Les teneurs en C et P des fèces n'ont pas beaucoup varié pendant la saison sèche ; ainsi, les prélèvements et les excrétions fécales exprimées en quantités de C, P ou de matière organique ont montré des évolutions temporelles similaires.

Tableau 5.2 Bilans de matière sèche, de carbone, d'azote et de phosphore des unités de gestion de l'espace exploitées par les paysans de Sare Yorobana dans et autour du terroir villageois, liés à la récolte des cultures, aux transferts dus au bétail, à la collecte de bois et de paille et au recyclage des résidus.

Toutes les données sont en masse par hectare, sauf pour la ferme (calculé en valeur absolue).

	Auréole de savane								Auréole de brousse							
	Sav. arborée		Sav. arbustive		Sav. herbacée		Total		Jachère		Cult. de rente		Culture vivrière		Total	
	Ent.	Sort.	Ent.	Sort.	Ent.	Sort.	Ent.	Sort.	Ent.	Sort.	Ent.	Sort.	Ent.	Sort.	Ent.	Sort.
Matière sèche (t ha ⁻¹)																
Récolte											2,6		0,0	1,0		0,0
Bétail	0,1	0,3		0,0	0,0		0,2	0,8		0,1	0,3		0,4	1,0		2,0
Bois											0,7			2,2		0,5
Chaume							0,1		0,0							
Résidus	nd			nd			nd			nd		0,0		2,5		0,4
Total	0,1	0,3		0,0	0,0		0,2	0,9		0,1	1,0		0,4	3,5		0,8
Carbone (t ha ⁻¹)																
Récolte											1,0		0,0	0,4		0,0
Bétail	0,0	0,1		0,0	0,0		0,1	0,3		0,0	0,1		0,2	0,3		0,2
Bois											0,3					0,2
Chaume							0,0		0,0							
Résidus	nd			nd			nd			nd		0,1		0,9		0,2
Total	0,0	0,1		0,0	0,0		0,1	0,3		0,0	0,4		0,2	1,3		0,3
Azote (kg ha ⁻¹)																
Récolte											56		13			14
Bétail	2	6		0	1		7	16		3	7		12	21		19
Bois											2					1
Chaume							1		0							
Total	2	6		0	1		7	17		3	8		12	77		19
Bilan		-3			0			-10			-5			-65		-13
Phosphore (kg ha ⁻¹)																
Récolte											3,6			2,5		1,2
Bétail	0,2	0,4		0,0	0,1		0,5	1,1		0,2	0,4		0,9	1,3		1,2
Bois											0,5					0,3
Chaume							0,1		0,0							
Total	0,2	0,4		0,0	0,1		0,5	1,1		0,2	0,9		0,9	4,8		1,2
Bilan		-0,2			0,0			-0,6			-0,7			-3,9		-1,3
Surface (ha)	171			175			99		445		117		42		28	187

Tableau 5.2 (suite)

	Auréole de case*						Concession		Rizière						Autres		
	Cult. de rente		Culture vivrière		Total		Ent.	Sort.	Village	Ent.	Sort.	Extérieurs		Total		Ent.	Sort.
	Ent.	Sort.	Ent.	Sort.	Ent.	Sort.						Ent.	Sort.	Ent.	Sort.		
Matière sèche (t ha ⁻¹)																	
Récolte		1,3	2,9	1,2	2,5	1,2	128,9	80,7		1,3					0,3		
Bétail	0,0	0,0	4,6	2,7	4,1	2,6			0,3	1,3		0,3	1,3	0,3	1,3	0,0	0,2
Bois							86,0	86,0									
Chaume			0,4		0,4		8,1	8,1									
Résidus	1,0		2,2		2,1				1,2		nd			0,3		nd	
Total	1,0	1,3	10,2	4,0	9,1	3,8	223,0	174,8	1,6	2,6	0,3	1,3	0,6	1,6	0,0	0,2	
Carbone (t ha ⁻¹)																	
Récolte		0,5	1,0	0,4	0,9	0,5	43,9	27,3		0,4				0,1			
Bétail	0,0	0,0	1,9	1,0	1,7	0,9			0,1	0,4		0,1	0,4	0,1	0,4	0,0	0,1
Bois							32,2	32,2									
Chaume			0,1		0,1		2,8	2,8									
Résidus	0,4		0,8		0,8				0,4		nd			0,1		nd	
Total	0,4	0,6	3,8	1,4	3,5	1,4	79,0	62,4	0,5	0,8	0,1	0,4	0,2	0,5	0,0	0,1	
Azote (kg ha ⁻¹)																	
Récolte		25	63	15	56	16	1704	1193		8				2			
Bétail	0	1	146	59	130	55			11	28		11	28	11	28	2	4
Bois							200	200									
Chaume			3		3		57	57									
Total	0	25	212	74	188	71	1961	1450	11	36	11	28	11	30	2	4	
Bilan		-25		+138		+117		+511		-25		-17		-19		-2	
Phosphore (kg ha ⁻¹)																	
Récolte		2,7	5,2	3,0	4,6	3,0	198	99		1,8				0,4			
Bétail	0,0	0,0	11,8	3,5	10,5	3,3			0,9	1,7		0,9	1,7	0,9	1,7	0,1	0,2
Bois			3,1		2,7		59	59									
Chaume			0,3		0,3		6	6									
Total	0,0	2,8	20,4	6,5	18,1	6,2	262	163	0,9	3,5	0,9	1,7	0,9	2,1	0,1	0,2	
Bilan		-2,8		+13,8		+11,8		+99		-2,6		-0,8		-1,2		-0,1	
Surface (ha)	2		19		21				16		62		79		81		

* données pour les jachères dans l'auréole de case non détaillées (moins de 0,5 ha).
Valeurs absolues et distribution en Annexe 41.

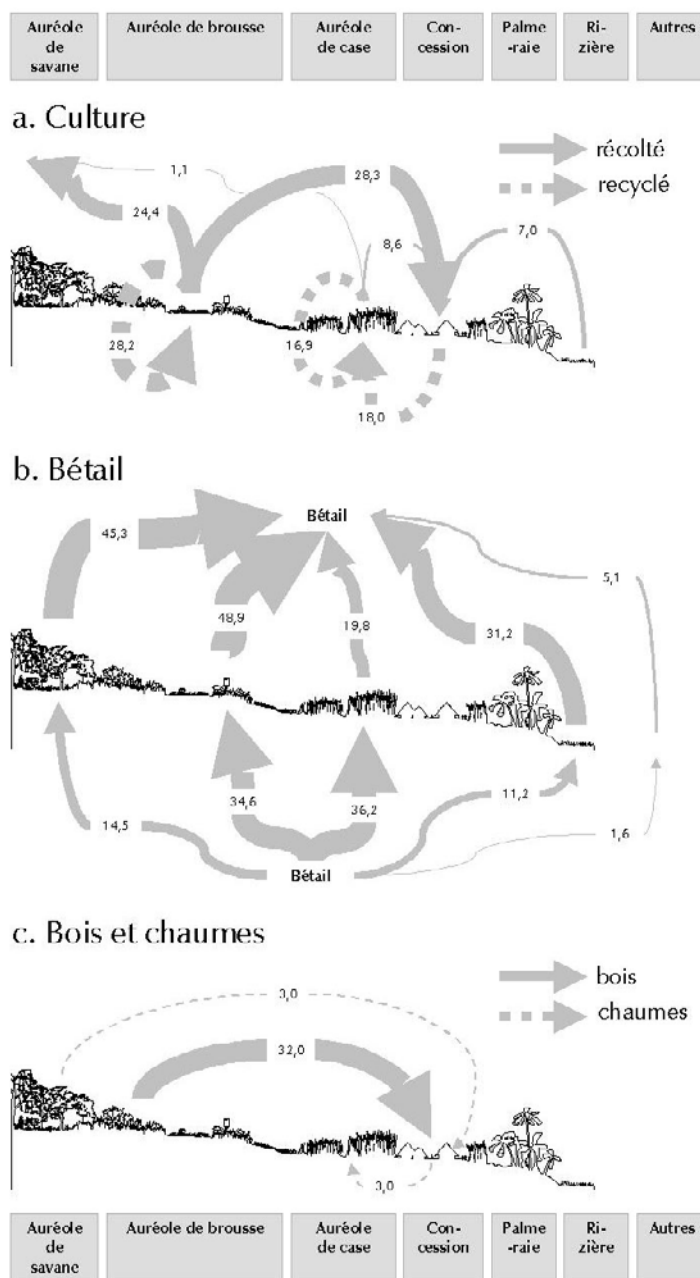


Figure 5.1 Flux anthropogéniques de carbone (tonnes) établis de novembre 1996 à novembre 1997 à Sare Yorobana.

Les flux liés au bétail concernent la saison sèche uniquement. La largeur des flèches est proportionnelle à la valeur du flux. Données en Annexe 41.

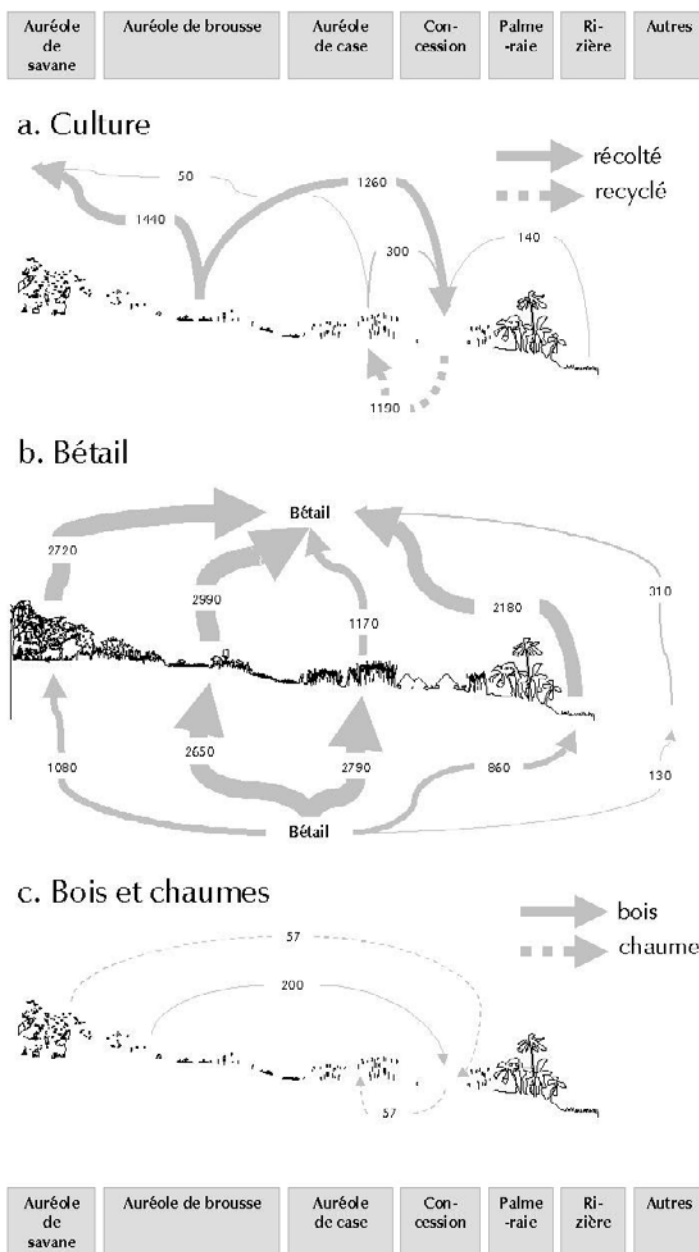


Figure 5.2 Flux anthropogéniques d'azote (kg) établis de novembre 1996 à novembre 1997 à Sare Yorobana.

Les flux liés au bétail concernent la saison sèche uniquement. La largeur de la flèche est proportionnelle à la valeur du flux. Données en Annexe 41.

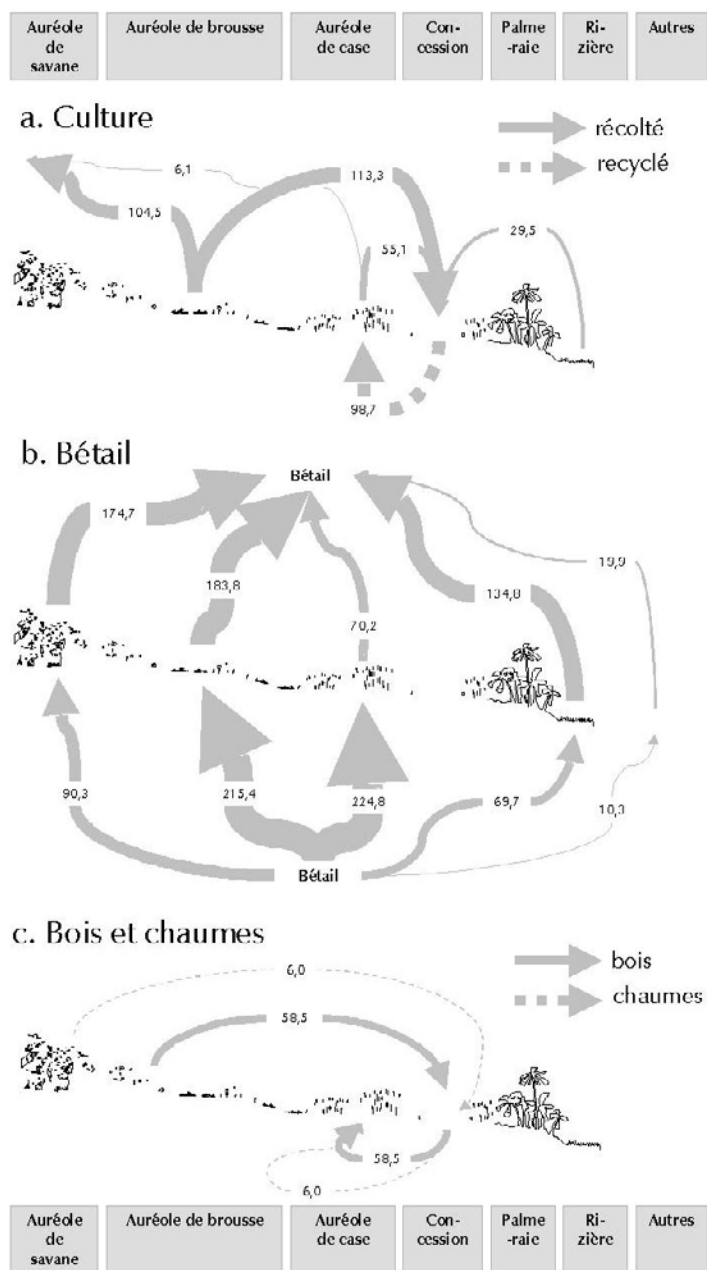


Figure 5.3 Flux anthropogéniques de phosphore (kg) établis de novembre 1996 à novembre 1997 à Sare Yorobana.

Les flux liés au bétail concernent la saison sèche uniquement. La largeur de la flèche est proportionnelle à la valeur du flux. Données en Annexe 41.

Tableau 5.3 Ingestion et excrétion de matière sèche, de carbone, d'azote et de phosphore par le cheptel bovin mesurées pendant la saison sèche 1997-1998.

Mois	Matière organique		Azote		Carbone	Phosphore
	Prélèvement	Excrétion	Prélèvement	Excrétion	Excrétion	Excrétion
Novembre	74,4	34,9	1,92	1,63	18,0	0,111
Décembre	103,2	47,6	2,42	1,98	24,6	0,152
Janvier	66,8	31,8	1,74	1,45	18,0	0,114
Février	61,8	31,2	1,32	1,11	16,1	0,093
Mars	64,5	32,5	1,35	1,19	16,1	0,102
Avril	54,5	27,9	1,31	1,12	14,7	0,098
Mai	51,9	26,4	1,19	1,00	14,0	0,081
Juin	53,4	25,2	1,40	1,20	14,7	0,095

Toutes les données sont exprimées en g d'élément par jour par kilo de poids métabolique.

Source : ISRA/CIRAD-EMVT, Programme ABT (Ickowicz et al., 1998).

Teneurs des fèces en carbone, azote et phosphore en Annexe 43.

L'espace total exploré par les animaux a été de 812 ha, dont 268 ha gérés par le village, ce qui correspond à une charge moyenne de 51 UBT ha⁻¹.

La tenure foncière a été un déterminant plus ou moins important de la trajectoire des troupeaux bovins, selon la taille du troupeau et la surface gérée par le propriétaire (Tableau 5.4). Le plus petit troupeau a passé cinq fois plus de temps sur les champs de son propriétaire que sur les parcelles du village. Le rapport est tombé à moins de deux pour les plus gros troupeaux. Il a aussi été observé que plus la surface disponible gérée par le propriétaire par UBT était grande, plus la préférence des animaux pour les champs de leur propriétaire était marquée.

Tableau 5.4 Comportement du bétail de trois concessions durant la divagation de jour en relation avec la tenure foncière, la taille du troupeau et la surface gérée par l'éleveur (saison sèche 1995-1996).

Caractéristiques du comportement du troupeau pendant la vaine pâture diurne		Cérant du troupeau		
		Diao	Mama	Mamo
Surface possédée (ha)	(1)	6,6	19	14,4
Taille du troupeau (UBT)	(2)	21,1	36,2	99,6
Surface disponible par animal (ha UBT ⁻¹)	(1)/(2)	0,31	0,27 *	0,14
Temps (j ha ⁻¹) passé sur les parcelles				
- du propriétaire du troupeau		2,58	1,28	0,76
- du village:				
. toutes parcelles		0,52	0,4	0,45
. parcelles groupées par concession				
(n=17)	m (±ET)	0,98 ±0.27	0,57 ±0.17	0,72 ±0.14
Rang		2/17	2/17	8/17

UBT : unité de bétail tropical (1UBT=250 kg de poids vif)

* inclut l'effectif d'un autre troupeau géré par l'éleveur (34,5 UBT).

Données en Annexe 44.

Une nette influence du précédent cultural et de l'utilisation de l'espace sur la fréquentation par les animaux, pendant la divagation diurne, a aussi été mise en évidence, comme l'illustrent les flux de matière organique contrastés entre les utilisations de la terre (type de culture) et les UGE (gestion des auréoles, physionomie de la végétation des zones non cultivées) (Tableau 5.2, Figure 5.4). Selon l'intensité de pâturage, les précédents culturaux sont classés dans l'ordre suivant dans la zone gérée par le village : mil > maïs > mil x maïs intercalés > arachide > sorgho > jachère. En considérant l'ensemble du territoire prospecté par les animaux, le classement est devenu : auréole de case > rizière > savane herbeuse = auréole de brousse > savane arborée > savane arbustive. En terme de valeurs absolues de prélèvement, les principales sources de fourrage ont été l'auréole de brousse et celle de savane (61 % des 443 tMS prélevées, équivalent à 63 % de 150 tC) (Figure 5.1b) ; l'auréole de case s'est classée derrière la rizière. Les flux d'azote et de phosphore ont montré des distributions spatiales similaires au carbone ; ils se sont élevés à 9,4 tN et 580 kgP (Figure 5.2b, Figure 5.3b).

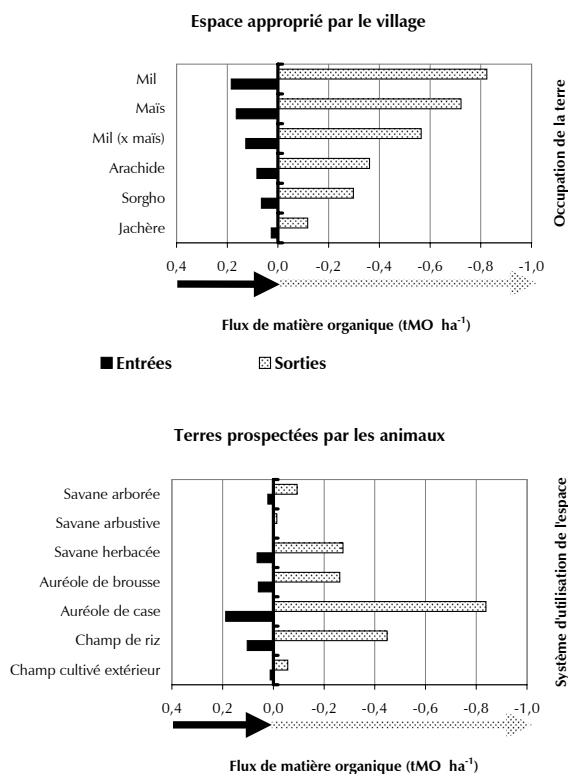


Figure 5.4 Entrées et sorties de matière organique initiées par l'ingestion et l'excrétion de trois troupeaux pendant la saison sèche 1995-1996. Données en Annexe 46.

Excrétions fécales

Le parcage de nuit a été pratiqué surtout près des habitations (Figure 5.5). Des contrastes marqués d'intensité de fumure (allant de 0 à 13,4 tMS ha⁻¹) ont été enregistrés entre les parcelles. Le parcage de nuit a été appliqué aux parcelles destinées à la culture de céréales (Tableau 5.5). De taux de fumure plus forts ont été trouvés sur les parcelles de mil x maïs (3,9±1,3 tMS ha⁻¹ ; ± erreur type), alors que l'arachide a reçu les plus taux les plus faibles (0,02±0,01 tMS ha⁻¹). En terme de taux de fumure, les autres céréales se sont rangées de la manière suivante : maïs > mil > sorgho.

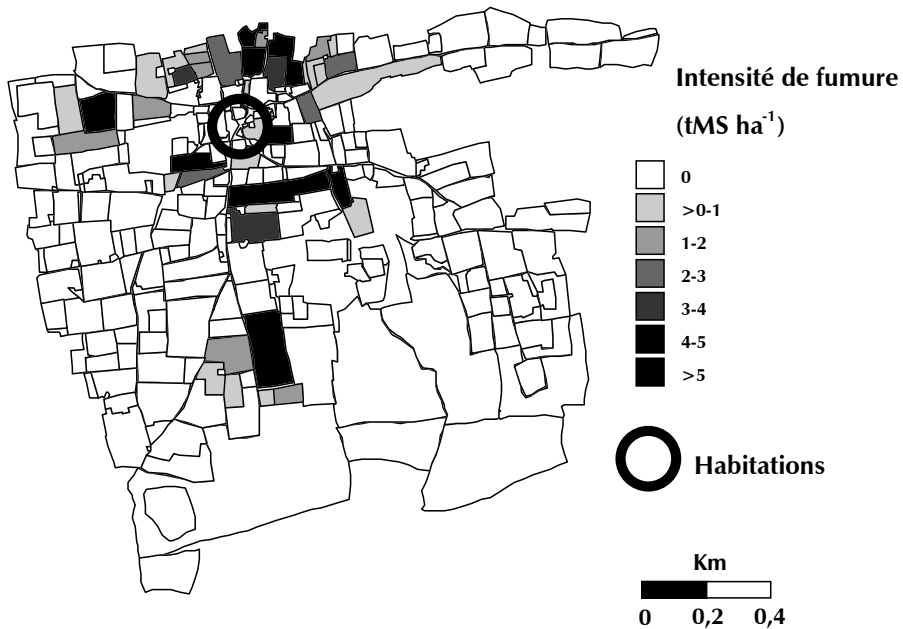


Figure 5.5 Intensité de fumure animale due au parcage nocturne dans le village de Sare Yorobana pendant la saison sèche 1996-1997.

Données en Annexe 2.

Tableau 5.5 Apports de matière sèche dans les champs par fumure animale pendant le parcage nocturne, en fonction des espèces végétales prévues pour la culture suivante.

	Mil (x maïs)	Maïs	Mil	Sorgho	Coton	Arachide	Jachère toutes parcelles	
Densité spatiale moyenne (tMS ha ⁻¹)								
Auréole de case	3,92 ±1.28	2,57 ±1.22	1,58 ±0.44	1,10 ±0.53	0,24 ±0.16	0,02 ±0.01	0,01	0,93 ±0.24
(n)	(12)	(6)	(18)	(14)	(11)	(16)		(19)
Terroir	4,10	4,02	2,28	1,91	0,35	0,03	0,01	0,59
Valeurs absolues (tMS)								
	24,6	12,8	69,0	9,0	3,0	1,2	1,5	121,2
(%)	(20.3)	(10.6)	(56.9)	(7.4)	(2.5)	(2.5)	(1.2)	(100)

± : erreur type.

Données en Annexe 45.

L'excrétion fécale totale s'est élevée à 239 tMS, sur lesquelles 121 t ont été déposées pendant le parage de nuit. Les flux correspondant ont été de 98 tC, 7,5 tN et 610 kgP (Figure 5.1b, Figure 5.2b, Figure 5.3b). Dans l'ensemble, les déjections ont eu lieu surtout dans les auréoles de brousse et de case (85 %) ; dans ces auréoles, les apports de carbone par la fumure ont compensé l'ingestion de carbone (rapport entrées/sorties = 1,4) ; cela n'a pas été le cas pour l'auréole de savane et les rizières dans lesquelles seul un tiers des pertes en carbone a été compensé (Figure 5.1b, Tableau 5.2). Les mêmes tendances ont été enregistrées pour N et P, avec des restitutions de P compensant la moitié des pertes (Figure 5.2b, Figure 5.3b).

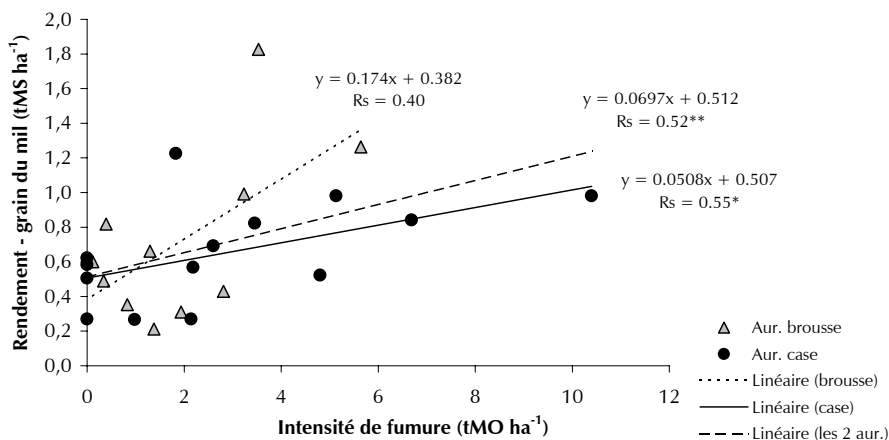


Figure 5.6 Rendement du mil en fonction des pratiques de fumure dans les auréoles de brousse et de case.

$p\{R_{\text{Spearman}}=0\} : * < 0,05 ; ** < 0,01$.

Données en Annexe 47.

L'impact de la fumure sur le rendement de mil a été notable pour les parcelles des deux auréoles, mais significatif seulement pour celles de l'auréole de case (Figure 5.6). Cependant, la pente de la régression a été plus forte pour les champs de l'auréole de brousse que pour ceux de l'auréole de case. L'agrégation de toutes les données a dégagé une relation très significative entre l'intensité de fumure et le rendement en grains.

5.3.1.3. Autres flux anthropogéniques

La consommation de bois par habitant permanent a été estimée à 280 kgMS par an (320 kgMS en tenant compte des temporaires employés pendant la saison de culture).

La récolte de bois a engendré un important flux de MS (86t) entre l'auréole de brousse et la concession, correspondant à 32 tC, 200 kgN et 58 kgP (Figure 5.1c, Figure 5.2c, Figure 5.3c). Mais en dehors du phosphore, rien n'a été restitué à l'auréole de case.

Le nombre de bottes (NBot) nécessaires pour recouvrir une case d'une circonférence CI (en m) a été estimé par la relation suivante : $NBot = 0,289 * CI^{1,664}$ ($R^2=0,96$; $p\{Fobs>Fth\}<0,001$), avec un poids moyen des bottes de $8,96 \pm 0,81$ kgMS. La biomasse herbacée totale stockée sur les toits du village a été estimée à 40,7 tMS. Le taux de renouvellement a été de $0,2 \text{ an}^{-1}$, conduisant ainsi à un apport annuel de 30 kg de chaume par habitant vers l'auréole de case.

5.3.1.4. Bilan global du carbone et des éléments minéraux

L'activité pastorale a représenté plus de la moitié des sorties anthropogéniques de C, N et P, la part des récoltes des cultures étant seulement de 25 à 32 % (Tableau 5.6, Figure 5.1, Figure 5.2, Figure 5.3). La prééminence de l'activité animale a même été encore plus forte en ce qui concerne les restitutions de carbone et d'éléments minéraux au sol, puisque les animaux ont assuré 79 à 86 % des apports en carbone et nutriments. Les flux de bois et de pailles n'ont été significatifs que pour les transferts de carbone.

Les bilans de C, N et P résultant d'entrées/sorties organiques dues à l'activité humaine ont été très contrastés entre les UGE (Tableau 5.2). Des entrées plus fortes en carbone par hectare ont eu lieu dans les champs de culture vivrière de l'auréole de case ($3,8 \text{ tC ha}^{-1}$) et de l'auréole de brousse ($1,8 \text{ tC ha}^{-1}$). Les principales sources de carbone pour les auréoles de case et de

Tableau 5.6 Participation des récoltes des cultures, du bétail et de la collecte de bois et de chaume aux transferts anthropogéniques de carbone, d'azote et de phosphore dus aux activités agricoles.

	Culture (%)	Bétail (%)	Bois et chaume (%)	Total (%)	(abs)
Prélèvement					
C	27	59	14	100	255 t
N	25	73	2	100	12.8 t
P	32	61	7	100	956 kg
Restitution					
C	15	83	2	100	119 t
N	14	86	1	100	8.7 t
P	13	79	8	100	773 kg

brousse ont été les déjections (45 et 55 % respectivement), le recyclage des résidus de culture (22 et 45 %) et le recyclage de la biomasse cultivée récoltée (25 et 0 %). Les entrées exogènes d'azote et de phosphore pendant la saison sèche provenaient surtout de la fumure animale dans les deux auréoles (69-100 % pour N, 58-100 % pour P). Dans les champs de riz du village, la situation a été légèrement différente, puisque 75 % des apports en carbone étaient dus au recyclage de résidus.

Les prélèvements de carbone dans l'auréole de brousse ont été liés à la récolte des cultures (39 %), au pâturage (37 %) et à la collecte de bois (24 %). Dans l'auréole de case, les parcours ont représenté 67 % des prélèvements de carbone. Dans les rizières, les prélèvements ont été plus équilibrés entre les hommes et les animaux.

Les bilans d'azote et de phosphore ont été fortement positifs dans les champs de case cultivés en céréale : $+117 \text{ kgN ha}^{-1}$, et $+11,8 \text{ kgP ha}^{-1}$. Un bilan positif de N ($+33 \text{ kg ha}^{-1}$) a aussi été enregistré dans les cultures

vivrières de l'auréole de brousse ; les sorties de P y ont été presque compensées par les apports de P ($-0,1 \text{ kgP ha}^{-1}$). Toutes les autres UGE ont présenté des déficits en azote et en phosphore . Le déficit minéral le plus important a été observé dans les cultures de rente de l'auréole de brousse (-63 kgN ha^{-1} ; $-3,9 \text{ kgP ha}^{-1}$), suivi par celles de l'auréole de case, les rizières du village, la savanes herbacée et la jachère (-5 kgN ha^{-1} ; $-0,7 \text{ kgP ha}^{-1}$). Le déficit en N et P de l'auréole de brousse a atteint -13 kgN ha^{-1} et $-1,3 \text{ kgP ha}^{-1}$.

5.3.2. Prédiction des futurs flux sortants de carbone

Un doublement des sorties de carbone est envisagé dans les 28 prochaines années si aucune amélioration du niveau de vie n'est réalisée (Figure 5.7a). Si le niveau de vie est augmenté de 30 %, le doublement devrait arriver dans les 20 prochaines années seulement. Modifier le rendement des cultures vivrières n'aurait qu'une faible influence sur les transferts de carbone.

Le rapport entre les flux sortants de carbone et les stocks de carbone contenus dans la BA végétale devrait augmenter de 0,16 en 1997 à 1,55-2,40 dans 50 ans (Figure 5.7b). Une évolution initiale plus lente devrait être enregistrée dans l'hypothèse d'un accroissement du rendement des céréales avec un niveau de vie stable. Dans le scénario de base, le rapport 1/1 devrait être atteint dans 27 ans. Augmenter le rendement des céréales de 30 et 100 % devrait le repousser à 31 ans. Si l'on considère une amélioration de 30 % du niveau de vie, les flux sortants devraient être égaux aux stocks dans 21 à 27 ans.

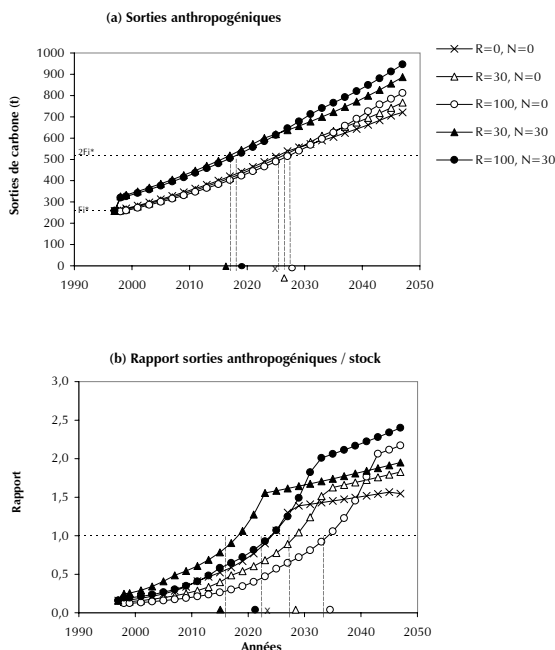


Figure 5.7 Evolution (a) des flux sortants anthropogéniques de carbone (b) du rapport des flux sortants de C sur le stock de C de la biomasse végétale aérienne du terroir villageois de Sare Yorobana pour la période 1997-2047 selon les prévisions du modèle (voir description du modèle dans le Chapitre 4).

Les sorties considérées sont : la biomasse des cultures récoltées, les prélèvements du bétail pendant la saison sèche et la collecte de bois et de pailles.

«R» = accroissement relatif (%) du rendement en céréale par rapport à la valeur de 1997.

«N» = accroissement relatif (%) du niveau de vie par rapport à la valeur de 1997.

* Fi : flux initié.

Données en Annexe 48.

5.4. DISCUSSION

5.4.1. Contrôle des flux par les stocks : les transferts liés à l'élevage

5.4.1.1. L'ingestion de matière sèche en relation avec la quantité et la qualité de matière organique

A la fin de la saison des pluies, la conduite du bétail devient moins stricte, et les animaux sont laissés libre de s'alimenter où ils le désirent, au moindre coût métabolique. Le pâturage préférentiel des résidus de culture a déjà été observé par Richard *et al.* (1991) sur le site d'étude, et par Dugué (1998b) dans le Nord Cameroun. Les teneurs en N plus élevées du maïs et des mauvaises herbes des champs cultivés que de la strate herbacée des jachères à Sare Yorobana ont été trouvées aux Chapitres 1 et 3. Cela a été souvent observé pour la plupart des cultures d'autres régions d'Afrique subsaharienne (Khombe *et al.*, 1992 ; Lamers *et al.*, 1996) et attribué aux apports exogènes de nutriments vers les champs de cultures vivrières (Powell, 1986 ; Buerkert *et al.*, 1997).

La quantité disponible de biomasse influence de façon évidente les trajectoires de pâturage des animaux, comme l'a montré la faible fréquentation des champs d'arachide (Figure 5.4), dans lesquels la récolte de fanes ne laisse qu'une faible biomasse comestible pour le bétail.

Toute la biomasse végétale disponible n'est pas valorisée par le bétail laissé en divagation. Le rapport (en MS) «ingestion/biomasse herbacée disponible» calculé à partir des résultats présentés ci-dessus et au Chapitre 4, serait de 53 % dans les champs cultivés de l'auréole de brousse et 61 % dans ceux de l'auréole de case. Les feuilles de céréales et les mauvaises herbes sont consommées en premier, mais beaucoup des tiges des cultures sont délaissées en raison de leur faible valeur alimentaire, de la souillure par l'urine, et du piétinement lors du pâturage. Ainsi, la fréquentation des zones de culture pluviale chute rapidement après les deux premiers mois de saison sèche ; plus tard, les animaux prospectent plutôt les rizières (où ils trouvent une repousse herbacée limitée pendant la saison sèche) et les parcours plus éloignés (jachère, savane) (Richard *et al.*, 1991 ; Ickowicz *et al.*, 1998). Le niveau de prélèvement dans les jachères du terroir villageois serait seulement de 9 % de la matière sèche disponible. Une rapide diminution de la qualité alimentaire de la strate herbacée pendant la saison sèche (César, 1992), et des feux incontrôlés éliminant de grandes quantités de biomasse végétale, peuvent être à l'origine de ce résultat.

Ainsi, seul 29 % du fourrage herbacé disponible sur le terroir villageois (palmeraie non comprise) est consommé par les animaux, ce qui rejoint d'autres résultats obtenus au Burkina Faso (Quilfen and Milleville, 1983).

5.4.1.2. Le facteur humain

Comme le suggèrent nos résultats, la fréquentation des terres du village n'est pas aléatoire ; elle se produit préférentiellement sur les parcelles possédées par la concession qui gère le troupeau, probablement en raison d'une mémorisation des lieux de parage par les animaux. C'est particulièrement vrai pour les concessions dont le rapport "taille du troupeau/surface gérée" est faible (Tableau 5.4). Ces concessions gèrent aussi les plus petits troupeaux (voir Chapitre 4). Ainsi, les gros troupeaux transfèrent des volumes significatifs de biomasse végétale et donc de fertilité depuis les champs des petits éleveurs vers ceux des gros éleveurs, un résultat déjà suggéré dans le Chapitre 4 par l'évaluation de la disponibilité et du besoin en fourrage parmi toutes les concessions du village.

L'exploitation plus intensive de la ressource en fourrage sur les champs cultivés que sur ceux non cultivés est certainement contrôlée par des facteurs autres que la simple disponibilité du fourrage. Par exemple, les agriculteurs essaient de garder les animaux près des habitations, où ils peuvent être plus facilement surveillés ; et, les mares utilisées pour l'abreuvement, situées en bas de pente, ne peuvent être atteintes qu'en passant par les champs de case.

5.4.2. Contrôle des flux par les stocks : parage nocturne et rendement en céréales

La réponse positive du rendement en céréale à la fumure, que nous avons mis en évidence ici, a été clairement établie en Afrique subsaharienne, en conditions contrôlées (Pieri, 1989 ; de Ridder and van Keulen, 1990 ; Bationo et Mokwunye, 1991) ou sur le terrain (Powell, 1986 ; Derouw, 1998). Seules des tendances ont pu être mises en évidence pour les données de l'auréole de brousse, probablement en raison des interactions avec les pratiques de jachère. Bien que significative, la réponse du mil à la fumure, dans l'auréole de case, montre une forte variabilité. Ceci indique que des facteurs tels que l'effet résiduel de la fumure appliquée les années précédentes (de Ridder and van Keulen, 1990 ; Lupwayi et Haque, 1999), les apports d'autres engrais comme l'épandage des ordures ménagères et les déjections animales diurnes, les pratiques et l'historique culturels pourraient contrôler une part importante des rendements de céréale présentés dans le Chapitre 4. Ceci est prévisible en milieu paysan.

La sélectivité démontrée ici des agriculteurs pour les taux d'application de fumure animale est cohérente avec la réponse variable des cultures vivrières locales aux engrais organiques habituellement observée dans la région (Kowal and Kassam, 1978 ; Pieri, 1989 ; Prudencio, 1993 ; Peters and Schulte, 1994 ; Derouw, 1998). Toutes ces études indiquent une sensibilité plus haute du maïs à la fumure.

La grande variabilité de l'intensité de fumure entre les parcelles illustre aussi un accès inégal à la fumure selon les exploitations. Bien que les déjections pendant la divagation diurne puissent atténuer de tels contrastes, une

fumure excessive dans certaines parcelles (voir Chapitre 4) peut maintenir le village à côté de l'optimum de production alimentaire. En effet, le rendement en céréales pourrait ne pas répondre linéairement à la fumure organique à des taux excédant 5-6 t ha⁻¹ (Gueye and Ganry, 1981 ; Bationo and Mokwunye, 1991 ; Fernandes, 1999), et de hauts niveaux de fumure (10 tMS ha⁻¹ an⁻¹) conduisent à un lessivage important de C, N et P (Brouwer and Powell, 1998), voire à un déclin des rendements dans des conditions de sécheresse (Williams *et al.*, 1994 ; Probert *et al.*, 1995 ; Achard *et al.*, 2000). Un envahissement accru par les mauvaises herbes est également cité comme un inconvénient de la fumure par les agriculteurs de Sare Yorobana et ailleurs en Afrique de l'Ouest (Powell, 1986). Mais ici, la fumure est aussi considérée comme un moyen efficace de lutte contre *Striga hermonthica* ; de plus, la biomasse adventice a une haute valeur nutritive.

5.4.3. Bilan global de carbone et des éléments minéraux de l'agroécosystème villageois

5.4.3.1. Recyclage in situ

Comme il l'a été précédemment démontré, la vaine pâture conduit à un recyclage in situ de la moitié de la biomasse herbacée produite dans les champs de culture. D'un point de vue pastoral, la vaine pâture économise ainsi du travail, mais pas la ressource en fourrage. Dans une perspective agricole, la matière organique recyclée par les animaux accélère les cycles biogéochimiques (Landais and Guérin, 1992), mais conduit à l'élimination d'un tiers du carbone du système à travers la respiration animale. L'évaluation du statut du sol en C, N et P à l'échelle de la parcelle dans différents agroécosystèmes du site d'étude a montré la nécessité d'instaurer des flux stables de carbone à travers le sol afin de maintenir la qualité du sol (Chapitres 2 et 3). Ainsi, les propositions destinées à améliorer la disponibilité et la qualité de la fumure à travers l'augmentation de l'effectif des troupeaux et la mise en stabulation du bétail (Bosma *et al.*, 1999) devraient aussi prendre en compte le coût énergétique (carbone) de telles pratiques pour les écosystèmes agricoles. La perte en matière organique/énergie est d'autant plus probable, que les restitutions de fumure depuis l'étable vers le champ, sont souvent limitées par le manque de moyen de transport et de main d'œuvre (Schleich, 1986). Une telle perte peut mettre en danger la durabilité des systèmes de production traditionnels, car les effets rapides et positifs du recyclage in situ des résidus de culture sur la qualité du sol, par l'action de la macrofaune souterraine, sont aujourd'hui bien connus (Mando, 1998 ; Mando et Stroosnijder, 1999).

5.4.3.2. Transferts organiques spatiaux, apports en carbone et bilan minéral

L'auréole de brousse est la principale source de carbone du village, sous la forme de nourriture, de bois et de fourrage. Mais en raison de sa superficie étendue, les sorties de carbone ne représentent encore que 8,9 % des stocks de carbone dans la biomasse aérienne, litière non comprise (voir Chapitre 4). Dans cette auréole, la perte de carbone est forte dans les champs cultivés (75 % du carbone dans la BA) et faible dans les jachères (3,2 % de carbone dans la BA). Des valeurs élevées ont aussi été enregistrées pour les cultures vivrières des champs de case (65 %) et des rizières (68 %). Mais la redistribution du carbone bénéficie à l'auréole de case aux dépens des autres auréoles (Tableau 5.2). Les apports en carbone dans les cultures vivrières de cette auréole ($3,8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) sont plus importants que les quantités généralement préconisées pour compenser la minéralisation du carbone organique du sol, lesquels estiment un taux relatif de minéralisation de la matière organique du sol de $0,06 \text{ an}^{-1}$ (de Ridder and van Keulen, 1990 ; Berger, 1996). Les stocks moyens réels de C calculés pour l'horizon 0-20 cm de six parcelles de cette auréole ont été de $17,7 \text{ tC ha}^{-1}$, alors que ceux des jachères âgées se sont élevés à $15,5 \text{ tC ha}^{-1}$ (Chapitres 2 et 3). Sous l'hypothèse raisonnable que les stocks de MOS des parcelles cultivées étaient égaux à ceux des jachères âgées il y a 20 ans (lorsque le village s'est déplacé vers sa localisation actuelle) le taux actuel de décomposition de la MOS serait de $0,21 \text{ an}^{-1}$ (ni la décomposition, ni l'exudation des racines n'ont été prises en compte). Cela suggère que les estimations généralement acceptées dans la littérature sont beaucoup trop faibles pour les sols sableux de la région.

Selon la dynamique des éléments minéraux, les sorties d'azote et de phosphore ont été bien équilibrées entre les champs de culture pluviale et les autres systèmes d'utilisation de l'espace, mais ces champs cultivés ont représenté 74 % des pertes d'azote et de phosphore, dont la presque totalité a bénéficié aux cultures vivrières, entraînant là un bilan positif en azote et en phosphore. Ainsi, le système actuel agit comme un impluvium pour le carbone et les nutriments, puisqu'il draine les ressources organiques des zones périphériques vers les cultures vivrières pluviales. En outre, le modèle d'organisation en auréoles permet une culture continue et durable de céréales à des rendements relativement élevés sur 7 % de la surface gérée par le village. Dans l'auréole de case (8 % du terroir) d'un village de la zone sahélienne, les apports en azote et en phosphore ont été estimés à $7,7 \text{ kgN ha}^{-1}$ et $1,1 \text{ kgP ha}^{-1}$ avec un niveau de chargement de 12 UBT ha^{-1} (Buerkert et Hiernaux, 1998). Ceci est inférieur à nos résultats ($+87 \text{ kgN ha}^{-1}$; $+8,3 \text{ kgP ha}^{-1}$), même en tenant compte de la différence des niveaux de stockage, ce qui indique un impact possible du climat sur les transferts potentiels d'éléments minéraux par l'élevage.

Dans la zone semi-aride du Burkina Faso, Krogh (1997) a montré dans quelle mesure le bilan minéral des systèmes de production repose sur l'échelle spatiale considérée. La plupart des bilans en azote et en phosphore

des champs de culture vivrière ont été négatifs. Cela n'a pas été le cas à l'échelle du village, puisque les sorties dues aux récoltes ont été gardées à l'intérieur des limites du village. Notre travail est arrivé à des résultats similaires : le bilan minéral dans l'auréole de brousse a été négatif, mais celui du terroir villageois a été positif après intégration de l'azote et du phosphore stockés dans les fosses septiques. Cependant, nos conclusions diffèrent de celles de Krogh, car nous pensons qu'une distinction doit être faite entre les bilans géographiques et fonctionnels : l'azote et le phosphore excrétés par les hommes ne seront pas recyclés et sont perdus pour le système de culture.

D'un point de vue minéral, le système dans son ensemble pourrait presque être considéré comme durable. Cependant, une des principales conditions est une bonne disponibilité du bétail, à travers lequel la majorité des flux de C, N et P vers le village se produit. Le potentiel de densités plus élevées de bétail à rendre les systèmes agricoles durables grâce à la production de fumier a été démontré en Afrique de l'Ouest (Schleich, 1986 ; Williams *et al.*, 1994 ; Bosma *et al.*, 1999). Mais à moins de se tourner vers des modèles plus intensifs de production tels que l'apport d'engrais minéral et l'amélioration des jachères (Hoefsloot et Van der Pol, 1993), la disponibilité du fourrage empêche rapidement le maintien de l'élevage dans les zones peuplées. La conservation de vastes zones de parcours périphériques (1) assure la disponibilité du fourrage pendant la période de culture, évitant ainsi la migration saisonnière -et la plupart du temps définitive- du bétail, comme cela est bien connu dans le bassin arachidier du Centre Sénégal (Lericollais and Milleville, 1993), (2) diminue la compétition entre les besoins humains et animaux de biomasse végétale, puisque d'importantes quantités de bois de feu sont stockées dans les jachères et l'auréole de brousse, (3) compense les pertes de nutriments du système par un faible taux d'épuisement minéral. Ayant observé des statuts chimiques et en carbone satisfaisants dans les sols de l'auréole de case, dans des villages sous différents climats du Burkina Faso, Prudencio (1993) conclue que l'évolution vers des systèmes de culture plus permanents épuisera la fertilité des sols des auréoles périphériques, mais pas celle des sols bien pourvus chimiquement de l'auréole de case. Selon ce qui a été présenté ici, nous ne pouvons complètement partager ce point de vue, puisque la qualité des sols des parcelles jouxtant l'auréole de case repose sur les flux organiques des auréoles de brousse et de savanes. L'intensification est susceptible de réduire la surface des sources de nutriments, d'affaiblir les mécanismes biologiques de restitution minérale et de mettre en question le maintien des moyens pour transférer ces éléments jusqu'aux zones de cultures vivrières (Giller *et al.*, 1997).

5.4.3.3. Autres flux de carbone, d'azote et de phosphore

Seuls les apports et les sorties d'origine organique de C, N et P ont été pris en compte ici. Les apports réels de carbone au sol devraient aussi prendre

en compte l'exudation des racines et leur décomposition, et la production de litière dans les jachères. Les transferts de carbone par l'érosion, le ruissellement et le lessivage devraient rester limités. Les flux de carbone dans l'eau étant estimés à 20 à 84 kgC ha⁻¹ an⁻¹ respectivement dans les jachères et les champs cultivés (Roose, communication personnelles.), les transferts de carbone atteindraient 10,6 t ha⁻¹ sur l'ensemble de la surface gérée par le village, soit moins de 2 % des flux liés à la biomasse végétale. Les facteurs affectant les bilans d'azote et de phosphore non pris en compte dans notre étude sont : la déposition atmosphérique, la fixation biologique d'azote, le lessivage, les pertes gazeuses et l'érosion. Pour les champs de culture sous pluviométrie incertaine au Sénégal, Stoorvogel et Smaling (1990) estiment le bilan net de ces facteurs à -3,5 kgN et -1,5 kgP ha⁻¹ an⁻¹, et l'accumulation biologique d'azote et de phosphore dans les jachères à +2,0 kgN et +0,87 kgP ha⁻¹ an⁻¹. En appliquant ces caractéristiques au village, le bilan minéral final du système serait de -4kgN et -1 kgP ha⁻¹ an⁻¹, ce qui est plus proche de l'équilibre que les résultats de ces auteurs (-14 kgN et -9kgP ha⁻¹ an⁻¹).

5.4.4. Tendances futures de la gestion des ressources en carbone

5.4.4.1. Evolution des flux de carbone

Bien que le rapport actuel des quantités de carbone redirigées par les agriculteurs pour satisfaire leurs besoins sur celles stockées dans la BA du terroir villageois soit faible (environ 16 %), il est probable qu'il augmente dans les prochaines années comme résultat du besoin croissant en terres cultivables. Quelle que soit l'option considérée de rendement de céréales et de niveau de vie, tous les scénarios indiquent un rapide épuisement des stocks de carbone, ainsi qu'une augmentation des besoins en matière organique, principalement en fourrage. L'intensification de l'utilisation des terres susceptible d'avoir lieu à Sare Yorobana dans les prochaines décennies pourrait facilement conduire à une saturation de l'espace du même ordre que celle expérimentée par le système de production Sereer au Centre Sénégal pendant la période 1965-1985, et, plus récemment, par la région du Sine-Saloum, non loin de la Haute-Casamance. La coexistence de la culture continue et de l'élevage est un autre modèle potentiel d'évolution pour les systèmes agricoles. Cependant, il demande des changements drastiques des pratiques agricoles, de la tenure foncière, aussi bien que l'utilisation accrue d'apports chimiques, et donc l'existence de structures d'encadrement financier et technique (Dugué, 1998a).

5.4.4.2. Considérations méthodologiques : limites du modèle

Le rapport flux de C/stock de C comme défini dans la simulation pourrait être vu comme un premier pas vers la construction d'un indicateur précis et basé sur le carbone, pour évaluer la viabilité d'un système de production. La viabilité est comprise ici comme l'aptitude à fournir des biens (aliments,

fourrage, bois, ...) et des moyens de production (bétail, fumier, ordures ménagères) dans une plage donnée de valeurs, pour un état initial donné (ici 1997), sous différents scénarios (croissance démographique, rendement des cultures, objectifs des agriculteurs). A cette étape de la modélisation, nous nous limitons au concept de viabilité, qui renvoie à un concept mathématique objectif. Les principales améliorations du modèle devraient inclure : (1) une représentation de la diversité sociale (moyens de production, besoins) (2) une représentation de l'hétérogénéité spatiale et des contraintes (3) une intégration des multiples échelles d'espace et de temps (4) une autonomisation des acteurs (stratégies individuelles des concessions, choix par les animaux des trajectoires de pâturage pendant le jour, dynamiques de végétation) ainsi que leur socialisation (par exemple, décisions communautaires de gestion des terres, dynamiques de végétation influencées par les prélèvements de biomasse végétale par les hommes/ animaux). L'adoption d'un outil de programmation flexible orienté objet, et la création d'un système multi-agents pour la représentation formalisée de la dynamique du carbone à l'échelle du village serait un outil plus précis qu'une feuille de calcul (Manlay *et al.*, 2000a). Alors seulement la modélisation pourrait être utilisée pour évaluer l'évolution du statut organique du système de production du village et estimer ainsi la durabilité comprise dans le sens pragmatique de Izac et Swift (1997a).

CHAPITRE 6. DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION

6.1. BASES AGROECOLOGIQUES DE LA VIABILITE DES SYSTEMES AGROPASTORAUX ACTUELS DE SARE YOROBANA

Quelques caractéristiques concernant la façon dont les agriculteurs réalisent une production viable de nourriture, de fourrage et de bois, avec peu d'intrants exogènes, peuvent être dégagées.

6.1.1. Stockage du carbone et des éléments minéraux

La jachère et la fumure, les deux principaux outils de maintien de la fertilité des agroécosystèmes de Sare Yorobana, sont des moyens efficaces pour stocker le carbone (C), l'azote (N) et le phosphore (P) aériens et souterrains, et pour modifier les propriétés du sol (chimiques pour la plupart) dans l'horizon 0-20 cm seulement.

Stocks dans la biomasse

La pratique de la jachère élève la biomasse végétale de 15 t ha⁻¹ de matière sèche (MS) dans les champs de culture, à 80 tMS ha⁻¹ après 15 ans d'abandon des cultures. La fumure stimule nettement la productivité végétale (+70kg de MS de grains de mil par tonne de MS de fumier ajoutée au sol par ha ; Chapitre 5).

Stocks dans le sol

Les tendances du stockage dans le sol sont moins claires. Alors que des stocks de carbone plus élevés ont été trouvés dans la rizière, du fait de la texture argileuse, la jachère n'a augmenté les stocks de carbone et d'azote que de 20 %, de 12,2 t ha⁻¹ dans les champs cultivés de l'auréole de brousse à 14,9 t ha⁻¹ dans les jachères de plus de 10 ans (horizon 0-20 cm). Le statut

organique de ces champs cultivés pourrait être légèrement amélioré par une fumure (+2,6 tC ha⁻¹), mais de forts accroissements (+10,6 tC ha⁻¹) dans les parcelles jouxtant les habitations ne peuvent être que spatialement limités à une petite surface, puisque de grandes quantités d'apports organiques riches en nutriments sont alors nécessaires (Chapitres 3 et 5).

A l'échelle du terroir villageois, les stocks moyens de carbone gérables par les agriculteurs (29,7 tC ha⁻¹, dont la moitié est stockée dans le sol) restent faibles comparés aux valeurs généralement trouvées sous des climats similaires ou plus humides (Nye and Greenland, 1960 ; Tiessen *et al.*, 1998). Cependant, cette étude suggère que la contribution "statique" du carbone stocké dans la biomasse végétale vivante à la productivité du système agricole est au moins aussi grande que celle du carbone inerte stocké dans la matrice argilo-humique du sol.

6.1.2. Flux et cycles

A l'échelle de la parcelle

Le rôle joué par le carbone inerte pour maintenir une bonne qualité du sol grâce à la jachère et à la fumure pourrait reposer d'avantage sur les formes transitoires du carbone que sur l'association stable avec la matrice minérale (Chapitres 2 et 3).

En effet, les estimations les plus faibles d'entrées de C (sans tenir compte des exudats racinaires ni, pour l'auréole de case, de la décomposition racinaire) ont été de 3,6-3,8 t ha⁻¹ an⁻¹ dans les jachères âgées et les cultures vivrières de l'auréole de case. Cela correspond au quart des stocks de carbone trouvés dans les 20 premiers centimètres du sol. L'augmentation limitée du taux de carbone organique du sol (COS) liée à la jachère et à la fumure, et la décomposition racinaire rapide mise en évidence par l'expérience des sachets de décomposition indique l'existence de puits biologiques de carbone importants parmi tous les agroécosystèmes du village. Bien que notre travail n'ait pas inclus de mesure biologique de l'activité du sol, plusieurs études menées sur ce site par le Programme pour l'Amélioration de la Jachères en Afrique de l'Ouest et Centrale (Floret, 1998), et dans d'autres lieux en Afrique subsaharienne (ASS) soulignent la forte relation entre utilisation de l'espace, cycle du carbone végétal et activité de la macrofaune et de la microflore. Le biote souterrain hétérotrophe redistribue la plupart des flux de carbone pour satisfaire ses besoins métaboliques et de construction. Un tel prélèvement est réalisé au détriment de l'accroissement de la teneur en COS, mais au bénéfice de la production de biomasse végétale, puisque la macrofaune améliore les propriétés physiques du sol et stimule l'activité microbiologique (Lavelle *et al.*, 1998 ; Mando, 1998), tandis que la microflore stocke et recycle les nutriments dans la rhizosphère.

Dans les sols locaux à texture grossière, l'organisation biologique compense la faible capacité de stockage du carbone, la constitution limitée d'une CEC et de structures en agrégats. Dans ce contexte, les systèmes racinaires

jouent un rôle primordial : ils stabilisent le sol, améliorent la porosité et fournissent de l'énergie sous forme de carbone au biote du sol. Ainsi, dans ces sols sableux tropicaux, l'évaluation de la fertilité du sol doit porter son attention sur les formes vivantes du carbone souterrain, aussi bien que sur l'intensité et les modèles temporels et spatiaux des flux de carbone.

Nous reconnaissons que le modèle conceptuel plante-sol suggéré ici est très particulier dans la mesure où il présente à la fois :

- un faible pouvoir tampon chimique et physique de la matrice du sol à texture grossière,
- une forte activité biologique due aux conditions tropicales de température et de précipitations et à la proximité de grands réservoirs de biomasse vivante, animale et végétale, autour du terroir.

Cependant, le contrôle de la productivité végétale par les schémas de distribution des flux de carbone et d'éléments minéraux est un sujet d'un grand intérêt dans les Tropiques (Myers *et al.*, 1994). Les choses peuvent être légèrement différentes dans des conditions tempérées ou froides, pour lesquelles un statut chimique satisfaisant, le ralentissement des processus biologiques et un pouvoir tampon du complexe organo-argileux peuvent atténuer la dynamique et le rôle biologique du carbone dans le sol. Cependant, tous les sols, y compris ceux qui se développent dans des conditions tempérées, résultent de la transformation biotique de la matrice minérale. Un sol est ainsi soumis aux lois universelles de thermodynamique qui régissent les systèmes vivants, parmi lesquelles l'établissement de flux stables d'énergie sous forme de carbone. Même dans les sols tempérés le rôle dynamique de carbone devrait être mieux considéré comme un outil biologique et respectueux de l'environnement, pour contrôler certaines des propriétés du sol à un coût économique réel moindre (voir ci-dessous).

A l'échelle du village

D'un point de vue biogéochimique, la jachère et la fumure animale diffèrent dans le sens où la jachère constitue un processus vertical d'accumulation du carbone et, dans une moindre mesure, de l'azote et du phosphore, alors que la fumure est une simple redistribution de matière. Cependant, l'établissement de flux stables d'énergie, de carbone et de nutriments maintient aussi la durabilité du système agropastoral de Sare Yorobana à un niveau plus global que celui de la parcelle. Comme le montrent les Chapitres 4 et 5, des transferts significatifs de matière organique sont nécessaires depuis les aires périphériques pour assurer l'équilibre minéral des cultures permanentes de l'auréole de case.

6.1.3. Diversité fonctionnelle et spatiale

L'établissement de flux à plusieurs échelles dépend de la conservation de la diversité considérée ici dans ses dimensions fonctionnelles et spatiales (hétérogénéité) (la diversité spécifique joue aussi un grand rôle dans le maintien du système de production, mais elle n'a pas été étudiée ici).

. *Au niveau microlocal*, la jachère tend à générer des îlots de fertilité sous les arbres (seuls ou en bosquets) et les termitières. Les gradients et les flux de C, N et P établissent des relations causales réciproques. Les écosystèmes de jachère de la région se comportent comme tout écosystème soumis à un stress (ici, les restrictions en nutriments et en eau), créant ainsi des structures spatiales contractées en tâches, et stimulant la biodiversité (Fittkau, 1997 ; Toussaint and Schneider, 1998 ; Guillaume *et al.*, 1999). Lorsque les jachères sont converties en cultures, l'homme perturbe les flux de matière organique, élimine les niches écologiques et limite la diversité spatiale et fonctionnelle du système plante-sol. A condition que de longues périodes de jachère soient conservées, la culture semi-permanente peut maintenir une part de la complexité spécifique et fonctionnelle de l'écosystème de savane originel.

. *Au niveau de l'exploitation*, les agriculteurs établissent un gradient de fertilité menant à l'identification de systèmes d'utilisation de l'espace distincts ; la conservation d'une auréole de culture continue est permise par le maintien des auréoles de brousse et de savane. Ces auréoles jouent le rôle de sources d'énergie et d'éléments minéraux qui compensent les puits dans les champs de case ; ils sont aussi des réserves de terres arables.

. *La communauté villageoise* est, elle aussi, une mosaïque de différents types d'exploitations. La diversité socioéconomique parmi les exploitants assure la viabilité du système. Les petits éleveurs nourrissent les animaux des gros éleveurs avec la paille et les adventices produites sur leurs champs, pendant la vaine pâture. Dans le même temps, ils reçoivent aussi un peu du fumier produit la journée par les animaux, qui constituent ainsi des accélérateurs biogéochimiques et des vecteurs de nutriments.

La conservation de la diversité à différents niveaux peut être vue comme une stratégie des écosystèmes et des hommes afin de réduire les accidents climatiques ou dus aux maladies, le risque étant alors distribué entre les espèces végétales (diversité intra- et interspécifique) et les environnements de croissance (échelles microlocale et de la parcelle).

6.1.4. Disponibilité en terre et en animaux

Comme il l'a été montré dans la Partie I, une caractéristique majeure du système est la superficie nécessaire pour le maintenir, qui représente aussi une contrainte à sa viabilité. Les terres périphériques jouent le rôle de source principale d'éléments minéraux pour le système (avec aussi la fixation biologique d'azote dans les champs d'arachide). La culture semi-permanente, pour être durable, nécessite une faible intensité de rotation (R, défini par Ruthenberg 1971), et donc de grandes surfaces non cultivées (Nye and Greenland, 1960 ; Floret *et al.*, 1993). La disponibilité en terre est aussi une condition préalable pour le maintien d'une activité d'élevage intensif, qui est essentielle pour l'équilibre minéral du système de production de Sare Yorobana. Une grande disponibilité en bétail est un autre fondement du fonctionnement correct du terroir. Avec 51 UBT km⁻² (UBT : unité de bétail tropical), Sare Yorobana se situe bien au-delà des densités habituellement enregistrées en Afrique de l'Ouest (Figure 6.1). Cela soulève bien sûr le problème de la représentativité de notre site d'étude, et des possibilités pour d'autres villages de constituer de tels troupeaux (voir 6.2.).

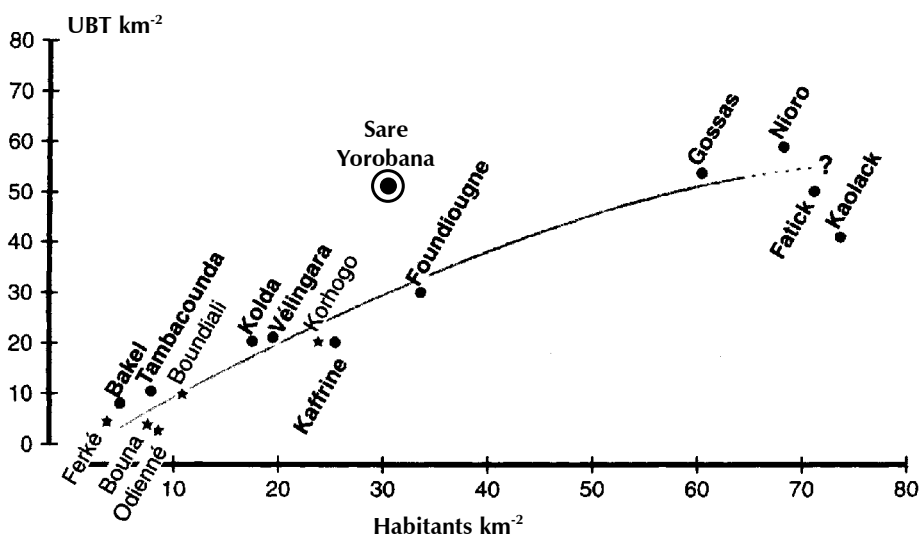


Figure 6.1 Densités de population et d'animaux à Sare Yorobana comparées à d'autres situations au Sénégal et au Nord de la Côte d'Ivoire (adapté de Landais et Lhoste 1993). UBT : unité de bétail tropical. 1 UBT = 250 kg de poids vif.

6.1.5. Efficacité

Utilisation de l'énergie

D'après les valeurs de chaleur de combustion du Tableau 6.1 et les valeurs du Chapitre 4, l'énergie mobilisée par la main d'œuvre (c'est à dire contenue dans les céréales consommées sur place) a été estimée à 0,68 kJ par kJ de grain produit (céréales et arachide) en 1997 à Sare Yorobana.

Puisque les animaux fournissent au système de production de nombreux services, l'énergie contenue dans leurs prélèvements (biomasse calculée au Chapitre 5) devrait être prise en compte pour l'évaluation réelle de l'énergie consommée par le système de production pour la production alimentaire. En procédant ainsi, on peut estimer que 12,4 kJ seraient consommés par kJ de grain produit.

Tableau 6.1 Données de chaleur de combustion (MJ kgMS⁻¹) des grains et de la biomasse végétative.

Composante	Chaleur de combustion
Grain [†]	
Maïs	18,3
Riz	18,1
Sorgho	15,8
Mil	17,7
Arachide	28,1
Parties végétatives [‡]	
	18,0

Utilisation de l'espace

L'efficacité de l'utilisation de l'espace (mesurée par la productivité aérienne de toutes les composantes de la biomasse) dans les champs de céréales de Sara Yorobana est élevée et a atteint 5,2 t ha⁻¹ (non comprises les mauvaises herbes, voir Chapitre 4). Dans ce village, les faibles index de récolte (biomasse des grains / biomasse aérienne totale) du mil (0,13) et des autres céréales locales comme le sorgho, ont une fonction agroécologique. La forte allocation de matière aux composantes végétatives peut être vue comme une nécessité pour les petites exploitations des SOA, puisqu'elle compense un faible accès à l'énergie exogène.

Sources : [†] Watt et Merrill (1963) et FAO (1997) [‡] Smil (1999)

6.1.6. Conclusion sur le système actuel

A toutes les échelles, spatiale ou fonctionnelles, il existe une remarquable invariance du rôle des flux et de l'hétérogénéité à maintenir les fonction d'accumulation et de redistribution nécessaires pour l'entretien des agroécosystèmes de Sare Yorobana (de la parcelle au terroir). Nous suggérons que le système villageois lui-même soit considéré comme une métastructure vivante. Cette représentation "biologique" est renforcée par la prééminence de la maintenance biologique sur la maintenance de substitution (au sens de Izac et Swift 1994) pour la viabilité du système de production. Le type de travail présenté ici apporte des indications pour la définition de nouveaux modes locaux de culture et de systèmes de production viables pour la région.

6.2. TENDANCES FUTURES DE L'EVOLUTION DU SYSTEME DE PRODUCTION DE SARE YOROBANA

Le système de Sare Yorobana est plutôt durable en terme de bilans minéraux, mais ce caractère devrait être considéré comme passager. Comme les simulations présentées dans la Partie II le suggèrent, la viabilité du système

pourrait en effet être remise en question pendant les prochaines décennies, et conduire à une agriculture minière si l'accroissement de la pression démographique n'est pas suivi par une évolution vers des pratiques plus intensives (van der Pol, 1992).

6.2.1. Alternatives techniques de gestion

D'après les résultats de la partie I, les recommandations techniques pour l'amélioration des pratiques agricoles dans les savanes devraient s'efforcer d'imiter les systèmes naturels quant à la manière dont ils recyclent le carbone, l'azote et le phosphore. Ces systèmes ont en effet établi des stratégies fiables pour faire face aux vicissitudes du climat et aux contraintes locales des sols. Un autre objectif de ces innovations devrait être la *"valorisation des ressources locales et la recherche de formes aussi autonomes que possible de gestion de la fertilité organique des sols, [qui] conditionnent la sécurisation des systèmes de production"* (Landais and Lhoste, 1993).

Deux types d'améliorations techniques peuvent être distingués. Le premier implique de légers changements dans le système. Dans les jachères, les pertes de carbone et d'azote dues au brûlis de 17-20 tMS ha⁻¹ de branches ligneuses et de feuilles pourraient être évitées. Bien que les cendres augmentent immédiatement le pH du sol et la disponibilité en nutriments, l'effet positif des paillages ligneux (branches ou feuilles, broyées ou non) sur les propriétés physiques du sol et les rendements des cultures est maintenant démontré en Afrique de l'Ouest (Ong, 1996 ; Wezel et Bocker, 1999 ; Aman *et al.*, accepté). Le fourrage avant la fin de la saison des pluies devrait aussi être considéré comme un moyen pour augmenter temporairement la disponibilité en fourrage de haute valeur nutritive pendant la saison sèche, mais à de faibles taux d'exploitation si aucun engrais n'est apporté (Fournier, 1996 ; Ickowicz *et al.*, 1998). Une meilleure intégration de l'agriculture et de l'élevage pourrait être effective en récoltant le fumier produit pendant la saison des pluies. Il a représenté 60 % de la production de déjections mesurée pendant la saison sèche 1996-97. Puisque la taille du cheptel varie beaucoup d'une exploitation à l'autre, et puisque les éleveurs apportent des doses excessives de fumier aux cultures vivrières, des accords sur le parage entre les exploitants pourraient améliorer la productivité de l'ensemble du système.

Des modifications plus importantes impliquant une réforme de la tenure foncière des améliorations durables seraient : la mise en place de haies, des jachères plantées, des cultures fourragères (Hoefsloot and Van der Pol, 1993 ; Bosma *et al.*, 1999), l'accroissement de la taille des troupeaux et leur mise en stabulation, ce qui améliorerait leur état sanitaire et réduirait les pertes d'azote par volatilisation (Murwira *et al.*, 1994), l'investissement en ressources non renouvelables telles que le phosphore rocheux local pour l'amélioration des sols.

La faisabilité des propositions présentées ici repose, en grande partie, sur des facteurs non techniques comme la disponibilité en main d'œuvre,

en animaux et en équipement, qui, en retour, dépendent des conditions sociales locales et du contexte économique et politique à une échelle plus large.

6.2.2. Déterminants humains locaux

6.2.2.1. Croissance démographique

La zone soudanienne du Sénégal montre une diminution notable et rapide du gradient de population du nord-ouest vers le sud-est (bassin arachidier contre Haute-Casamance et Sénégal Oriental), pour des conditions climatiques similaires. Les rapports annuels de la SODEFITEX, société chargée de l'introduction des systèmes de culture du coton (y compris l'intensification par les intrants chimiques et organiques) dans les systèmes agricoles traditionnels du Sénégal, indiquent une meilleure adoption de la stabulation dans le bassin arachidier surpeuplé que dans le sud et l'est du Sénégal. Ainsi, la théorie de Boserup (1978), selon laquelle chaque étape de l'intensification agricole est atteinte seulement lorsqu'un seuil de densité démographique est dépassé, et qui s'est vérifiée pour les pratiques de fumure dans les SOA (Schleich, 1986), devrait être pertinente pour le Sud Sénégal dans les prochaines décennies.

Il y a peu de doute que la population de Haute-Casamance continue à augmenter dans les années à venir. Cependant, le taux de croissance pour la Région est incertain et la valeur de 2,5 % an⁻¹ adoptée dans les simulations de la Partie II est assez théorique. D'un côté, les migrations vers des zones moins peuplées de la sous-région ou vers la capitale peuvent compenser partiellement la croissance naturelle de la population locale (Fanchette, 1999b). De l'autre, la pression démographique pourrait être stimulée par l'installation des villages maraboutiques venus du Nord sur les parcours de plateau, ce qui menacerait sérieusement le pastoralisme extensif et pourrait déjà engendrer des conflits pour la terre entre les agriculteurs migrants et les éleveurs locaux (Fanchette, 1999a).

6.2.2.2. Organisation locale

Les réflexes culturels, en particulier concernant l'élevage, influencent aussi les modes d'intensification des systèmes agropastoraux. En Afrique de l'Ouest, la densité spatiale du bétail est une fonction assez linéaire de la densité humaine (Figure 6.1). L'investissement des agriculteurs dans le cheptel ("*un capital sur pied*") est une caractéristique générale des petites exploitations africaines, et est souvent réalisé aux dépens d'investissements dans d'autres moyens de production tels que l'équipement et l'amélioration des sols (Ker, 1995). L'accroissement de la densité de bétail sera préjudiciable à l'ensemble du système de production si les pratiques d'élevage ne cessent d'être extensives, ce qui conduit invariablement à un surpâturage (Meertens *et al.*, 1996). Mais l'acquisition de bétail peut aussi conduire à une amélioration de la sécurisation de l'exploitation, si les animaux sont

nourris en stabulation avec une production de fourrage privatisée (Landais and Lhoste, 1993).

A Sare Yorobana, comme dans beaucoup d'autres villages de la région, les gros éleveurs ont retardé l'adoption du coton par le village à la place de l'arachide. Et ici, l'existence de gros éleveurs, qui bénéficient plus que les autres du système de vaine pâture, pourrait aussi retarder la privatisation de la terre et des ressources requises par les modèles d'intensification tels que les cultures fourragères, l'amendement des sols et la plantation de végétation pérenne.

6.2.2.3. Tenure foncière

Au Sénégal, comme dans la plupart des régions d'ASS, la terre appartient à l'Etat. Les conseils ruraux et les chefs de village ne peuvent attribuer aux concessions qu'un droit d'usage sur les champs que celles-ci ont défrichés ("*droit de hache*"). Jusqu'à récemment, les systèmes d'utilisation de l'espace, qui reposaient sur une tenure foncière communautaire, étaient adaptés à de telles contraintes. Cependant, lorsque la terre devient rare, les agriculteurs essaient de sécuriser leur accès à la terre par des cultures extensives sur lesquelles le lignage sera autorisé à revendiquer son "*droit de hache*". Ainsi, le statut foncier actuel accélère la diminution de la biomasse. Dans le même temps, des options d'intensification lourdes comme les amendements du sol et la plantation d'arbres ou de haies, nécessitent des ressources financières et les agriculteurs n'en bénéficient pas immédiatement. Ainsi, la sécurisation foncière est nécessaire afin d'éviter une stratégie de culture extensive de type minier et favoriser un investissement préférentiel dans les solutions pérennes de conservation de la biomasse ; malheureusement, les agriculteurs n'ont quasiment aucun pouvoir sur la politique foncière nationale.

6.2.3. Sare Yorobana dans une perspective globale

6.2.3.1. Défis de l'agriculture et de la société africaine

L'agriculture africaine doit faire face à la nécessité de nourrir une population croissante avec un accès limité à la maintenance de substitution. En outre, elle entre en compétition avec l'agriculture industrialisée du Nord, qui bénéficie d'un meilleur héritage agricole et d'un accès aux intrants manufacturés nécessaires à la maintenance de substitution (Mazoyer and Roudard, 1997). Ainsi, les alternatives de gestion pour des systèmes de production africains viables sont de plus en plus influencées par les politiques agricoles menées par les gouvernements et le dynamisme des structures d'encadrement technique (Mwangi, 1997 ; Naseem and Kelly, 1999). La recherche en économie de l'écologie apporte la preuve que l'amélioration du capital de fertilité du sol devrait être prise en charge par l'ensemble de la société (Izac, 1997b). L'investissement dans le capital agricole (sol, animaux, équipement) est la base de l'intensification. Les

agriculteurs seuls ne pourront y parvenir. L'Etat doit amorcer le processus en fournissant des moyens de production et en réévaluant les cours des productions alimentaires locales. Le soutien aux agriculteurs est d'autant plus important en ASS tropicale, que les accidents climatiques font obstacle à la rentabilité économique d'un changement vers une maintenance de substitution des systèmes agricoles.

6.2.3.2. Efficacité comparée des systèmes de production traditionnels africains et de l'agriculture moderne

Environ 10 kJ d'essence fossile sont nécessaires pour la production d'un kJ de nourriture consommée par un Américain (Steinhart et Steinhart, dans Hall et Hall 1993). L'estimation obtenue pour Sare Yorobana (12,4 kJ kJ⁻¹ ; voir 6.1.5.) est assez comparable à celle de Steinhart et Steinhart. Notre calcul simplifié suggère que l'agriculture industrialisée n'est pas plus efficace en terme de consommation d'énergie que les systèmes agropastoraux des savanes ouest-africaines (SOA), quelle que soit son efficacité en terme d'utilisation de la main d'œuvre. Le gaspillage d'énergie dans l'agriculture tempérée conventionnelle comparé aux systèmes de production tropicaux à faibles intrants a été bien établi comme un fait général par Hall et Hall (1993).

L'efficacité de l'utilisation de l'espace dans les champs de céréales de Sare Yorobana et dans les régions industrialisées est également comparable. Dans l'Union européenne, en effet, le rendement en céréales a atteint 5,4 t ha⁻¹ en 1997 (FAO, 2000). En utilisant un index de récolte de 0,45 (Smil, 1999) et une teneur en eau de 10 %, on arrive à 11 tMS ha⁻¹ de biomasse aérienne produite en Europe, ce qui n'est qu'un peu plus du double des rendements de biomasse aérienne trouvés pour le mil à Sare Yorobana. En fait, l'investissement le plus important dans la biomasse non comestible à Sare Yorobana que dans les systèmes de production de l'agribusiness du Nord doit être considéré comme un moyen de compenser la différence d'accès à une énergie exogène, sur laquelle l'agriculture moderne conventionnelle repose largement.

La compétitivité de l'agribusiness moderne dépend de la consommation de ressources non renouvelables comme les engrais, les pesticides et l'énergie fossile qui permettent une grande efficacité du travail. Cette compétitivité est ainsi maintenue non seulement par les subventions des politiques agricoles occidentales, mais aussi, dans une plus large mesure, par la consommation de ces ressources non renouvelables. L'utilisation de celles-ci conduit en effet à un dumping écologique et économique, puisque (1) la détérioration du capital naturel (au contraire de la dépréciation du capital manufacturé) est rarement prise en considération dans le calcul du coût économique réel des biens manufacturés (Costanza *et al.*, 1997 ; Izac, 1997b), (2) et jusqu'à maintenant, les coûts environnementaux de la pollution de l'eau et de l'air dans les régions industrialisées ne sont pas entièrement facturés aux pollueurs.

6.2.3.3. Considérations en terme de changement global

Le soutien de l'agriculture africaine est inévitable afin de sortir les petits exploitants de l'impasse dans laquelle ils ont été placés par une compétition inégale avec l'agriculture industrialisée (Mazoyer and Roudard, 1997).

Qui devrait payer pour le maintien de l'agriculture à faibles intrants en Afrique et ailleurs ? Les gouvernements locaux seront d'autant moins prêts à le faire que (1) maintenir des cours des produits alimentaires bas garantit la paix sociale dans les villes, (2) les programmes d'ajustement structurel sont hostiles à toute protection de l'agriculture locale, (3) les financements manquent.

En fait, une partie de la solution pourrait venir du changement de position des scientifiques et des décideurs sur la façon dont la valeur réelle des activités agricoles devrait être estimée. Cette valeur devrait englober non seulement la production alimentaire, mais aussi les sous-produits et les services fournis par l'agriculture à l'ensemble de la société, tels que la qualité de l'air et de l'eau, la stabilisation des sols, ou la séquestration et la réduction des émissions de carbone ; elle devrait aussi intégrer le coût réel de la dégradation des ressources naturelles comme les éléments minéraux, les carburants fossiles, et ses conséquences sur la qualité de l'environnement (Cole *et al.*, 1996 ; Izac, 1997b). Ce changement devrait être bénéfique aux systèmes de production traditionnels africains à faibles intrants, qui détériorent moins l'environnement que l'agriculture conventionnelle européenne et nord-américaine. Le financement de l'intensification agricole en Afrique pourrait être prochainement rendu possible par le commerce des permis de pollution destinés à contrôler les rejets de carbone dans l'atmosphère. La vente de ces permis par les régions africaines pourrait fournir des fonds pour leurs agriculteurs qui séquestrent le carbone dans le sol et la biomasse végétale grâce à des pratiques agricoles améliorées et à des investissements dans des cultures pérennes. Mais les agriculteurs devraient aussi être indemnisés pour le carbone fossile qu'ils n'utilisent pas, puisque leurs besoins en énergie sont fournis par une biomasse renouvelable.

6.3. LIMITES DE L'ETUDE ET ORIENTATIONS DE LA RECHERCHE

6.3.1. Quelques facteurs non pris en compte influençant la viabilité du système

L'approche globale adoptée dans ce projet implique d'importantes simplifications concernant certains des facteurs contrôlant la dynamique de l'agroécosystème villageois. Les principaux points, qui nécessitent encore des recherches supplémentaires, sont :

- le rôle de la variabilité inter annuelle, essentiellement la distribution des précipitations tout au long de la saison des pluies. Les données climatiques (Figure 4.1 ; Annexe 28) suggèrent que l'année 1997 a été représentative, d'un point de vue agroclimatique, des années précédentes. Cependant, même dans les régions soudaniennes bien dotées en précipitations, la stratégie des agriculteurs peut être influencée par les variations interannuelles des rendements dues aux événements climatiques,
- les fonctions de l'élevage. Nous avons considéré l'élevage essentiellement comme un moyen d'améliorer la fertilité des sols. Cette considération réductionniste a certainement laissé certains des principaux déterminants de la dynamique des systèmes de production mal compris (Landais et Lhoste, 1984). Dans le Sud Sénégal, l'aversion de certains villages pastoraux à adopter le coton plutôt que l'arachide comme culture de rente, et l'effet primordial du revenu potentiel provenant des produits laitiers sur l'adoption de la stabulation du bétail, apportent la preuve de la priorité accordée fréquemment par les agropasteurs aux stratégies d'élevage, plutôt qu'à celles de culture,
- les déterminants sociaux. Parmi ceux-ci, les rapports de force entre les exploitations, les contraintes de calendrier, et les savoir-faire techniques, n'ont été que partiellement évalués, bien que la diversité entre les exploitations se soit révélée être un élément structurant de l'agroécosystème villageois.

6.3.2. Besoins en recherche agroécologique

Notre étude a soulevé beaucoup de questions sur les déterminants écologiques de la production de biomasse végétale et sur le statut organo-minéral des sols locaux. Quelques indications ont été apportées sur les précautions méthodologiques à observer lorsque l'on utilise le carbone souterrain comme indicateur de la qualité des sols. Les variations saisonnières comparatives des stocks et des flux de carbone (à travers des mesures des rejets in situ de CO₂ et des inventaires de la faune et des micro-organismes) dans les écosystèmes cultivés ou non doivent être étudiées plus précisément. L'évaluation du statut organique devrait être faite en fonction de la nature des apports de carbone (quantité, qualité, schémas temporels et spatiaux de distribution) à l'échelle de la parcelle. Toute étude comparative avec d'autres sites devrait aussi prendre en compte le statut biologique de la petite région exprimé par la répartition des surfaces non cultivées, qui influence certainement l'intensité de l'activité biologique microlocale, et donc le taux de renouvellement du COS.

Identifier les déterminants de la dynamique des souches en fonction de l'intensité de rotation est d'une importance capitale, puisque les souches contrôlent clairement beaucoup de propriétés chimiques des sols sableux

locaux et la repousse des arbres. Cependant, ce genre d'étude soulève d'importantes difficultés méthodologiques -principalement d'échantillonnage. L'étude de la décomposition post-jachère des racines ligneuses est plus facile. Les données présentées ici (Chapitre 1) devraient être bientôt complétées par des analyses de données en cours provenant des expérimentations menées sur le site et dans la région plus sèche du Sine Saloum (Centre Sénégal). Ces expérimentations devraient apporter des informations supplémentaires sur le rôle du climat, de la faune du sol et des espèces ligneuses sur les dynamiques de décomposition après la coupe de la végétation.

Dans une perspective de changement global, notre étude offre seulement une estimation grossière des potentiels de séquestration du carbone des agroécosystèmes locaux, même à l'échelle de la parcelle. En effet, le travail de Denich *et al.* (2000) concernant les systèmes de culture itinérante en l'Amazonie de l'Est montre que les variations saisonnières du stockage de carbone dans le système plante-sol doivent être prises en compte pour évaluer l'efficacité réelle des options de gestion agricole dans la séquestration du carbone.

6.3.3. Recherche exploratoire

Evaluer le statut organique actuel d'un agroécosystème villageois fournit une information conceptuelle et opérationnelle essentielle. Puisque le contexte humain et économique est sensé changer rapidement dans le Sud Sénégal pendant les prochaines années, la prédiction des trajectoires possibles suivies par le terroir sous différents scénarios, est un défi intéressant et un aboutissement logique du travail présenté ici. Toute représentation formelle du système villageois est un objet complexe, qui doit tenir compte de la multiplicité des acteurs (hommes, animaux, plantes et sol dans une certaine mesure), de leurs interrelations et de leur hiérarchisation, à plusieurs échelles de temps et d'espace et de niveaux fonctionnels. La modélisation informatique est inévitable afin de manipuler un tel objet. L'essai de modélisation conduit dans la Partie II de ce travail, a apporté des prévisions qui méritaient d'être utilisées afin de comparer les effets de différents scénarios sur le statut organique du village. Cependant, les suppositions simplistes découlant du choix de l'outil tableur comprennent trop d'incertitudes sur les données obtenues pour une interprétation précise.

Un travail en cours avec C. Cambier (ISRA/IRD Dakar) devrait bientôt améliorer significativement les prévisions sur le statut organique de Sare Yorobana (Manlay *et al.*, 2000a). Un modèle de système multi-agent basé sur une programmation orientée objet est en cours de réalisation. Les agents (entités autonomes telles que les concessions et les animaux) interagissent (domination ou coopération) avec des "objets situés" (parcelle, végétation) pour satisfaire leurs besoins alimentaires, de bois, de fourrage, et monétaires. Les contraintes spatiales sur les itinéraires techniques, les rendements et la recherche de fourrage par le bétail, sont prises en compte. Le statut organique de chaque parcelle (biomasse végétale, stocks de COS)

est défini par la gestion actuelle et passée de la terre, la gestion de la fertilité et les taux de prélèvement de la biomasse par les hommes et les animaux. Les stratégies de sécurisation foncière sont aussi prises en compte. Un tel outil pourrait être d'une grande utilité méthodologique et conceptuelle, bien que son utilisation à des fins de décision demande beaucoup d'attention.

Références

- Abbadie L., Mariotti A., Menaut J.-C., 1992. Independence of savanna grasses from soil organic matter for their nitrogen supply. *Ecology* **73** (2), 608-613.
- Achard F., Banoin M., Bartholmey C., 2000. Gestion de la fumure animale dans un terroir du sud-ouest du Niger. In: Dugué P. (Ed.) *Fertilité et relations agriculture-élevage en zone de savane*, Montpellier, France, 5-6/05/1998. Centre International de Recherche pour le Développement, pp. 97-106.
- Achterstraat A., 1983. *Agriculture d'autosubsistance ou agriculture de rente ? La prise de décision des paysans entre différentes cultures, et l'impact de l'intervention de la SODEFITEX et de la culture cotonnière sur les sociétés Peul en Haute-Casamance. L'exemple de Lengouwal*. Inst. of Cult. Anthr., Free University, Amsterdam, Netherlands.
- Adams J., 1997. *Estimates of preanthropogenic carbon storage in global ecosystem types*. Oak Ridge National Laboratory, USA, [<http://www.esd.ornl.gov/projects/qen/carbon3.html>].
- Aina P.O., 1979. Soil changes resulting from long-term management practices in Western Nigeria. *Soil Science Society of America Journal* **43**, 173-177.
- Akpo L.E., 1998. *Effet de l'arbre sur la végétation herbacée dans quelques phytocénoses au Sénégal. Variations selon un gradient climatique*. PhD Thesis, Univ. Cheikh Anta Diop, Dakar, 135 p.
- Alexandre D.-Y., Kaïré M., 2000. Les productions des jachères soudaniennes (bois et produits divers). In: Floret C., Pontanier R. (Eds.), *La Jachère en Afrique Tropicale -Vol II. De la Jachère Naturelle à la Jachère Améliorée : Le Point des Connaissances*, Dakar, Senegal, 13-16/04/1999. John Libbey, Paris, sous presse.
- Allen-Diaz B., Chapin F.S., Diaz S., Howden M., Puigdefabregas J., Stafford Smith M., 1996. Rangelands in a changing climate : impacts, adaptations, and mitigation. In: Watson R.T., Zinoywera M.C., Moss R.H. (Eds.), *Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change : Scientific-Technical Analysis*. Cambridge University Press, New York, pp. 131-158.

- Almasie A., 1996. *Results of a literature study on the relation between soil characteristics (especially organic matter) and crop yield in tropical regions*. Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) - Wageningen Agricultural University (WAU), Montpellier.
- Aman S., Depatie S., Furlan V., Lemieux G., accepté. Effects of chopped twig wood (CTW) on maize growth and yields in the forest-savanna transition zone of Ivory Coast. *Tropical Agriculture*.
- Anderson D.W., 1995. The role of nonliving organic matter in soils. In: Zepp R.G., Sonntag C. (Eds.), *Role of Non Living Organic Matter in the Earth's Carbon Cycle*. John Wiley & Sons Ltd, pp. 81-92.
- Anderson J.M., Spencer T., 1991. *Carbon, Nutrient and Water Balances of Tropical Rain Forest Ecosystems Subject to Disturbance*. MAB Digest, Vol. 7. UNESCO, Paris, 95 p.
- Areola O., Aweto A.O., Gbadegesin A.S., 1982. Organic matter and soil fertility restoration in forest and savanna fallows in South Western Nigeria. *GeoJournal* **6** (2), 183-192.
- Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C., Pontanier R., 1993. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands. I. A view from the South. *Restoration Ecology* **1** (1), 8-17.
- Asadu C.L.A., Diels J., Vanlauwe B., 1997. A comparison of the contributions of clay, silt, and organic matter to the effective CEC of soils of sub-Saharan Africa. *Soil Science* **162** (11), 785-794.
- Azontonde A., Feller C., Ganry F., Remy J.-C., 1998. Le mucuna et la restauration des propriétés d'un sol ferrallitique au sud du Bénin. *Agriculture et Développement* **18**, 55-62.
- Bacyé B., 1993. *Influence des systèmes de culture sur l'évolution du statut organique et minéral des sols ferrugineux et hydromorphes de la zone soudano-sahélienne (Province du Yatenga, Burkina Faso)*. PhD Thesis, Univ. d'Aix-Marseille III, Marseille, 218 p.
- Baldensperger J., Staimesse J.P., Tobias C., 1967. *Notice Explicative de la Carte Pédologique du Sénégal au 1/200000 - Moyenne Casamance*. ORSTOM, Dakar, 134 p.
- Bationo A., Lompo F., Koala S., 1998. Research on nutrient flows and balances in West Africa: state-of-the-art. *Agriculture Ecosystems & Environment* **71** (1-3), 19-35.

- Bationo A., Mokwunye U., 1991. Role of manures and crop residue in alleviating soil fertility constraints to crop production : with special reference to the Sahelian and Sudanian zones of West Africa. In: Mokwunye U. (Ed.) *Alleviating Soil Fertility Constraints to Increased Crop Production in West Africa*. Kluwer Academic Pub., pp. 217-225.
- Bazile D., 1998. *Les gestions des espèces ligneuses dans l'approvisionnement en énergie des populations. Cas de la zone soudanienne du Mali*. PhD Thesis, Université de Toulouse le Mirail, Toulouse, 452 p.
- Bebwa B., Lejoly J., 1993. Soil organic matter dynamics and mineral nutrients content in a traditional fallow system in Zaire. In: Mulongoy K., Merckx R. (Eds.), *Soil Organic Matter Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture. Proceedings of an International Symposium*, Leuven, Belgium, 4-6/11/1991. John Wiley & Sons, pp. 135-142.
- Begon M., Harper J.L., Townsend C.R.L., 1998. *Ecology: Individuals, Populations and Communities*. 3/Ed. Blackwell Scientific Publications, Oxford, U.K., 1068 p.
- Bekunda M.A., Bationo A., Ssali H., 1997. Soil fertility management in Africa : a review of selected research trials. In: *Replenishing Soil Fertility in Africa*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, pp. 63-79.
- Bekunda M.A., Woomer P.L., 1996. Organic resource management in banana-based cropping systems of the Lake Victoria Basin, Uganda. *Agriculture Ecosystems & Environment* **59** (3), 171-180.
- Berger M., 1996. Fumure organique : des techniques améliorées pour une agriculture durable. *Agriculture et Développement* **10**, 37-46.
- Bertrand A., 1977. Les problèmes du bois de chauffage et du charbon de bois en Afrique tropicale. *Bois et Forêts des Tropiques* **173**, 39-48.
- Bertrand R., 1998. *Du Sahel à la Forêt Tropicale. Clés de Lecture des Sols dans les Paysages Ouest-Africains*. Repères. CIRAD, Montpellier, 272 p.
- Black H.I.J., Okwakol M.J.N., 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: The role of termites. *Applied Soil Ecology* **6** (1), 37-53.
- Blanfort V., 1991. *Phytosociologie et production de la végétation des parcours d'une petite région agropastorale de Moyenne-Casamance*

- (Sénégal). Master's Thesis, INA-PG - Univ. Paris XI et Paris VI, Paris, 127 p.
- Bockstaller C., Girardin P., van der Werf H.M.G., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *European Journal of Agronomy* **7** (1-3), 261-270.
- Bohringer A., Leihner D.E., Bocker R., 1996. Shoot biomass of natural stump regrowth in cropping systems in the subhumid forest savanna mosaic zone of West Africa. *Tropenlandwirt* **97** (2), 225-239.
- Bonneau M., Souchier B., 1994. *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*. 2/Ed. Masson, Paris, 665 p.
- Boserup E., 1978. *Evolution agraire et pression démographique*. Flammarion, Paris, 250 p.
- Bosma R.H., Bos M., Kante S., Kebe D., Quak W., 1999. The promising impact of ley introduction and herd expansion on soil organic matter content in southern Mali. *Agricultural Systems* **62** (1), 1-15.
- Brams E.A., 1971. Continuous cultivation of West African soils : organic matter diminution and effects of applied lime and phosphorus. *Plant and Soil* **35**, 401-474.
- Brand J., Pfund J.L., 1998. Site and watershed-level assessment of nutrient dynamics under shifting cultivation in eastern Madagascar. *Agriculture Ecosystems & Environment* **71** (1-3), 169-183.
- Breman H., Kessler J.J., 1995. *Woody Plants in Agro-Ecosystems of Semi-Arid Regions*. Advanced Series in Agricultural Sciences, Vol. 23. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 340 p.
- Brouwer J., Powell J.M., 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.
- Brown H.C.P., Thomas V.G., 1990. Ecological considerations for the future of food security in Africa. In: Edwards C.A., Lal R., Madden P., Miller R.H., House G. (Eds.), *Sustainable Agricultural Systems*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, pp. 353-377.
- Brown S., Anderson J.M., Woomer P.L., Swift M.J., Barrios E., 1994. Soil biological processes in tropical ecosystems. In: Woomer P.L., Swift M.J.

- (Eds.), *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 15-46.
- Brown S., Lugo A.E., 1990. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology* **6** (1), 1-32.
- Buerkert A., Hiernaux P., 1998. Nutrients in the West African Sudano-Sahelian zone: losses, transfers and role of external inputs. *Zeitschrift Fur Pflanzenernährung und Bodenkunde* **161** (4), 365-383.
- Buerkert A., Lamers J.P.A., Schmelzer G.H., Becker K., Marschner H., 1997. Phosphorus and millet crop residue application affect the quantity and quality of millet leaves and fodder weeds for ruminants in agro-pastoral systems of the Sahel. *Experimental Agriculture* **33** (3), 253-263.
- Cao M.K., Woodward F.I., 1998. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology* **4** (2), 185-198.
- Catinot R., 1994. Aménager les savanes boisées africaines. *Bois et Forêts des Tropiques* **241**, 53-69.
- César J., 1992. *La production biologique des savanes de Côte d'Ivoire et son utilisation par l'homme*. PhD Thesis, Université de Paris VI, Maison Alfort, 671 p.
- César J., Coulibaly Z., 1993. Conséquence de l'accroissement démographique sur la qualité de la jachère dans le Nord de la Côte d'Ivoire. In: Floret C., Serpantié G. (Eds.), *La Jachère en Afrique de l'Ouest. Atelier International*, Montpellier, France, 2-5/12/1991. ORSTOM, pp. 415-434.
- Charreau C., Nicou R., 1971. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques - III. Les facteurs biologiques: faune et végétation et leur influence sur le profil cultural et la productivité agricole. *L'Agronomie Tropicale* **26** (5), 565-631.
- Chopart J.L., 1980. *Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (arachide, mil, sorgho, riz pluvial)*. PhD Thesis, Institut National Polytechnique, Toulouse, 159 p.
- Chotte J.-L., Blanchart E., Lavelle P., 1995. Gestion durable des terres en milieu tropical. Régulation biologique des processus de décomposition de la matière organique. In: Ganry F., Campbell B. (Eds.), *Sustainable Land Management in African Semi-Arid and Subhumid Regions. Proceedings*

of the *SCOPE Workshop*, Dakar, Sénégal, 15-19/11/1993. CIRAD, pp. 89-97.

Cole V., Cerri C., Minami K., Mosier A., Rosenberg N., Sauerbeck D., 1996. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. In: Watson R.T., Zinoywera M.C., Moss R.H. (Eds.), *Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change : Scientific-Technical Analysis*. Cambridge University Press, New York, pp. 745-771.

Coleman D.C., Oades J.M., Uehara G., 1989. Soil organic matter : tropical vs. temperate. In: Coleman D.C., Oades J.M., Uehara G. (Eds.), *Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems*. Nifal Project, Univ. of Hawaii, pp. 1-4.

Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253-260.

Coulomb J., 1976. La race N'Dama. Quelques caractéristiques zootechniques. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux* 29 (4), 367-380.

Coulomb J., Serres H., Tacher G., 1980. *L'Elevage en Pays Sahéliens*. Collection "Techniques Vivantes". PUF-Agence de Coopération Culturelle et Technique, 192 p.

Crétenet M., 1996. Expérimentation des systèmes de culture dans les pays tropicaux : cas des zones cotonnières d'Afrique Noire. In: Budelman A. (Ed.) *Agricultural R&D at the Crossroads. Merging Systems Research and Social Actor Approaches*. Royal Tropical Institute, Amsterdam, pp. 69-80.

Dabin B., 1967. Application des dosages automatiques à l'analyse des sols. 3ème partie. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie* 5 (3), 257-286.

Dacosta H., 1989. *Précipitations et écoulements sur le bassin de la Casamance*. PhD Thesis, Univ. Cheikh Anta Diop, Dakar, 278 p.

de Leeuw P.N., Reynolds L., Rey B., 1994. Nutrient transfers from livestock in West African agricultural systems. In: Powell J.M., Fernandez-Rivera S., Williams T.O., Renard C. (Eds.), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa. Proceedings of an International Conference*, Addis Ababa, Ethiopia, 22-26/11/1993. ILCA (International Livestock Centre for Africa), pp. 371-391.

- de Ridder, van Keulen H., 1990. Some aspects of the role of organic matter in sustainable intensified arable farming systems in the West-African semi-arid-tropics (SAT). *Fertilizer Research* **26**, 299-310.
- de Wolf J., 1998. Species composition and structure of the woody vegetation of the Middle Casamance region (Senegal). *Forest Ecology and Management* **111** (2-3), 249-264.
- Déat M., Joly A., Dubernard J., Sément G., 1976. Exportations minérales du cotonnier et de quelques cultures tropicales en zone de savane africaine. *Coton et Fibres Tropicales* **31** (4), 409-418.
- Defoer T., de Groote H., Hilhorst T., Kante S., Budelman A., 1998. Participatory action research and quantitative analysis for nutrient management in southern Mali. A fruitful marriage? *Agriculture Ecosystems & Environment* **71** (1-3), 215-228.
- Delacharlerie P.F., 1994. *Contribution à l'étude de l'alimentation des bovins sur parcours naturel en Moyenne-Casamance (Sénégal) : composition botanique des régimes, rôle des fourrages ligneux. Première approche de la disponibilité fourragère ligneuse*. Master's Thesis, ENVA, Maison-Alfort, 91 p. p.
- Delaney M., Brown S., Lugo A.E., Torres-Lezama A., Quintero N.B., 1997. The distribution of organic carbon in major components of forests located in five life zones of Venezuela. *Journal of Tropical Ecology* **13** (Part 5), 697-708.
- Denich M., Kanashiro M., Vlek P.L.G., 2000. The potential and dynamics of carbon sequestration in traditional and modified fallow systems of the eastern Amazon region, Brazil. In: Lal R., Kimble J.M., Stewart B.A. (Eds.), *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*. Crc Press Inc, Boca Raton, pp. 213-229.
- Denich M., Kanashiro M., Vlek P.L.G., sous presse. *The potential and dynamics of carbon sequestration in traditional and modified fallow systems of the Eastern Amazon region, Brazil*. Advances in Soil Science.
- Derouard L., Villenave C., Lavelle P., Masse D., 1998. Evolution de la macrofaune du sol au cours d'un hivernage dans des jachères d'âges différents au Sénégal. In: Floret C. (Ed.) *Raccourcissement du temps de jachère, biodiversité et développement durable en Afrique Centrale (Cameroun) et en Afrique de l'Ouest (Mali, Sénégal)*. Final report. Comm. des Communautés européennes. Contrat TS3-CT93-0220 (DG 12 HSMU), and IRD Paris, pp. 139-145.

- Derouw A., 1998. Gestion de la fertilité du sol sur un terroir sahélien. Fumure animale, matière organique et encroûtement superficiel du sol dans les systèmes de culture de mil, étude au Niger. *Agriculture et Développement* **18**, 63-70.
- Desanker P.V., Frost P.G.H., Justice C.O., Scholes R.J. (Eds.), 1995. *The Miombo Network : Framework for a Terrestrial Transect Study of Land-Use and Land-Cover Change in the Miombo Ecosystems of Central Africa*, IGBP Report, Vol. 41. The International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), Stockholm, 109 p.
- Detwiler R.P., 1986. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils. *Biogeochemistry* **2**, 67-93.
- Diouf M., 1990. Diagnostic agronomique en parcelles paysannes. Une méthode d'amélioration des systèmes de culture. In: *Savanes d'Afrique, Terres Fertiles ?*, Montpellier, France, 10-14/12/1990. Ministère de la Coopération - CIRAD, pp. 123-143.
- Donfack P., Floret C., Pontanier R., 1995. Secondary succession in abandoned fields of dry tropical Northern Cameroon. *Journal of Vegetation Science* **6**, 499-508.
- Duchaufour P., 1983. *Pédogenèse et Classification*. Masson, Paris, 491 p.
- Dufrène E., Ochs R., Saugier B., 1990. Oil palm photosynthesis and productivity linked to climatic factors -. *Oléagineux* **45** (8-9), 345-355.
- Dugué P., 1985. Utilisation des résidus de récolte dans un système agro-pastoral sahélo-soudanien au Yatenga (Burkina-Faso). In: *Relations Agriculture-Elevage. Actes du Deuxième Séminaire du DSA/CIRAD*, Montpellier, France, 10-13/09/1985. CIRAD-DSA, pp. 76-85.
- Dugué P., 1998a. Gestion de la fertilité et stratégies paysannes. Le cas des zones de savanes d'Afrique de l'Ouest. *Agriculture et Développement* **18**, 13-20.
- Dugué P., 1998b. Les transferts de fertilité dus à l'élevage en zone de savane. *Agriculture et Développement* **18**, 99-107.
- Dugué P., 2000. Flux de biomasse et gestion de la fertilité à l'échelle des terroirs. Etude de cas au Nord Cameroun et essai de généralisation aux zones de savane d'Afrique sub-saharienne. In: Dugué P. (Ed.) *Fertilité et relations agriculture-élevage en zone de savane*, Montpellier, 5-6/05/1998. Centre International de Recherche pour le Développement, pp. 27-59.

- Egharevba P.N., non daté. A review of millet work at the Institute for Agricultural Research of Samaru, Nigeria.
- Ellert B.H., Bettany J.R., 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science* **75**, 529-538.
- ENGREF, 2000. *Research at ENGREF*. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, [<http://www.engref.fr/ANGLAIS/Accueil.htm>].
- Eswaran H., van den Berg E., Reich P., 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal* **57**, 192-194.
- Fall S., 1998. *Impact de deux espèces de termites à régime alimentaire différencié sur la matière organique et le compartiment microbien de termitières*. Master's Thesis, UCAD, Dakar, 86 p.
- Fanchette S. (Ed.), 1999a. *Colonisation des terres sylvo-pastorales et conflits fonciers en Haute-Casamance*, Pastoral Land Tenure Series, Vol. 13. International Institute for Environment and Development, London, 31 p.
- Fanchette S., 1999b. Densité de population et intensification agro-pastorale en Haute-Casamance. *Espaces, Populations, Sociétés* **1**, 67-81.
- FAO, 1989. *Studies on the volume and yield of tropical forest stands. Dry forest formations*. Forestry Papers, Vol. 51. Food and Agricultural Organisation, Rome, 112 p.
- FAO, 1997. *Carbohydrates in human nutrition*. FAO Food and Nutrition Paper, Vol. 66. Food and Agricultural Organization, Rome, 129 p.
- FAO, 1998a. *Current World Fertilizer Situation and Outlook 1996/1997 - 2002/2003*. Food and Agricultural Organisation, Rome.
- FAO, 1998b. *World reference base for soil resources*. World Soil Resources Reports, Vol. 84. Food and Agricultural Organisation, Rome, 98 p.
- FAO, 2000. *FAOStat-Agriculture database*. Food and Agricultural Organization, [<http://apps.fao.org/>].
- Fearnside P.M., Barbosa R.I., 1998. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management* **108** (1-2), 147-166.
- Feller C., 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Application aux sols tropicaux, à textures

grossières, très pauvres en humus. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie* **27** (4), 339-346.

Feller C., 1981. *Transformation de résidus de récolte marqués (pailles 14C 15N, compost 14C) et devenir de l'azote-engrais (15N-urée) dans un agrosystème tropical*. ORSTOM Dakar - CEA - DB/SRA Cadarache.

Feller C., 1993. Organic inputs, soil organic matter and functional soil organic compartments in low-activity clay soils in tropical zones. In: Mulongoy K., Merckx R. (Eds.), *Soil Organic Matter Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture. Proceedings of an International Symposium*, Leuven, Belgium, 4-6/11/1991. John Wiley & Sons, pp. 77-88.

Feller C., 1995a. *La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1. Recherche de compartiments fonctionnels. Une approche granulométrique*. Collection TDM, Vol. 144. ORSTOM, Paris, 393 p.

Feller C., 1995b. La matière organique du sol et la recherche d'indicateurs de la durabilité des systèmes de culture dans les régions tropicales semi-arides et subhumides d'Afrique de l'Ouest. In: Ganry F., Campbell B. (Eds.), *Sustainable Land Management in African Semi-Arid and Subhumid Regions. Proceedings of the SCOPE Workshop*, Dakar, Senegal, 15-19/11/1993. CIRAD, pp. 123-130.

Feller C., Balesdent J., Nicolardot B., Cerri C., 2000. Approaching "functional" soil organic matter pools through particle-size fractionation. Examples for tropical soils. *Advances in Soil Science*, sous presse.

Feller C., Beare M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* **79** (1-4), 69-116.

Feller C., Chopart J.L., Dancette F., 1987. Effet de divers modes de restitution de pailles de mil sur le niveau et la nature du stock organique dans deux sols sableux tropicaux (Sénégal). *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie* **23** (3), 237-252.

Feller C., Ganry F., Cheval M., 1981. Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agro-système tropical. I. Influence d'une fertilisation azotée (urée) et d'un amendement organique (compost) sur la répartition du carbone et de l'azote dans différents compartiments d'un sol sableux. *L'Agronomie Tropicale* **36** (1), 9-17.

Feller C., Milleville P., 1977. Evolution des sols de défriche récente dans la région des Terres Neuves (Sénégal Oriental). I : Présentation de l'étude

et évolution des principales caractéristiques morphologiques et physico-chimiques. *Cahiers ORSTOM, Série Biologie* **12** (3), 199-211.

Fernandes P., 1999. *Effet des modes de gestion des terres en zone sahélienne sur les termes et l'évolution de leur bilan organique et biologique: conséquences pour une production céréalière soutenue - Cas du Sénégal*. PhD Thesis, Inst. Nat. Polytech. de Lorraine, Nancy, 109 p.

Fernandez-Rivera S., Williams T.O., Hiernaux P., Powell J.M., 1994. Faecal excretion by ruminants and manure availability for crop production in semi-arid West-Africa. In: Powell J.M., Fernandez-Rivera S., Williams T.O., Renard C. (Eds.), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa. Proceedings of an International Conference*, Addis Ababa, Ethiopia, 22-26/11/1993. ILCA (International Livestock Centre for Africa), pp. 149-169.

FIA-SLE, 1990. *L'Analyse Socio-Economique des Systèmes d'Exploitation Agricole et de la Gestion de Terroir dans le Bas-Saloum, Sénégal*. Schriftenreihe des Fachbereichs, Vol. 132. Verlag-Technische Universität Berlin, Berlin, 225 p.

Fittkau E.J., 1997. Structure, function and diversity of Central Amazonian ecosystems. *Natural Resources and Resource Development* **45/46**, 28-41.

Floret C. (Ed.), 1998. *Raccourcissement du temps de jachère, biodiversité et développement durable en Afrique Centrale (Cameroun) et en Afrique de l'Ouest (Mali, Sénégal): Final Report*. Comm. des Communautés Européennes. Contrat TS3-CT93-0220 (DG 12 HSMU), and IRD Paris, 245 p.

Floret C., Pontanier R., Serpantié G., 1993. *La Jachère en Afrique Tropicale*. Man and Biosphere, Vol. 16. UNESCO, Paris, 86 p.

Fogel R., 1985. Roots as primary producers in below-ground ecosystems. In: Fitter A.H. (Ed.) *Ecological Interactions in Soil. Plant, Microbes and Animals*. Blackwell Scientific Pub., pp. 23-36.

Fournier A., 1982. Cycle saisonnier de la biomasse herbacée dans les savanes de Ouango-Fitini. *Annales de l'Université d'Abidjan, Série E* **XV**, 63-94.

Fournier A., 1996. Dans quelle mesure la production nette de matière végétale herbacée dans les jachères en savane soudanienne est-elle

utilisable pour le pâturage ? In: Floret C. (Ed.) *La Jachère, Lieu de Production*, Bobo Dioulasso, Burkina Faso, 2-4/10/1996, pp. 101-111.

Friesen D.K., Rao I.M., Thomas R.J., Oberson A., Sanz J.I., 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant and Soil* **196** (2), 289-294.

Frommel D., 1999. Coup de chaleur sur la planète - Heatwave hits the planet. *Le Monde Diplomatique* (Paris), Décembre 1999, 22-23.

Gavinelli E., Feller C., Larre-Larrouy M.C., Bacyé B., Djegui N., Nzila J.d.D., 1995. A routine method to study soil organic matter by particle-size fractionation: example for tropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **26** (11-12), 1749-1760.

Giller K.E., Beare M.H., Lavelle P., Izac A.M.N., Swift M.J., 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. *Applied Soil Ecology* **6** (1), 3-16.

Gleave M.B., 1996. The length of the fallow period in tropical fallow farming systems : a discussion with evidence from Sierra Leone. *Geographical Journal* **162** (1), 14-24.

Greenland D.J., Nye P.H., 1959. Increases in the carbon and nitrogen content of tropical soils under natural fallows. *Journal of Soil Science* **10** (2), 284-299.

Greenland D.J., Wild A., Adams D., 1992. Organic matter dynamics in soils of the tropics - from myth to complex reality. In: Lal R., Sanchez P.A. (Eds.), *Myths and Science of Soils of the Tropics*. Soil Science Society of America, Madison, pp. 17-33.

Gregorich E.G., Carter M.R., Angers D.A., Monreal C.M., Ellert B.H., 1996. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science* **74**, 367-385.

Grisi B., Grace C., Brookes P.C., Benedetti A., Dell Abate M.T., 1998. Temperature effects on organic matter and microbial biomass dynamics in temperate and tropical soils. *Soil Biology & Biochemistry* **30** (10-11), 1309-1315.

Guérin H., Richard D., Lefevre P., Friot D., Mbaye N., 1989. Prévision de la valeur nutritive des fourrages ingérés sur parcours naturels par les ruminants domestiques sahéliens et soudaniens. In: XVIth *International Grassland Congress*, Nice, France, 4-11/10/1989. INRA, pp. 879-880.

- Gueye F., Ganry F., 1981. *Recyclage des résidus de récolte par la voie fermentative. Exemple de deux pailles: mil et maïs*. International Foundation for Science - Institut Sénégalais de Recherches Agricoles/ CNRA, Stockholm - Bambey.
- Guillaume K., Abbadie L., Mariotti A., Nacro H., 1999. Soil organic matter dynamics in tiger bush (Niamey, Niger). Preliminary results. *Acta Oecologica - International Journal of Ecology* **20** (3), 185-195.
- Hall C.A.S., Hall M.H.P., 1993. The efficiency of land and energy use in tropical economies and agriculture. *Agriculture Ecosystems & Environment* **46**, 1-30.
- Harmand J.M., Njiti C.F., 1998. Effets de jachères agroforestières sur les propriétés d'un sol ferrugineux et sur la production céréalière. *Agriculture et Développement* **18**, 21-29.
- Harmand J.M., Njiti C.F., Bernhard-Reversat F., Feller C., Oliver R., 2000. Variation des stocks de carbone dans le sol au cours du cycle jachère arborée - culture en zone soudanienne du Cameroun. In: Floret C., Pontanier R. (Eds.), *La Jachère en Afrique Tropicale - Vol I. Actes du Séminaire International*, Dakar, Senegal, 13-16/04/1999. John Libbey, Paris, pp. 706-713.
- Hatcher L., Stepanski E.J., 1994. *A step-by-step approach to using the SAS System for univariate and multivariate statistics*. SAS Institute Inc., Cary, NC, 552 p.
- Hendrix P.F., Crossley D.A., Blair J.M., Coleman D.C., 1990. Soil biota as components of sustainable agroecosystems. In: Edwards C.A., Lal R., Madden P., Miller R.H., House G. (Eds.), *Sustainable Agricultural Systems*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, pp. 637-654.
- Herrick J.E., Wander M.M., 1998. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: The importance of distribution, composition, and soil biological activity. In: Lal R., Kimble J.M., Follett R.F., Stewart B.A. (Eds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press Inc, Boca Raton, pp. 405-425.
- Hiernaux P., Fernandez-Rivera S., Schlecht E., Turner M.D., Williams T.O., 1997. Livestock-mediated nutrient transfers in Sahelian agroecosystems. In: Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M. (Eds.), *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems. Proceedings of the Regional Workshop*, Niamey, Niger, 4-8/03/1997. Margraf Verlag, pp. 339-347.

- Hoefsloot H., Van der Pol F., 1993. *Jachères Améliorées. Options pour le Développement des Systèmes de Production en Afrique de l'Ouest*. Bulletins de l'Institut Royal des Tropiques, Vol. 333. Royal Tropical Institute, Amsterdam, 85 p.
- Houghton R.A., 1995. Land-use change and the carbon cycle. *Global Change Biology* **1**, 275-287.
- Hulugalle N.R., 1994. Long-term effects of land clearing methods, tillage systems and cropping systems on surface soil properties of a tropical alfisol in S.W. Nigeria. *Soil Use and Management* **10**, 25-30.
- Ickowicz A., Usengumuremyi J., Badiane A., Richard D., Colleye F., Dupressoir D., 1998. Interactions entre jachère et systèmes d'alimentation des bovins en zone soudanienne du Sénégal : choix techniques et dynamique de développement (zone soudanienne, Sénégal). In: Floret C., Pontanier R. (Eds.), *Jachère et Systèmes Agraires*, Niamey, Niger, 30/09-2/10-1998. ORSTOM, pp. 123-138.
- Ickowicz A., Usengumuremyi J., Bastien D., de Choudens 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: XVIIIth *International Grassland Congress*, Winnipeg-Saskatoon, Canada, 8-19/06/97, . sous presse.
- Izac A.M.N., 1997a. Developing policies for soil carbon management in tropical regions. *Geoderma* **79** (1-4), 261-276.
- Izac A.M.N., 1997b. Ecological economics of investing in natural resource capital in Africa. In: *Replenishing Soil Fertility in Africa*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, USA, pp. 237-251.
- Izac A.M.N., Swift M.J., 1994. On agricultural sustainability and its measurement in small-scale farming in sub-Saharan Africa. *Ecological Economics* **11**, 105-125.
- Jacquemard J.C., 1995. *Le Palmier à Huile*. Le Technicien d'Agriculture Tropicale. Maisonneuve et Larose, Paris, 207 p.
- Jaffre T., 1984. *Evolution de la biomasse épigée et du stock de carbone d'une culture pérenne: le palmier à huile (Elaeis guineensis Jacq.)*. ORSTOM, Abidjan.
- Jaiyeoba I.A., 1995. Changes in soil properties related to different land uses

in part of the Nigerian semi-arid Savannah. *Soil Use and Management* **11**, 84-89.

Jenkinson D.S., Ayanaba A., 1977. Decomposition of carbon-14 labelled plant material under tropical conditions. *Soil Science Society of America Journal* **41**, 912-915.

Jenny H., Gessel S.P., Bingham F.T., 1949. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Science* **68**, 419-432.

Jones C.J., Lawton J.H., Shachak M., 1994. Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* **69**, 373-386.

Jones J.A., 1990. Termites, soil fertility and carbon cycling in dry tropical Africa: a hypothesis. *Journal of Tropical Ecology* **6**, 291-305.

Jones M.J., 1971. The maintenance of soil organic matter under continuous cultivation at Samaru, Nigeria. *Journal of Agricultural Science* **77**, 473-482.

Jones M.J., 1973. The organic matter content of the savanna soils of West Africa. *Journal of Soil Science* **24** (1), 42-53.

Jones M.J., Wild A., 1975. *Soils of the West African Savanna*. Technical Communications, Vol. 55. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, 246 p.

Juo A.S.R., Franzluebbers K., Dabiri A., Ikhile B., 1995. Changes in soil properties during long-term fallow and continuous cultivation after forest clearing in Nigeria. *Agriculture Ecosystems & Environment* **56**, 9-18.

Juo A.S.R., Manu A., 1996. Chemical dynamics in slash-and-burn agriculture. *Agriculture Ecosystems & Environment* **58** (1), 49-60.

Kaïré M., 1999. *La production ligneuse des jachères et son utilisation par l'homme au Sénégal*. PhD Thesis, Université d'Aix-Marseille I, Marseille, 115 p.

Kaiser P., 1983. The role of soil micro-organisms in savanna ecosystems. In: Bourlière F. (Ed.) *Tropical Savannas*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, pp. 541-557.

Kay B.D., 1998. Soil structure and organic carbon: a review. In: Lal R., Kimble J.M., Follett R.F., Stewart B.A. (Eds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press Inc, Boca Raton, pp. 169-197.

- Ker A., 1995. *Farming Systems in the African Savanna*. A Continent in Crisis. International Development Research Centre (IDRC), Ottawa, 176 p.
- Khombe C.T., Dube I.A., Nyathi P., 1992. The effects of kraaling and stover supplementation during the dry season on body weights and manure production of Mashona steers in Zimbabwe. *African Livestock Research* **1**, 18-23.
- Kotto-Same J., Woomer P.L., Appolinaire M., Louis Z., 1997. Carbon dynamics in slash-and-burn agriculture and land use alternatives of the humid forest zone in Cameroon. *Agriculture Ecosystems & Environment* **65** (3), 245-256.
- Kowal J.M., Kassam A.H., 1978. *Agricultural Ecology of Savanna : a Study of West Africa*. Clarendon Press, Oxford, UK, 403 p.
- 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.
- Lambert G., 1992. Les gaz à effet de serre. *La Recherche* **243**, 550-556.
- Lamers J., Buerkert A., Makkar H.P.S., von Oppen M., Becker K., 1996. Biomass production, and feed and economic value of fodder weeds as by-products of millet cropping in a sahelian farming system. *Experimental Agriculture* **32** (3), 317-326.
- Lamotte M., Bourlière F., 1978. *Problèmes d'Ecologie : Structure et Fonctionnement des Ecosystèmes Terrestres*. Masson, Paris, 345 p.
- Lamotte M., Bourlière F., 1983. Energy flow and nutrient cycling in *tropical savannas*. In: Bourlière F. (Ed.) *Tropical Savannas*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, pp. 583-603.
- Landais E., Guérin H., 1992. Systèmes d'élevage et transferts de fertilité dans la zone des savanes africaines. I. La production des matières fertilisantes. *Cahiers Agricultures* **1**, 225-238.
- Landais E., Lhoste P., 1984. L'association agriculture-élevage en Afrique Tropicale : un mythe techniciste confronté aux réalités du terrain. *Cahiers des Sciences Humaines* **26** (1-2), 217-235.
- Landais E., Lhoste P., 1993. Systèmes d'élevage et transferts de fertilité dans la zone des savanes africaines. II. Les systèmes de gestion de

- la fumure animale et leur insertion dans les relations entre l'élevage et l'agriculture. *Cahiers Agricultures* **2**, 9-25.
- Larbi A., Dung D.D., Olorunju P.E., Smith J.W., Tanko R.J., Muhammad I.R., Adekunle I.O., 1999. Groundnut (*Arachis hypogaea*) for food and fodder in crop-livestock systems: forage and seed yields, chemical composition and rumen degradation of leaf and stem fractions of 38 cultivars. *Animal Feed Science and Technology* **77** (1-2), 33-47.
- Lavelle P., Barois I., Blanchart E., Brown G., Brussaard L., Decaëns T., Fragoso C., Jimenez J.J., ka Kajondo K., Martinez M.d.L.A., Moreno A., Pashanasi B., Senapati B., Villenave C., 1998. Earthworms as a resource in tropical agroecosystems. *Nature & Resources* **34** (1), 26-41.
- Lavelle P., Bignell D., Lepage M., Wolters V., Roger P., Ineson P., Heal O.W., Dhillon S., 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology* **33** (4), 159-193.
- Lericollais A., Milleville P., 1993. La jachère dans les systèmes agropastoraux Sereer au Sénégal. In: Floret C., Serpantié G. (Eds.), *La Jachère en Afrique de l'Ouest. Atelier International*, Montpellier, France, 2-5/12/1991. ORSTOM, pp. 133-145.
- Lopes da Silva M., Vielhauer K., Denich M., Vlek P.L.G., 1998. Can tree enrichment of secondary vegetation and fire-free land preparation by cutting, chopping and mulching improve the following crops ? In: Lieberei R., Voss K., Bianchi H. (Eds.), *Proceedings of the Third Studies on Human Impact on Forests and Floodplains in the Tropics (SHIFT) Workshop*, Manaus, 15-19/03/1998. GKSS Geesthacht, pp. 113-118.
- Lupwayi N.Z., Haque I., 1999. Leucaena hedgerow intercropping and cattle manure application in the Ethiopian highlands - III. Nutrient balances. *Biology and Fertility of Soils* **28** (2), 204-211.
- Mando A., 1998. Soil-dwelling termites and mulches improve nutrient release and crop performance on Sahelian crusted soil. *Arid Soil Research and Rehabilitation* **12** (2), 153-163.
- Mando A., Stroosnijder L., 1999. The biological and physical role of mulch in the rehabilitation of crusted soil in the Sahel. *Soil Use and Management* **15** (2), 123-127.
- Manlay R., 1994. *Jachère et gestion de la fertilité en Afrique de l'Ouest: suivi de quelques indicateurs agro-écologiques dans deux sites du Sénégal*. Master's Thesis, Université d'Aix-Marseille, Marseille, 69 p.

- Manlay R., Cambier C., Ickowicz A., Masse D., 2000a. Modélisation de la dynamique du statut organique d'un terroir ouest-africain par un système multi-agents. In: Floret C., Pontanier R. (Eds.), *La Jachère en Afrique Tropicale - Vol I. Actes du Séminaire International*, Dakar, Senegal, 13-16/04/1999. John Libbey, Paris, pp. 111-119.
- Manlay R.J., Cadet P., Thioulouse J., Chotte J.-L., 2000b. Relationships between abiotic and biotic soil properties during fallow periods in the sudanian zone of Senegal. *Applied Soil Ecology* **14** (2), 89-101.
- Martinez-Yrizar A., 1995. Biomass distribution and primary productivity of tropical dry forests. In: Bullock S.H., Mooney H.A., Medina E. (Eds.), *Seasonally Dry Tropical Forests*. Cambridge University Press, pp. 326-345.
- Masse D., Bodian A., Cadet P., Chotte J.-L., Diatta M., Faye E.H., Floret C., Kaïré M., Manlay R., Pontanier R., Bernhard-Reversat F., Russell-Smith A., Sarr M., 1998. Importance de divers groupes fonctionnels sur le fonctionnement de jachères courtes. In: Floret C. (Ed.) *Projet CEE N° TS3-CT93-0220 (DG12 HSMU). Raccourcissement du Temps de Jachère, Biodiversité et Développement Durable en Afrique Centrale (Cameroun) et en Afrique de l'Ouest (Mali, Sénégal). Rapport final*, Dakar, pp. 163-202.
- Masse D., Dembellé F., Le Floc'h E., Yossi H., 1997. Impact de la gestion des feux de brousse sur la qualité des sols des jachères de courte durée dans la zone soudanienne du Mali. In: Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M. (Eds.), *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems. Proceedings of the Regional Workshop*, Niamey, Niger, 4-8/03/1997. Margraf Verlag, pp. 115-121.
- Mathur S.P., 1982. The role of soil enzymes in the degradation of organic matter in the tropics, subtropics and temperate zones. In: *Non-Symbiotic Nitrogen Fixation and Organic Matter in the Tropics. Transactions of the 12th International Congress of Soil Science*, New Delhi, India, 8-16/02/1982, pp. 125-136.
- Mazoyer M., Roudard L., 1997. *Histoire des Agricultures du Monde. Du Néolithique à la Crise Contemporaine*. Seuil, Paris, 534 p.
- Meertens H.C.C., Fresco L.O., Stoop W.A., 1996. Farming systems dynamics: Impact of increasing population density and the availability of land resources on changes in agricultural systems. The case of Sukumaland, Tanzania. *Agriculture Ecosystems & Environment* **56** (3), 203-215.

- Menaut J.-C., Barbault R., Lavelle P., Lepage M., 1985. African savannas: biological systems of humification and mineralization. In: Tothill J.C., Mott J.J. (Eds.), *Ecology and Management of the World's Savannas*. Australian Acad. Science, Canberra, pp. 14-33.
- Menaut J.-C., César J., 1979. Structure and primary productivity of Lamto savannas, Ivory Coast. *Ecology* **60** (6), 1197-1210.
- Milleville P., 1972. Approche agronomique de la notion de parcelle en milieu traditionnel africain : la parcelle d'arachide en Moyenne-Casamance. *Cahiers ORSTOM, Série Biologie* **17**, 23-37.
- Mohr H., Schopfer P., 1995. *Plant Physiology*. Springer Verlag, Berlin, 629 p.
- Mokwunye U., Hammond L.L., 1992. Myths and science of fertilizer use in the tropics. In: Lal R., Sanchez P.A. (Eds.), *Myths and Science of Soils of the Tropics*. Soil Science Society of America, Madison, pp. 121-134.
- Mordelet P., 1993. *Influence des arbres sur la strate herbacée d'une savane humide (Lamto, Côte d'Ivoire)*. PhD Thesis, Université Paris VI, 150 p.
- Moureaux C., 1967. Influence de la température et de l'humidité sur les activités biologiques de quelques sols ouest-africains. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie* **5** (4), 393-420.
- Murphy P.G., Lugo A.E., 1986. Ecology of tropical dry forest. *Annual Review of Ecology and Systematics* **17**, 67-88.
- Murwira K.H., Swift M.J., Frost P.G.H., 1994. Manure as a key resource in sustainable agriculture. In: Powell J.M., Fernandez-Rivera S., Williams T.O., Renard C. (Eds.), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa. Proceedings of an International Conference*, Addis Ababa, Ethiopia, 22-26/11/1993. ILCA (International Livestock Centre for Africa), pp. 131-148.
- Mwangi W.M., 1997. Low use of fertilizers and low productivity in sub-Saharan Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **47** (2), 135-147.
- Myers R.J.K., Palm C.A., Cuevas E., Gunatilleke I.U.N., Brossard M., 1994. The synchronisation of nutrient mineralisation and plant nutrient demand. In: Woomer P.L., Swift M.J. (Eds.), *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. Wiley-Sayce Publication, pp. 81-116.

- Naseem A., Kelly V., 1999. *Macro trends and determinants of fertilizer use in Sub Saharan Africa*. Rep. No. MSU International Development Working Paper 73. Michigan State University, Michigan.
- Neher D.A., 1999. Soil community composition and ecosystem processes - Comparing agricultural ecosystems with natural ecosystems. *Agroforestry Systems* **45** (1-3), 159-185.
- Ngamine J., Altolna M., 2000. Flux de biomasse et gestion de la fertilité à l'échelle des terroirs. Etude de cas dans trois terroirs agro-pastoraux du sud du Tchad. In: Dugué P. (Ed.) *Fertilité et relations agriculture-élevage en zone de savane*, Montpellier, France, 5-6/05/1998. Centre International de Recherche pour le Développement, pp. 13-25.
- Nye P.H., Greenland D.J., 1960. *The Soil Under Shifting Cultivation.*, Vol. 51. Technical Communications, Farnham Royal, 156 p.
- Odum E.P., 1969. The strategy of ecosystem development. *Science* **164**, 262-270.
- Olasantan F.O., 1999. Food production, conservation of crop plant biodiversity and environmental protection in the twenty-first century: the relevance of tropical cropping systems. *Outlook on Agriculture* **28** (2), 93-102.
- Ong C.K., 1996. New ideas on soil formation, soil fertility. *Agroforestry Today* **8** (3).
- Page A., Miller R., Keeney D. (Eds.), 1989. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, Agronomy, Vol. 9, Madison, Wisconsin, 1159 p.
- Pâte E., 1997. *Analyse spatio-temporelle des peuplements de nématodes phytoparasites dans les systèmes de culture à jachère du Sénégal*. PhD Thesis, Université Claude Bernard, Lyon, 208 p.
- Pavé A., 1994. *Modélisation en Biologie et en Ecologie*. Aléas, Lyon, 559 p.
- Pélissier P., 1966. *Les Paysans du Sénégal. Les Civilisations Agraires du Cayor à la Casamance*. Ministère de l'Education Nationale - Centre National de la Recherche Scientifique, St Yrieix, 939 p.
- Peltier R., 1993. Les jachères à composante ligneuse. Caractérisation, productivité, gestion. In: Floret C., Serpantié G. (Eds.), *La Jachère en Afrique de l'Ouest. Atelier International*, Montpellier, France, 2-5/12/1991. ORSTOM, pp. 67-87.

- Peltier R., Pity B., 1993. De la culture itinérante sur brûlis au jardin agroforestier en passant par les jachères enrichies. *Bois et Forêts des Tropiques* **235**, 49-57.
- Perry D.A., Amaranthus M.P., Borchers J.G., Borchers S.L., Brainerd R.E., 1989. Bootstrapping in ecosystems. *Bioscience* **39** (4), 230-237.
- Peters J.B., Schulte E.E., 1994. Soil test survey of the Gambia - an overview. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **25** (9-10), 1713-1733.
- Pieri C., 1989. Fertilité des Terres de Savanes. Ministère de la Coopération - CIRAD, Paris (English edition: Pieri, C., 1992. *Fertility of soils: A Future for Farming in the West African Savannah*. Springer Series in Physical Environment. Springer-Verlag, Berlin), 444 p.
- Potvin C., Roff D.A., 1993. Distribution-free and robust statistical methods: viable alternatives to parametric statistics ? *Ecology* **74** (6), 1617-1628.
- Poulain J.F., 1977. Crop residues in traditional cropping systems of West africa. Effects on the mineral balance and level of organic matter in soils. Proposals for their better management. In: *Organic Recycling in Africa*. FAO/SIDA Workshop on the Use of Organic Materials as Fertilizers in Africa, Buéa, Cameroon, 5-14/05/1977. FAO, pp. 38-71.
- Powell J.M., 1984. Assessment of dry matter yield from grain yield in the West African Savannah Zone. *Journal of Agricultural Science* **103**, 695-698.
- Powell J.M., 1986. Manure for cropping: a case study from central Nigeria. *Experimental Agriculture* **22**, 15-24.
- Powell J.M., Fernandez-Rivera S., Hiernaux P., Turner M.D., 1996. Nutrient cycling in integrated rangeland/cropland systems of the Sahel. *Agricultural Systems* **52** (2-3), 143-170.
- Powell J.M., Williams T.O., 1994. An overview of mixed farming systems in sub-Saharan Africa. In: Powell J.M., Fernandez-Rivera S., Williams T.O., Renard C. (Eds.), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa. Proceedings of an International Conference*, Addis Ababa, Ethiopia, 22-26/11/1993. ILCA (International Livestock Centre for Africa), pp. 21-36.
- Probert M.E., Okalebo J.R., Jones R.K., 1995. The use of manure on smallholders farms in semi-arid eastern Kenya. *Experimental Agriculture* **31**, 371-381.

- Prudencio C.Y., 1993. Ring management of soils and crops in the West African semi-arid tropics - the case of the Mossi farming system in Burkina Faso. *Agriculture Ecosystems & Environment* **47**, 237-264.
- Quilfen J.P., Milleville P., 1983. Résidus de culture et fumure animale. Un aspect des relations agriculture-élevage dans le Nord de la Haute-Volta. *L'Agronomie Tropicale* **38** (3), 206-212.
- Ramade F., 1981. *Ecologie des Ressources Naturelles*. Collection Ecologie Appliquée et Sciences de l'Environnement. Masson, Paris, 322 p.
- Richard D., Ahopke B., Blanfort V., Pouye B., 1991. Utilisation des zones agricoles et pastorales par les ruminants en zone soudanienne (Moyenne Casamance, Sénégal). In: Gaston A., Kernick M., Le Houérou H.N. (Eds.), *Actes du Quatrième Congrès International des Terres de Parcours*, Montpellier, France, 22-26/04/1991. CIRAD, pp. 754-756.
- Ruthenberg H., 1971. *Farming Systems in the Tropics*. Clarendon Press, Oxford, 313 p.
- Sanchez P.A., 1987. Soil productivity and sustainability in agroforestry systems. In: Steppeler H.A., Nair P.K.R. (Eds.), *Agroforestry : a Decade of Development*. International Council for Research in Agroforestry, Nairobi, pp. 205-223.
- Sanchez P.A., Miller R.H., 1986. Organic matter and soil fertility management in acid soils of the tropics. In: XIIIth Congress of the International Society of Soil Science, Hamburg, 13-20/08/1986. ISSS-AISS-IBG, pp. 609-625.
- Sarr M., Agboba C., Russell-Smith A., 1998. The effect of length of fallow and cultivation on termite abundance and diversity in the Sahelian zone of Senegal: A preliminary note. *Pedobiologia* **42**, 56-62.
- Saxena K.G., Ramakrishnan P.S., 1986. Nitrification during slash-and-burn agriculture (Jhum) in North-Eastern India. *Acta Oecologia* **7** (3), 307-319.
- Schaefer R., 1974. Activité métabolique du sol : fonctions microbiennes et bilans biogéochimiques dans la savane de Lamto. *Bulletin de Liaison des Chercheurs de Lamto* **5**, 167-184.
- Schimel D.S., 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* **1**, 77-91.
- Schleich K., 1986. Le fumier peut-il remplacer la jachère ? Possibilité d'utilisation du fumier : exemple de la savane d'Afrique Occidentale.

- Shackleton C.M., 1998. Annual production of harvestable deadwood in semi-arid savannas, South Africa. *Forest Ecology and Management* **112** (1-2), 139-144.
- Shukla R.P., Ramakrishnan P.S., 1984. Biomass allocation strategies and productivity of tropical trees related to successional status. *Forest Ecology and Management* **9** (4), 315-324.
- Siband P., 1974. Evolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance. *L'Agronomie Tropicale* **29** (12), 1228-1248.
- Singh L., Singh J.S., 1991. Storage and flux of nutrients in a dry tropical forest in India. *Annals of Botany* **68** (3), 275-284.
- Sirois M.C., Margolis H.A., Camire C., 1998. Influence of remnant trees on nutrients and fallow biomass in slash-and-burn agroecosystems in Guinea. *Agroforestry Systems* **40** (3), 227-246.
- SMI, 1993. ATLAS GIS - 3.1 *Manuel de référence. Le système d'information géographique pour Windows*. Strategic Mapping Inc., Santa Clara, 316 p.
- Smil V., 1999. Crop residues: Agriculture's largest harvest. *Bioscience* **49** (4), 299-308.
- Sokona Y., 1995. Greenhouse gas emission inventory for Senegal, 1991. *Environmental Monitoring & Assessment* **38** (2-3), 291-299.
- Stoorvogel J.J., Smaling E.M.A., 1990. *Assessment of soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa: 1983-2000. Volume III: literature review and description of land use systems*. Rep. No. 28. The Winand Staring Centre, Wageningen.
- Stoorvogel J.J., Smaling E.M.A., Janssen B.H., 1993a. Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. I. Supra-national scale. *Fertilizer Research* **35** (227-235).
- Stoorvogel J.J., Smaling E.M.A., Janssen B.H., 1993b. Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. II. District scale. *Fertilizer Research* **35**, 237-250.

- Straskraba M., Jorgensen S.E., Patten B.C., 1999. Ecosystems emerging: 2. Dissipation. *Ecological Modelling* **117** (1), 3-39.
- Stromgaard P., 1985. Biomass, growth, and burning of woodland in a shifting cultivation area of South Central Africa. *Forest Ecology and Management* **12**, 163-178.
- Stromgaard P., 1986. Early secondary succession on abandoned shifting cultivator's plots in the Miombo of South Central Africa. *Biotropica* **18** (2), 97-106.
- Swift M.J., Anderson J.M., 1994. Biodiversity and ecosystem function in agricultural systems. In: Schulze E.D., Mooney H.A. (Eds.), *Biodiversity and Ecosystem Function*. Springer Verlag, Berlin, pp. 15-41.
- Swift M.J., Woomer P., 1993. Organic matter and the sustainability of agricultural systems : definition and measurement. In: Mulongoy K., Merckx R. (Eds.), *Soil Organic Matter Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture. Proceedings of an International Symposium, Leuven, Belgium, 4-6/11/1991*. John Wiley & Sons, pp. 3-18.
- Syers J.K., 1997. Managing soils for long-term productivity. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B - *Biological Sciences* **352** (1356), 1011-1021.
- Syers J.K., Craswell E.T., 1995. Role of soil organic matter in sustainable agricultural systems. In: Lefroy R.D.B., Blair G.J., Craswell E.T. (Eds.), *Soil Organic Matter Management for Sustainable Agriculture : a Workshop Held in Ubon, Thailand, 24-26/08/1994*, pp. 7-14.
- The New Encyclopaedia Britannica, 1990. Chemical Elements. In: *The New Encyclopaedia Britannica*. Vol. 15. Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, p. 979.
- Thioulouse J., Chessel D., Dolédec S., Olivier J.M., 1997. ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. *Statistics and Computing* **7** (1), 75-83.
- Tiessen H., Cuevas E., Chacon P., 1994. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* **371**, 783-785.
- Tiessen H., Feller C., Sampaio E.V.S.B., Garin P., 1998. Carbon sequestration and turnover in semiarid savannas and dry forest. *Climatic Change* **40** (1), 105-117.

- Tiessen H., Salcedo I.H., Sampaio E.V.S.B., 1992. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid North-Eastern Brazil. *Agriculture Ecosystems & Environment* **38**, 139-151.
- Toky O.P., Ramakrishnan P.S., 1983a. Secondary succession following slash-and-burn agriculture in North-Eastern India. I. Biomass, litterfall and productivity. *Journal of Ecology* **71**, 735-745.
- Toky O.P., Ramakrishnan P.S., 1983b. Secondary succession following slash-and-burn agriculture in North-Eastern India. II. Nutrient cycling. *Journal of Ecology* **71**, 747-757.
- Tomlinson H., Traore A., Teklehaimanot Z., 1998. An investigation of the root distribution of *Parkia biglobosa* in Burkina Faso, West Africa, using a logarithmic spiral trench. *Forest Ecology and Management* **107** (1-3), 173-182.
- Toussaint O., Schneider E.D., 1998. The thermodynamics and evolution of complexity in biological systems. *Comparative Biochemistry and Physiology A* **120** (1), 3-11.
- UNDP, 1999. *Human Development Report*. United Nations Development Programme, New York, 262 p.
- van der Pol F., 1992. *Soil Mining. An Unseen Contributor to Farm Income in Southern Mali*. Bulletin of the Royal Tropical Institute, Vol. 325. KIT Press, 47 p.
- van Wambeke A., 1991. *Soils of the Tropics. Properties and Appraisal*. McGraw-Hill, Inc., New-York, 343 p.
- Vielhauer K., Kanashiro M., Sa T.D.A., Denich M., 1998. Technology development of slash-and-mulch and of fallow enrichment in shifting cultivation systems of the Eastern Amazon. In: Lieberei R., Voss K., Bianchi H. (Eds.), *Proceedings of the Third Studies on Human Impact on Forests and Floodplains in the Tropics (SHIFT) Workshop*, Manaus, 15-19/03/1998. GKSS Geesthacht, pp. 49-60.
- Vierich H.I.D., Stoop W.A., 1990. Changes in West African Savanna agriculture in response to growing population and continuing low rainfall. *Agriculture Ecosystems & Environment* **31**, 115-132.
- Walker B.H., 1985. Structure and function of savannas : an overview. In: Tothill J.C., Mott J.J. (Eds.), *Ecology and Management of the World's Savannas*. Australian Acad. Science, Canberra, pp. 83-91.

- Watt B.K., Merrill A.L., 1963. *Composition of foods*. United States Department of Agriculture, Washington, 190 p.
- Webb N., 1995. *Installation Guide to the Root Washer Basic System*. Delta-T Devices Ltd, Cambridge, 14 p.
- Wezel A., Bocker R., 1999. Mulching with branches of an indigenous shrub (*Guiera senegalensis*) and yield of millet in semi-arid Niger. *Soil & Tillage Research* **50** (3-4), 341-344.
- Wick B., Kuhne R.F., Vlek P.L.G., 1998. Soil microbiological parameters as indicators of soil quality under improved fallow management systems in south-western Nigeria. *Plant and Soil* **202** (1), 97-107.
- Williams T.O., Powell J.M., Fernandez-Rivera S., 1994. Manure utilisation, drought cycles and herd dynamics in the Sahel : implications for cropland productivity. In: Powell J.M., Fernandez-Rivera S., Williams T.O., Renard C. (Eds.), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa. Proceedings of an International Conference*, Addis Ababa, Ethiopia, 22-26/11/1993. ILCA (International Livestock Centre for Africa), pp. 393-409.
- Williams T.O., Powell J.S., Fernandez-Rivera S., 1995. Soil fertility maintenance and food crop production in semi-arid West Africa : is reliance on manure a sustainable strategy ? *Outlook on Agriculture* **24** (1), 43-47.
- Winter M., 1993-2000. WebElements. *The Periodic Table on the WWW*. [<http://www.webelements.com/>].
- Woomer P.L., 1993. The impact of cultivation on carbon fluxes in woody savannas of southern Africa. *Water Air and Soil Pollution* **70**, 403-412.
- Woomer P.L., Palm C.A., Qureshi J.N., Kotto-Same J., 1998. Carbon sequestration and organic resource management in African smallholder agriculture. In: Lal R., Kimble J.M., Follett R.F., Stewart B.A. (Eds.), *Management of Carbon Sequestration in Soil*. CRC Press Inc, Boca Raton, pp. 153-173.
- Zarin D.J., Duchesne A.L., Hiraoka M., 1998. Shifting cultivation on the tidal floodplains of Amazonia: impacts on soil nutrient status. *Agroforestry Systems* **41** (3), 307-311.
- Zech W., Senesi N., Guggenberger G., Kaiser K., Lehmann J., Miano T.M., Miltner A., Schroth G., 1997. Factors controlling humification and

mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* **79** (1-4), 117-161.

ABREVIATIONS

ABT	Alimentation du Bétail Tropical (Programme pour «l'Amélioration des Systèmes d'Alimentation du Bétail Tropical», ISRA/ CIRAD-EMVT)	ENGREF	Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts
		Equ	équipement
ACP	analyse en composantes principales	ETP	évapotranspiration
		GES	gaz à effet de serre
Adu	adulte	IC	intensité de culture
AR	arachide	INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
ASS	Afrique subsaharienne	IRD	Institut de Recherche pour le Développement
BA	biomasse aérienne	ISRA	Institut Sénégalais de la Recherche Agricole
BDPB	biomasse disponible pour le brûlis	JAA	jachère âgée
BS	biomasse souterraine	JA	jachère
Cas	case	JAJ	jachère jeune
CEC	capacité d'échange cationique	MA	maïs
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement	MI	mil
		MLG	modèle linéaire généralisé
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique	MO	matière organique
		MOFE	matière organique fécale excrétée
COS	carbone organique du sol	MOS	matière organique du sol
CP	composante principale	MOVI	matière organique volontairement ingérée
EMVT	Département Elevage et Médecine Vétérinaire		

MS	matière sèche	Tot	total
MSVI	matière sèche volontairement ingérée	UBT	Unité de bétail tropical
NF	non fractionné	UGE	unité de gestion de l'espace
Ord	ordures ménagères	UN	unité à nourrir
Parc	parcage	UT	unité de travail
PM	poids métabolique	Viv	culture vivrière
Pm	permanent		
P _{OD}	phosphore assimilable (méthode Olsen modifiée par Dabin, 1967)		
Pt	phosphore total		
PV	poids vif		
Rent	culture de rente		
RI	riz		
RS	coefficient de corrélation de Spearman		
Sai	emploi saisonnier		
SAS	Statistical Analysis System		
SP	surface possédée		
SP	surface possédée par le village		
SLS	strate ligneuse supérieure		
SOA	savanes ouest-africaines		
SODEFITEX : Société des Fibres Textiles			

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Coefficients de régression utilisés pour évaluer la biomasse ligneuse de quatre principales espèces ligneuses trouvées à Sare Yorobana.	43
Tableau 1.2	Teneurs en carbone, azote et phosphore des : a. composantes végétales de quatre principales espèces ligneuses. Les teneurs pour les autres espèces ont été estimées par les moyennes de ces valeurs. b. composantes végétales aériennes et souterraines des cultures et des jachères.....	46
Tableau 1.3	Stockage de la matière sèche dans les composantes végétales d'une succession culture-jachère.	47
Tableau 1.4	Estimation des paramètres de la régression de $S = \{\text{stock de matière sèche, carbone, azote ou phosphore}\}$ sur $t = \text{durée de jachère, selon un modèle pseudo-logistique.}$	49
Tableau 1.5	Bilan simplifié et accroissement annuel de matière sèche, carbone, azote et phosphore dans la biomasse végétale aérienne et souterraine, pendant une succession culture-jachère.	51
Tableau 1.6	Analyse de variance réalisée sur les stocks de matière sèche, carbone, azote et phosphore dans la biomasse végétale des parcelles en culture et en jachère (jachères jeunes : âgées de moins de 10 ans ; jachères âgées : 10 ans et plus).	52
Tableau 2.1	Teneurs en carbone, azote, et phosphore assimilable du sol, rapport C/N et densité apparente modifiée de la fraction [0-2000] μm dans les parcelles d'arachide et de jachère.	70
Tableau 2.2	Effet de la gestion des terres (jachère) et de la texture (teneur en argile+limon fin) sur les propriétés du sol.....	75 - 76
Tableau 2.3	Fractionnement de la MOS dans les parcelles d'arachide et de jachère.	77
Tableau 2.4	Effet de la gestion des terres (jachère) et de la texture (teneur en argile+limons fins) sur la qualité de la MOS estimé par a. le rapport C/N du sol non fractionné b. la concentration et la teneur en carbone, et le rapport C/N dans les fractions fines et grossières du sol.	78

Tableau 2.5	Effet de la gestion des terres (jachère) et de la texture (teneur en argile+limon fin) sur les stocks de carbone (total et par fraction), d'azote et de phosphore assimilable du sol.	80
Tableau 3.1	Biomasse des champs d'arachide, de mil, de maïs et de riz : a. stock de matière sèche. b. teneurs en carbone, azote et phosphore total	103
Tableau 3.2	Teneurs en carbone, azote et phosphore assimilable du sol, rapports C/N et densités apparentes modifiées de la fraction [0-2000] µm des champs d'arachide, de mil, de maïs et de riz.	105
Tableau 3.3	Effet de l'intensité de culture et de la texture (argile+limon fin) sur les propriétés du sol.	108 - 109
Tableau 3.4	Qualité de la MOS évaluée par le fractionnement de la MOS dans les horizon du sol des champs de mil, maïs et riz.	110
Tableau 3.5	Effet de l'intensité de culture et de la texture (argile +limon fin) sur la qualité de la MOS évaluée par la concentration et la teneur en carbone et le rapport C/N dans le sol non fractionné et dans les fractions fines et grossières du sol.	111
Tableau 3.6	Effet de l'intensité de culture et de la texture (argile+limon fin) sur le stock de carbone, d'azote et de phosphore assimilable du sol (calculé à masse de sol équivalente).	112
Tableau 3.7	Effet de la gestion des apports organiques sur les propriétés physiques et le statut organique du sol.....	113
Tableau 4.1	Estimation des stocks de carbone, d'azote et de phosphore assimilable (horizon 0-20 cm) pour le calcul des bilans à l'échelle du village, en fonction de l'utilisation de l'espace (dans le cas des jachères et des rizières), de l'auréole de gestion, de la proximité d'une concession et de l'intensité de culture.	138
Tableau 4.2	Répartition des surfaces selon l'utilisation de l'espace en fonction de l'auréole de gestion et de la géomorphologie dans le terroir de Sare Yorobana.	140
Tableau 4.3	Statistiques élémentaires caractérisant 16 exploitations de Sare Yorobana.	144

Tableau 4.4	Régressions entre rendements des composantes de la biomasse végétale. Modèle : $\text{RendementComposante} = a \cdot \text{RendementRécolte} + b$	146
Tableau 4.5	Stocks moyens de MS, de carbone, d'azote et de phosphore dans quelques agroécosystèmes de Sare Yorobana en fonction de l'auréole de gestion et de l'utilisation de la terre	148
Tableau 5.1	Partition de la biomasse végétale récoltée dans les cultures de céréales à Sare Yorobana. Toutes les données sont en pourcentage.	175
Tableau 5.2	Bilans de matière sèche, de carbone, d'azote et de phosphore des unités de gestion de l'espace exploitées par les paysans de Sare Yorobana dans et autour du terroir villageois, liés à la récolte des cultures, aux transferts dus au bétail, à la collecte de bois et de paille et au recyclage des résidus.	176 - 177
Tableau 5.3	Ingestion et excrétion de matière sèche, de carbone, d'azote et de phosphore par le cheptel bovin mesurées pendant la saison sèche 1997-1998.	181
Tableau 5.4	Comportement du bétail de trois concessions durant la divagation de jour en relation avec la tenure foncière, la taille du troupeau et la surface gérée par l'éleveur (saison sèche 1995-1996).	181
Tableau 5.5	Apports de matière sèche dans les champs par fumure animale pendant le parcage nocturne, en fonction des espèces végétales prévues pour la culture suivante.	184
Tableau 5.6	Participation des récoltes des cultures, du bétail et de la collecte de bois et de chaume aux transferts anthropogéniques de carbone, d'azote et de phosphore dus aux activités agricoles.	185
Tableau 6.1	Données de chaleur de combustion (MJ kgMS ⁻¹) des grains et de la biomasse végétative.	200

TABLE DES FIGURES

Figure 0.1	Localisation du site de Sare Yorobana au Sénégal, Afrique de l'Ouest.	29
Figure 1.1	Organisation simplifiée en auréoles d'un village agropastoral de la savane ouest-africaine.	37
Figure 1.2	Diagramme ombrothermique et potentiel d'évapotranspiration à la station de Kolda, 1978-1997.	40
Figure 1.3	Distribution de la durée de jachère mesurée dans les 28 parcelles de jachère échantillonnées.	42
Figure 1.4	Stock de matière sèche, carbone, azote et phosphore dans la biomasse végétale au cours d'une succession culture-jachère, et ajustement au modèle pseudo-logistique.....	50 - 51
Figure 1.5	Devenir de la matière sèche, du carbone, de l'azote et du phosphore dans la biomasse aérienne ligneuse après la défriche d'une jachère jeune et d'une jachère âgée	54
Figure 2.1	Analyse en composantes principales des propriétés du sol d'une chronoséquence composée de six parcelles de culture et 11 de jachère.....	74
Figure 2.2	Evolution des stocks de carbone, azote et phosphore assimilable dans les horizons 0-10 et 0-40 cm pendant la succession culture-jachère.	79
Figure 2.3	Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore dans le système plante-sol à trois grandes étapes de la succession culture-jachère.	81
Figure 2.4	Dynamique de décomposition racinaire de <i>Combretum glutinosum</i> Perr. après la défriche d'une jachère âgée de 15 ans mesurée par une expérience des sachets de décomposition.	82
Figure 2.5	Stocks estimés de matière sèche, de carbone, d'azote et de phosphore restant du compartiment racinaire en décomposition après la défriche d'une jachère jeune et âgée (souches enlevées).....	83

Figure 3.1	Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore dans le système sol-plante dans les principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique à Sare Yorobana, Sud Sénégal.....	104
Figure 3.2	Analyse en composantes principales des propriétés du sol de 12 parcelles cultivées. Cercles de corrélation des variables et projection des individus - parcelles sur le plan CP 1x CP2 : a,b : horizon 0-10 cm ; c,d : horizon 10-20 cm.....	107
Figure 3.3	Entrées de carbone, d'azote et de phosphore dans les champs de case selon trois modes de gestion organique de la fertilité.	114
Figure 3.4	Diagnostic de la qualité du sol de 23 parcelles de culture et de jachère comme prévu par le critère de Feller (1995b) basé sur la teneur en carbone et la teneur en éléments fins.	121
Figure 4.1	Précipitations annuelles moyennes pendant les 60 dernières années	134
Figure 4.2	Organisation spatiale et utilisation de l'espace dans le terroir de Sare Yorobana.	142
Figure 4.3	Distribution spatiale de l'utilisation de l'espace illustrée par la distance des parcelles cultivées à la concession.....	143
Figure 4.4	Complémentarité spatiale entre intensité de culture et fumure animale dans le système agropastoral du terroir de Sare Yorobana.	143
Figure 4.5	Analyse en composantes principales de la structure de 16 des 18 concessions du village de Sare Yorobana : cercles de corrélation des variables et projection des individus - concessions (1ère et 2ème CP).	145
Figure 4.6	Stocks de carbone dans la biomasse végétale et dans le sol du terroir villageois de Sare Yorobana en fonction de la géomorphologie, de l'auréole et de l'utilisation de l'espace (cultivée, non cultivée).	149 - 151
Figure 4.7	Taux d'autosuffisance en fumier et disponibilité en fourrage dans les exploitations de Sare Yorobana selon un bilan agropastoral simplifié.	152

Figure 4.8	Analyse de sensibilité sur le calcul du stockage du carbone en fonction du seuil de l'intensité de culture déterminant la biomasse des adventices ligneuses dans les champs cultivés : impact d'une variation de plus ou moins 10 % de ce seuil sur les estimations des stocks de carbone.	153
Figure 4.9	Evolution de l'utilisation de l'espace dans le village de Sare Yorobana pour la période 1997-2047 selon un modèle statique.	154
Figure 4.10	Evolution du stock de carbone dans le système plante-sol du terroir villageois de Sare Yorobana pour la période 1997-2047 prédite par modélisation.	155
Figure 5.1	Flux anthropogéniques de carbone établis de novembre 1996 à novembre 1997 à Sare Yorobana.	178
Figure 5.2	Flux anthropogéniques d'azote établis de novembre 1996 à novembre 1997 à Sare Yorobana.	179
Figure 5.3	Flux anthropogéniques de phosphore établis de novembre 1996 à novembre 1997 à Sare Yorobana.	180
Figure 5.4	Entrées et sorties de matière organique initiées par l'ingestion et l'excrétion de trois troupeaux pendant la saison sèche 1995-1996.	182
Figure 5.5	Intensité de fumure animale due au parcage nocturne dans le village de Sare Yorobana pendant la saison sèche 1996-1997.	183
Figure 5.6	Rendement du mil en fonction des pratiques de fumure dans les auréoles de brousse et de case.	184
Figure 5.7	Evolution (a) des flux sortants anthropogéniques de carbone (b) du rapport des flux sortants de C sur le stock de C de la biomasse végétale aérienne du terroir villageois de Sare Yorobana pour la période 1997-2047 selon les prévisions du modèle.	186
Figure 6.1	Densités de population et d'animaux à Sare Yorobana comparées à d'autres situations au Sénégal et au Nord de la Côte d'Ivoire.	199

ANNEXES

Annexe 2 Caractéristiques des parcelles du village de Sare Yorobana (rizière non comprise) en 1997.

Codage parcelle	Statut foncier		Caractéristiques physiques			Utilisation de l'espace		Système de culture			
	Propriétaire	Utilisateur	Géomorph.	Surface (ha)	Dist. à la concession (m)	Auréole	Culture	Intensité de culture (an ⁻¹)	Age de la jachère (année)	Intensité de fumure (tMS ha ⁻¹)	Rendement (tMS ha ⁻¹)
1 a	Aucun	Aucun	Glacis	0,56			Concession	1,00			
2 a	Aucun	Aucun	Glacis	0,14			Concession	1,00			
3 a	Aucun	Aucun	Glacis	0,51			Concession	1,00			
3 b	Aucun	Aucun	Glacis	0,47			Concession	1,00			
4 a	Aucun	Aucun	Glacis	0,16			Concession	1,00			
5 a	Aucun	Aucun	Glacis	0,17			Concession	1,00			
6 a	Aucun	Aucun	Glacis	0,13			Concession	1,00			
7 a	Isa	Isa	Glacis	0,33	64	Case	Milmaïs	1,00			2,50
8 a	Diou	Diou	Glacis	0,05	89	Case	Sorgho	1,00			1,50
10 a	Isa	Isa	Glacis	0,03	62	Case	Milmaïs	1,00			0,62
11 a	Awa	Awa	Glacis	0,11	184	Case	Mil	1,00			0,83
11 b	Awa	Awa	Glacis	0,34	190	Case	Milmaïs	1,00			0,83
12 a	Yaou	Yaou	Glacis	0,22	56	Case	Mais	1,00			0,75
12 b	Yaou	Yaou	Glacis	0,06	69	Case	Sorgho	1,00			1,50
13 a	Soul	Soul	Glacis	0,12	49	Case	Sorgho	1,00			1,50
14 a	SaWA	SaWA	Glacis	0,13	65	Case	Sorgho	1,00			1,50
15 a	Amad	Aucun	Glacis	0,03	35	Case	Jachère	0,91	2		
16 a	SaDI	SaDI	Glacis	0,04	42	Case	Sorgho	1,00			1,50
17 a	SaDI	SaDI	Bas glacis	0,16	137	Case	Sorgho	1,00		8,55	6,69
17 b	SaDI	SaDI	Bas glacis	0,22	112	Case	Mil	1,00		8,55	6,69
17 c	SaDI	SaDI	Glacis	0,26	72	Case	Milmaïs	1,00		8,55	6,69
18 a	Amad	Amad	Bas glacis	0,42	140	Case	Mil	1,00		2,75	2,14
18 b	Amad	Amad	Glacis	0,35	97	Case	Milmaïs	1,00		10,26	7,99
18 c	Amad	Amad	Glacis	0,09	104	Case	Sorgho	1,00		1,33	1,07
18 d	Amad	Aucun	Glacis	0,01	56	Case	Jachère	1,00	1		0,50
19 a	SaDI	SaDI	Bas glacis	1,13	194	Brousse	Mil	0,64		1,08	0,83
20 a	Doud	Doud	Bas glacis	0,84	414	Brousse	Mil	1,00		0,44	0,34
20 b	Doud	Aucun	Bas glacis	1,74	447	Brousse	Jachère	1,00	1		0,80
20 c	Doud	Aucun	Bas glacis	0,32	488	Brousse	Jachère	1,00	1		
22 a	Mama	Mama	Bas glacis	1,39	695	Brousse	Mil	1,00			1,98
22 b	Mama	Aucun	Glacis	1,54	732	Brousse	Jachère	1,00	1		
22 c	Mama	Seko	Glacis	0,38	698	Brousse	Mil	0,82			0,93
22 d	Mama	Mama	Bas glacis	0,40	635	Brousse	Sorgho	1,00			0,50
22 e	Mama	Sali	Bas glacis	1,09	602	Brousse	Mil	1,00		0,51	0,39
23 a	Sali	Sali	Glacis	1,23	355	Case	Mil	1,00		4,46	3,46
24 a	Amad	Amad	Glacis	0,59	277	Brousse	Coton	1,00			1,78
24 b	Amad	Aucun	Glacis	0,10	314	Brousse	Jachère	1,00	1		
24 c	Amad	Aucun	Glacis	0,22	211	Brousse	Jachère	0,82	2		
24 d	Amad	Amad	Glacis	0,76	196	Brousse	Mil	1,00		2,55	1,93
25 a	Aucun	Aucun	Plateau	0,48		Brousse	Jachère	1,00	10		0,51
25 b	Aucun	Aucun	Plateau	2,74		Brousse	Jachère	1,00	10		
26 a	SaDI	SaDI	Glacis	0,28	199	Case	Coton	1,00			2,00
26 b	SaDI	SaDI	Glacis	0,08	187	Case	Sorgho	1,00			0,54
27 a	Seko	Seko	Glacis	0,73	231	Case	Milmaïs	1,00		7,02	5,42
28 a	Sali	Sali	Glacis	0,22	309	Case	Milmaïs	1,00		6,29	4,84
28 b	Sali	Sali	Glacis	0,49	268	Case	Milmaïs	1,00		6,29	4,84
28 c	Sali	Keba	Glacis	0,16	279	Case	Mil	1,00			1,02
29 a	Yaou	Aucun	Glacis	1,26	333	Brousse	Jachère	0,55	1		
29 b	Yaou	Awa	Glacis	0,07	303	Brousse	Fonio (<i>Digitaria ssp.</i>)	0,55			
30 a	SaBA	Keba	Glacis	0,27	567	Brousse	Mil	0,64			0,24
30 b	SaBA	Aucun	Glacis	0,04	611	Brousse	Jachère	0,64	1		
30 c	SaBA	Aucun	Glacis	0,19	564	Brousse	Jachère	0,64	1		
30 d	SaBA	SaBA	Glacis	0,05	604	Brousse	Mil	0,64			0,24
32 a	Mama	Aucun	Glacis	0,20	466	Brousse	Jachère	0,91	1		
32 b	Mama	Outer	Glacis	0,95	560	Brousse	Mil	0,91			0,64
32 c	Mama	Aucun	Glacis	0,68	659	Brousse	Jachère	0,55	1		
33 a	Seko	Seko	Glacis	1,17	427	Brousse	Mil	1,00		1,81	1,38
34 a	SaBA	Keba	Glacis	0,92	734	Brousse	Sorgho	0,55			0,35
35 a	Yaou	Yaou	Glacis	0,83	553	Brousse	Arachide	1,00			0,50
35 b	Yaou	Yaou	Plateau	1,65	392	Brousse	Mil	1,00			0,92
35 c	Yaou	Outer	Glacis	0,64	620	Brousse	Mil	1,00			1,48
35 d	Yaou	Yaou	Plateau	0,79	474	Brousse	Arachide	1,00			0,64
35 e	Yaou	Aucun	Glacis	0,09	514	Brousse	Jachère	1,00	1		0,75
36 a	Amad	Isa	Glacis	0,33	636	Brousse	Coton	0,91			
36 b	Amad	Outer	Glacis	0,71	692	Brousse	Mil	0,91			1,13
36 c	Amad	Amad	Glacis	0,78	707	Brousse	Arachide	0,91			0,64
36 d	Amad	Aucun	Glacis	0,16	756	Brousse	Jachère	0,82	2		0,92
36 e	Amad	Aucun	Glacis	0,05	695	Brousse	Jachère	0,91	1		
37 a	SaDI	SaDI	Plateau	1,63	602	Brousse	Arachide	0,55			1,57
38 a	SaDI	Doud	Plateau	0,38	541	Brousse	Arachide	0,91			1,41
38 b	SaDI	SaDI	Plateau	0,49	511	Brousse	Arachide	0,91			1,67
38 c	SaDI	SaDI	Plateau	0,23	565	Brousse	Arachide	0,91		1,12	0,81
39 a	Seko	Seko	Plateau	1,40	691	Brousse	Arachide	0,82			1,49
39 b	Seko	Seko	Plateau	0,88	601	Brousse	Coton	0,55		0,35	0,25
39 c	Seko	Aucun	Plateau	0,47	621	Brousse	Jachère	0,45	2		1,81
39 d	Seko	Aucun	Plateau	0,15	664	Brousse	Jachère	0,55	1		
39 f	Seko	Awa	Plateau	0,12	543	Brousse	Arachide	0,45			2,90
40 a	Sali	Sali	Plateau	1,04	758	Brousse	Arachide	1,00			1,11
40 b	Sali	Sali	Plateau	0,10	896	Brousse	Mil	1,00			0,85
40 c	Sali	Sali	Glacis	1,14	779	Brousse	Arachide	1,00			1,06
40 d	Sali	Aucun	Plateau	0,08	764	Brousse	Jachère	1,00	1		
40 e	Sali	Sali	Plateau	1,23	817	Brousse	Arachide	1,00			1,33
40 f	Sali	Sali	Plateau	0,58	863	Brousse	Arachide	1,00			1,14
41 a	SaDI	Sali	Plateau	0,70	868	Brousse	Coton	0,91			1,66
41 b	SaDI	SaDI	Plateau	0,49	925	Brousse	Mil	0,91		0,16	0,12

Annexe 2 (suite)

Codage parcelle	Statut foncier		Caractéristiques physiques			Utilisation de l'espace		Système de culture			
	Propriétaire	Utilisateur	Géomorph.	Surface (ha)	Dist. à la concession (m)	Auréole	Culture	Intensité de culture (an ⁻¹)	Age de la jachère (année)	Intensité de la fumure (tMS ha ⁻¹)	Rendement (tMS ha ⁻¹)
41 c	SaDI	Aucun	Plateau	0,39	940	Brousse	Jachère	0,91	1		
42 a	SaDI	Aucun	Plateau	0,35	817	Brousse	Jachère	1,00	1		
42 b	SaDI	Keba	Plateau	0,47	878	Brousse	Mil	1,00			0,22
43 c	Sali	Sali	Plateau	1,04	967	Brousse	Mil	1,00			1,03
43 d	Sali	Aucun	Plateau	0,20	1005	Brousse	Jachère	0,18	1		
46 a	Mamo	Mamo	Plateau	2,46	774	Brousse	Arachide	1,00			1,70
46 b	Mamo	Aucun	Plateau	0,80	771	Brousse	Jachère	0,36	2		
46 c	Mamo	Mamo	Plateau	0,37	897	Brousse	Arachide	0,36			1,70
46 d	Mamo	Aucun	Plateau	0,02	595	Brousse	Jachère	0,36	2		
46 e	Mamo	Mamo	Plateau	0,62	752	Brousse	Maïs	0,36			0,75
46 f	Mamo	Mamo	Plateau	0,75	678	Brousse	Coton	0,36			2,01
46 g	Mamo	Mamo	Plateau	1,31	926	Brousse	Arachide	0,36			0,96
46 h	Mamo	Mamo	Plateau	0,58	858	Brousse	Arachide	0,36			0,36
46 i	Mamo	Mamo	Plateau	0,37	788	Brousse	Arachide	0,36			0,79
47 a	Diou	Diou	Plateau	1,71	1021	Brousse	Arachide	0,45			1,03
47 b	Diou	Aucun	Plateau	0,29	1113	Brousse	Jachère	0,45	3		
48 a	Diou	Diou	Plateau	1,37	830	Brousse	Mil	0,64		1,73	1,30
48 b	Diou	Diou	Plateau	0,58	947	Brousse	Coton	0,64		1,73	1,30
48 c	Diou	Diou	Plateau	0,22	907	Brousse	Sorgho	0,64		1,73	1,30
48 d	Diou	Aucun	Plateau	1,29	1021	Brousse	Jachère	0,64	1		0,75
49 a	Diou	Diou	Plateau	0,69	913	Brousse	Coton	0,73		1,73	1,30
49 b	Diou	Aucun	Plateau	1,50	1010	Brousse	Jachère	0,73	1		0,83
50 a	Mama	Aucun	Plateau	1,53	1201	Brousse	Jachère	0,09	3		
50 b	Mama	Aucun	Plateau	1,47	1129	Brousse	Jachère	0,18	1		
53 a	Mamo	Mamo	Plateau	2,69	809	Brousse	Mil	1,00		4,25	3,23
53 b	Mamo	Mamo	Plateau	0,24	954	Brousse	Sorgho	1,00		4,25	3,23
53 c	Mamo	Aucun	Plateau	3,25	858	Brousse	Jachère	1,00	1		1,63
53 d	Mamo	Mamo	Plateau	0,48	948	Brousse	Sorgho	1,00		4,25	3,23
54 a	Mama	Aucun	Plateau	0,49	593	Brousse	Jachère	0,55	1		1,00
54 b	Mama	Mama	Plateau	0,11	580	Brousse	Mil	0,82			1,72
55 a	Said	Isa	Plateau	0,21	618	Brousse	Sorgho	0,55			0,50
55 b	Said	Isa	Plateau	0,31	638	Brousse	Mil	0,55			0,27
55 c	Said	Aucun	Plateau	0,80	676	Brousse	Jachère	0,55	1		
56 a	Mama	Mama	Plateau	1,34	543	Brousse	Arachide	0,82			2,05
56 b	Mama	Mama	Plateau	1,06	648	Brousse	Arachide	0,82			1,21
56 c	Mama	Aucun	Plateau	0,12	637	Brousse	Jachère	0,73	1		
57 a	Diou	Diou	Plateau	1,16	651	Brousse	Arachide	1,00			0,90
57 b	Diou	Diou	Plateau	1,21	590	Brousse	Arachide	1,00			2,07
57 c	Diou	Keba	Plateau	0,12	450	Brousse	Mil	1,00			0,43
57 d	Diou	Diou	Plateau	0,19	506	Brousse	Sorgho	1,00			1,00
57 f	Diou	Keba	Plateau	0,20	437	Brousse	Mil	1,00			0,43
58 a	Tidi	Tidi	Plateau	0,61	317	Brousse	Coton	1,00			0,24
58 b	Tidi	Aucun	Plateau	0,63	369	Brousse	Jachère	1,00	1		
58 c	Tidi	Tidi	Plateau	0,94	312	Brousse	Mil	1,00			0,24
58 d	Tidi	Doud	Plateau	0,30	393	Brousse	Arachide	1,00			3,09
59 a	Mama	Isa	Plateau	0,33	654	Brousse	Coton	0,27			0,95
60 a	Yaou	Yaou	Glacis	0,60	285	Case	Coton	0,91			0,54
60 b	Yaou	Tidi	Glacis	0,66	247	Case	Coton	0,91			0,76
70 a	Awa	Awa	Glacis	0,26	310	Case	Arachide	1,00			2,00
71 a	Yaou	Tidi	Glacis	0,29	220	Case	Coton	1,00			0,76
72 a	Soul	Soul	Glacis	0,26	308	Case	MilxMaïs	1,00		2,86	2,18
72 b	Soul	Soul	Glacis	1,52	357	Case	Mil	1,00		2,86	2,18
73 a	Fode	Fode	Glacis	1,40	400	Case	Mil	1,00			0,96
73 b	Fode	Fode	Glacis	0,23	353	Case	MilxMaïs	1,00			0,96
74 a	Awa	Awa	Glacis	0,24	539	Brousse	Mil	1,00			0,25
75 a	SaWA	SaWA	Plateau	0,81	533	Brousse	Coton	0,55		0,61	0,44
75 b	SaWA	SaWA	Plateau	0,05	577	Brousse	Sorgho	0,55			0,96
76 a	Tidi	Aucun	Plateau	0,69	617	Brousse	Jachère	0,27	1		
77 a	Mama	Aucun	Plateau	0,34	619	Brousse	Jachère	0,36	8		
78 a	Soul	Aucun	Plateau	0,75	535	Brousse	Jachère	0,82	2	1,01	0,74
78 b	Soul	Soul	Glacis	0,59	436	Brousse	Mil	1,00		12,53	9,85
79 a	SaWA	SaWA	Glacis	1,99	288	Case	Mil	1,00		3,33	2,60
80 a	Tidi	Tidi	Glacis	0,49	49	Case	MilxMaïs	1,00		1,26	0,98
80 b	Tidi	Tidi	Glacis	0,43	78	Case	MilxMaïs	1,00		1,26	0,98
80 c	Tidi	Tidi	Glacis	0,15	109	Case	Mil	1,00		1,26	0,98
80 d	Tidi	Tidi	Glacis	0,13	57	Case	Maïs	1,00		1,26	0,98
80 e	Tidi	Tidi	Glacis	0,29	100	Case	Mil	1,00		1,26	0,98
80 f	Tidi	Tidi	Glacis	0,15	103	Case	Mil	1,00		1,26	0,98
81 a	Said	Said	Glacis	0,26	203	Case	Maïs	1,00			0,44
81 b	Said	Said	Glacis	0,29	219	Case	MilxMaïs	1,00			0,75
81 c	Said	Said	Glacis	0,05	236	Case	Mil	1,00			0,44
82 a	SaBA	Tidi	Glacis	0,31	99	Case	MilxMaïs	1,00			0,54
82 b	SaBA	SaBA	Glacis	0,31	124	Case	Mil	1,00			0,44
82 c	SaBA	SaBA	Glacis	0,07	60	Case	Sorgho	1,00			1,50
82 d	SaBA	Mama	Glacis	0,39	139	Case	Arachide	1,00			0,43
83 a	Mama	Mama	Glacis	0,46	146	Case	MilxMaïs	1,00		13,78	10,80
84 a	Isa	Isa	Glacis	0,80	235	Brousse	Arachide	1,00			1,02
84 b	Isa	Isa	Glacis	0,31	272	Brousse	Arachide	1,00			1,04
85 a	Said	Said	Glacis	0,30	334	Brousse	Coton	0,73			1,05
85 b	Said	Aucun	Glacis	0,15	265	Brousse	Sorgho	0,73			0,50
85 c	Said	Aucun	Glacis	0,05	296	Brousse	Jachère	0,73	1		

Codage parcelle	Statut foncier		Caractéristiques physiques			Utilisation de l'espace		Système de culture				
	Propriétaire	Utilisateur	Géomorph.	Surface	Dist. à la concession	Auréole	Culture	Intensité de culture	Age de la jachère	Intensité de la fumure	Rendement	
				(ha)	(m)			(tMS ha^{-1})	(année)	(tMS ha^{-1})	(tMO ha^{-1})	(tMS ha^{-1})
85 d	Saïd	Saïd	Glacis	0,45	289	Brousse	Arachide	0,73				1,37
87 a	Mama	Mama	Glacis	0,47	162	Brousse	Mil	1,00		7,36	5,64	2,07
87 b	Mama	Mama	Glacis	0,36	285	Brousse	Mil	1,00				1,83
87 c	Mama	Mama	Glacis	2,43	341	Brousse	Arachide	1,00		0,31	0,22	1,23
87 d	Mama	Mama	Glacis	0,51	244	Brousse	Arachide	1,00				5,39
88 a	Mama	Mama	Glacis	0,25	182	Brousse	Mais	1,00		3,64	2,81	2,26
88 b	Mama	Mama	Glacis	0,19	200	Brousse	Mil&Mais	1,00		4,65	3,53	2,99
88 c	Mama	Mama	Glacis	0,58	267	Brousse	Mil	0,82		4,65	3,53	2,99
88 d	Mama	Mama	Bas glacis	0,31	310	Brousse	Mais	0,82				0,58
88 e	Mama	Mama	Bas glacis	0,36	233	Brousse	Sorgho	1,00		4,65	3,53	0,75
88 f	Mama	Keba	Glacis	0,09	78	Brousse	Mil&Mais	1,00				1,32
88 g	Mama	Mama	Glacis	0,14	157	Brousse	Mil	1,00		3,64	2,81	0,70
88 h	Mama	Keba	Glacis	0,17	125	Brousse	Mil&Mais	1,00				1,32
88 i	Mama	Aucun	Bas glacis	0,16	274	Brousse	Jachère	0,82	1	4,65	3,53	
89 a	Diou	Diou	Glacis	0,60	83	Case	Mais	1,00		6,21	4,80	1,28
89 b	Diou	Diou	Glacis	0,95	137	Case	Mil	1,00		6,21	4,80	0,86
89 c	Diou	Keba	Glacis	0,05	66	Case	Mil&Mais	1,00				1,32
90 a	Mamo	Mamo	Glacis	0,07	43	Case	Mil	1,00		13,30	10,40	1,61
90 b	Mamo	Mamo	Glacis	0,59	103	Case	Mais	1,00		13,30	10,40	1,61
90 c	Mamo	Mamo	Bas glacis	0,38	181	Case	Mil	1,00		13,30	10,40	1,62
90 d	Mamo	Mamo	Bas glacis	0,18	167	Case	Sorgho	1,00		13,30	10,40	0,80
90 e	Mamo	Mamo	Glacis	0,02	68	Case	Mil	1,00		6,56	5,13	1,61
91 a	Mama	Mama	Glacis	1,13	147	Case	Mil	1,00		2,29	1,83	2,01
92 a	Soul	Aucun	Glacis	0,11	495	Brousse	Jachère	0,45	2			
92 b	SaWA	SaWA	Plateau	0,41	537	Brousse	Arachide	0,45				0,54
92 c	SaWA	SaWA	Plateau	1,59	546	Brousse	Arachide	0,45				0,54
93 a	Fode	Fode	Glacis	0,25	416	Brousse	Sorgho	1,00				0,50
93 b	Fode	Fode	Glacis	0,30	447	Brousse	Mil	1,00				0,52
93 c	Fode	Aucun	Glacis	0,18	448	Brousse	Jachère	1,00	1			
93 d	Fode	Aucun	Glacis	0,25	455	Brousse	Jachère	1,00	1			
94 a	Tidi	Tidi	Plateau	0,80	621	Brousse	Arachide	0,45				0,36
94 b	Tidi	Aucun	Plateau	0,46	576	Brousse	Jachère	0,45	2			
94 c	Tidi	Aucun	Plateau	0,11	652	Brousse	Jachère	0,45	2			
95 a	Isa	Outer	Plateau	0,59	739	Brousse	Mil	0,09				0,10
95 b	Isa	Aucun	Plateau	0,19	773	Brousse	Jachère	0,09	1			
96 a	Soul	Aucun	Plateau	0,21	916	Brousse	Jachère	0,45	3			
96 b	Soul	Aucun	Plateau	1,25	870	Brousse	Jachère	0,45	4			
96 c	Soul	Aucun	Plateau	0,44	951	Brousse	Jachère	0,27	1			
97 a	Soul	Aucun	Plateau	0,24	1020	Brousse	Jachère	0,55	1			
98 a	Tidi	Aucun	Plateau	0,66	894	Brousse	Jachère	0,36	1			
98 b	Tidi	Aucun	Plateau	0,85	962	Brousse	Jachère	0,27	2			
99 a	Soul	Aucun	Plateau	0,33	1058	Brousse	Jachère	0,36	1			
99 b	Soul	Aucun	Plateau	0,71	1118	Brousse	Jachère	0,27	2			
100 a	Soul	Aucun	Plateau	0,80	1265	Brousse	Jachère	0,09	2			
101 a	Tidi	Aucun	Plateau	0,91	1101	Brousse	Jachère	0,18	1			
101 b	Tidi	Aucun	Plateau	1,03	1166	Brousse	Jachère	0,09	2			
102 a	Soul	Aucun	Plateau	0,94	1097	Brousse	Jachère	0,55	1			
102 b	Soul	Aucun	Plateau	0,11	1101	Brousse	Jachère	0,45	2			
102 c	Soul	Aucun	Plateau	0,21	1155	Brousse	Jachère	0,45	2			
103 a	Soul	Aucun	Plateau	0,41	1168	Brousse	Jachère	0,82	1			
103 b	Soul	Aucun	Plateau	0,97	1184	Brousse	Jachère	0,73	3			
107 a	SaWA	Aucun	Plateau	1,69	980	Brousse	Jachère	0,73	1			
107 b	SaWA	Aucun	Plateau	1,58	1083	Brousse	Jachère	0,64	2			
110 a	Soul	Aucun	Plateau	0,55	1130	Brousse	Jachère	0,00	2			
110 b	Soul	Aucun	Plateau	1,47	1076	Brousse	Jachère	0,09	11			
111 a	Soul	Soul	Plateau	1,15	872	Brousse	Arachide	0,36				1,71
112 a	Fode	Fode	Plateau	1,09	815	Brousse	Arachide	1,00				0,72
112 b	Fode	Aucun	Plateau	0,65	778	Brousse	Jachère	0,82	2			
112 c	Fode	Fode	Plateau	0,13	730	Brousse	Arachide	0,82				0,72
113 a	Tidi	Tidi	Plateau	0,76	662	Brousse	Arachide	0,36				0,50
113 b	Tidi	Aucun	Plateau	1,40	705	Brousse	Jachère	0,36	1			
113 c	Tidi	Tidi	Plateau	0,11	577	Brousse	Arachide	0,36				0,54
114 a	Mama	Mama	Glacis	0,49	493	Brousse	Arachide	0,18		0,45	0,33	1,93
115 a	Fode	Mama	Glacis	0,22	717	Brousse	Mais	0,45		0,99	0,72	0,89
115 b	Fode	Aucun	Bas glacis	1,63	811	Brousse	Jachère	0,45	1			
117 a	Tidi	Aucun	Glacis	0,77	757	Brousse	Jachère	0,55	2			
118 a	Tidi	Aucun	Glacis	1,34	870	Brousse	Jachère	0,09	1			
119 a	Soul	Aucun	Bas glacis	1,27	945	Brousse	Jachère	0,18	1			
120 a	SaWA	Aucun	Bas glacis	1,56	1168	Brousse	Jachère	0,45	3			
120 b	SaWA	Aucun	Glacis	1,19	1135	Brousse	Jachère	0,45	3			
121 a	Fode	Aucun	Glacis	1,42	1306	Brousse	Jachère	0,36	5			
121 b	Fode	Aucun	Glacis	0,18	1349	Brousse	Jachère	0,27	7			
122 a	Mama	Mama	Glacis	1,05	377	Brousse	Arachide	1,00				1,23
201 a	Isa	Isa	Glacis	0,21	42	Case	Mil&Mais	1,00				2,50
201 b	Isa	Isa	Glacis	0,04	40	Case	Mil&Mais	1,00				2,50
201 c	Isa	Saïd	Glacis	0,04	41	Case	Sorgho	1,00				1,50
201 d	Isa	Isa	Glacis	0,02	24	Case	Mil&Mais	1,00				2,50
201 e	Isa	Isa	Glacis	0,01	24	Case	Mil	1,00				3,00
205 a	Aucun	Aucun	Glacis	0,01			Dwelling	1,00				
207 a	Aucun	Aucun	Plateau	9,30		Brousse	Jachère	0,00	11			
208 a	Aucun	Aucun	Plateau	4,69		Brousse	Jachère	0,00	11			
209 a	Aucun	Aucun	Plateau	9,25		Brousse	Jachère	0,00	16			
210 a	Aucun	Aucun	Plateau	3,86		Brousse	Jachère	0,00	18			
211 a	Aucun	Aucun	Plateau	9,33		Brousse	Jachère	0,00	12			
212 a	Aucun	Aucun	Plateau	19,67		Brousse	Jachère	0,00	11			
213 a	Aucun	Aucun	Plateau	0,73		Brousse	Jachère	0,00	18			
214 a	Aucun	Aucun	Plateau	2,00		Brousse	Jachère	0,00	18			
215 a	Aucun	Aucun	Plateau	2,04		Brousse	Jachère	0,00	18			
218 a	Isa	Awa	Glacis	0,24	184	Brousse	Sorgho	0,00				1,00
219 a	Soul	Soul	Glacis	0,31	1031	Brousse	Arachide	0,00				2,07
304 a	Saïd	Saïd	Plateau	0,28	623	Brousse	Coton	0,09				0,95

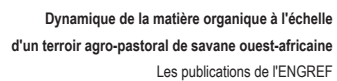
Annexe 3 Statistiques élémentaires des précipitations, de l'évapotranspiration potentielle et de la température de la station de Kolda, 1978-1997.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Année
Précipitations (mm an ⁻¹)													
Moyenne	2,2	4,4	2,8	1,0	18,4	128,0	249,9	304,4	192,6	63,1	9,6	3,1	959,8
ET	0,0	3,0	0,7	0,6	4,9	17,3	13,9	23,9	14,4	6,7	3,1	0,9	43,4
n	1	4	2	2	17	20	20	20	20	20	8	6	20
Température (°C)													
Moyenne	23,8	26,8	29,3	31,0	31,9	30,3	27,9	27,5	27,7	28,3	26,4	23,8	27,9
ET	0,4	0,2	0,2	0,4	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
n	20	20	20	20	20	20	20	19	19	19	19	20	20
Evapotranspiration potentielle (mm)													
Moyenne	106,0	118,0	154,0	168,0	181,0	145,0	132,0	118,0	115,0	123,0	111,0	101,0	1572,0

ET : erreur type

Annexe 4 Description de quatre profils pédologiques typiques le long d'une toposéquence dans le village de Sare Yorobana.

PROFIL 1 : SOL FERRUGINEUX TROPICAL LESSIVE DE PLATEAU.	PROFIL 2 : SOL FERRUGINEUX TROPICAL LESSIVE REMANIE SUR MILIEU DE GLACIS.	PROFIL 3 : SOL PEU EVOLUE D'APPORT ALLUVIAL SUR BAS DE GLACIS.	PROFIL 4 : SOL HYDROMORPHE A GLEY ET PSEUDO GLEY, EN BAS FOND.
Coordonnées : 12°48'81" N 14°53'068" O 600 m au sud est du village.	Coordonnées : 12°49'136" N 14°53'442" O 50 m des concessions.	Coordonnées : Bas de glacis, 300 m au nord du village	Coordonnées : Bas fond, à 600 m au Nord du village.
Environnement : Périphérie de plateau. Jachère de 1 an à Terminalia macroptera.	Environnement : Milieu de glacis. Champ de case supportant une culture continue de céréales	Environnement : Palmeraie jamais cultivée ; strate herbacée développée.	Environnement : Lit majeur du marigot. Champ de riz inondé saisonnièrement. Observations en saison sèche ; niveau de la nappe au plus bas.
Description : - 0-15 cm (A) : humifère ; brun clair (2,5 YR 4/2) ; texture sablo-argileuse à limono-sableuse ; structure massive ; bonne porosité ; activité biologique moyenne, racelles nombreuses ; pellicule de battance ; transition nette, ondulée. - 20-50 cm (B) : faiblement humifère ; brun-rouge (2,5 YR 5/4) ; texture sablo-argileuse à limono-sableuse ; structure massive, en éclat ; activité biologique faible à moyenne ; transition progressive. - 50-70 cm (BT) : brun-rouge (2,5 YR 5/4) ; texture sablo-argileuse à argilo-sableuse ; activité biologique faible ; ambiance oxydo-réductrice pendant une partie de l'année entraînant une immobilisation du fer. - 70-130 cm (B3FE) : rose (5 YR 7/3) ; texture sablo-argileuse à argilo-sableuse ; activité biologique moyenne, plus importante que dans BT ; présence de tâches rouge jaunâtres (5 YR 5/8).	Description : - 0-10 cm (A1p) : horizon de labour ; humifère ; texture sablo-argileuse à sablo-limoneuse, friable ; activité biologique moyenne (racines) ; structure massive ; pas de battance (piétinement). - 10-30 cm (A2) : peu humifère ; rose-gris (7,5 YR 6/2) ; texture sablo-argileuse ; bonne porosité ; activité biologique moyenne (quelques racines) ; transition progressive. - 30-70 cm (BT) : brun clair (7,5 YR 6/4) ; texture sablo-argileuse à argilo-sableuse ; pas d'activité biologique. - 70-130 cm (BTA) : rose (7,5 YR 7/4) Sol anthropisé ; gradient d'argile croissant vers le bas ; plinthise absente.	Description : - 0-40 cm (A1) : faiblement humifère ; gris (5 YR 6/1) ; texture sableuse à sablo-limoneuse ; structure massive ; activité biologique marquée (racines d'herbacées et de palmiers). - 40-60 cm (A2) : peu humifère ; gris clair (5 YR 7/1) ; structure massive ; activité biologique moyenne (racines de palmier). - 60-110 cm (C) : texture sableuse ; blanc (5 YR 8/1) ; structure massive. - 110-130 cm (B) : gris rose (5 YR 7/2, humide) ; texture limono-sableuse ; structure massive ; traces d'hydromorphie. Sol peu évolué à hydromorphie de profondeur, très poreux ; structure friable si mouillée, massive si sec. Système azonal lié à une hydromorphie de profondeur.	Description : - 0-10 cm (A) : très humifère ; gris (2,5 Y 5/0) ; texture sablo-argileuse à limono-argileuse ; structure massive ; activité biologique importante avec abondance de racines de riz ; - 10-50 cm (B) : gris clair (2,5 Y 7/2, mouillé) ; traces de pseudo gley. 50-95 cm(C) : hydromorphe à gley ; nappe d'eau à 95 cm.



Annexe 4b Propriétés physiques

Horizon (cm)	argile (%)	limon fin (%)	limon grossier (%)	sable fin (%)	sable grossier (%)	total (%)
Profil 1						
0-15	5,7	6,2	10,1	35,7	41,2	98,9
15-50	22,1	7,6	7,4	24,7	37,3	99,1
50-70	39,5	7,1	6,3	18,1	30,8	101,8
70-130	46,8	8,2	4,4	18,3	23,0	100,7
Profil 2						
0-10	5,6	5,2	8,8	35,7	45,4	100,7
10-35	8,4	5,2	6,9	32,9	47,3	100,7
35-65	18,6	5,8	6,7	26,8	42,5	100,4
65-130	33,8	7,5	4,5	22,2	33,3	101,3
Profil 3						
0-40	7,4	12,6	13,6	30,3	36,7	100,6
40-60	3,1	5,5	8,6	33,4	50,5	101,1
60-110	1,6	4,5	7,4	33,4	52,9	99,8
Profil 4						
0-10	37,4	16,7	9,7	21,9	14,5	100,2
10-50	30,0	14,1	12,7	26,0	18,1	100,9
50-100	11,1	7,2	9,5	48,3	24,9	101,0

Annexe 4c Propriétés chimiques

Horizon	C	N	C/N	Bases échangeables (meq 100g ⁻¹)				CEC (meq 100g ⁻¹)	Taux de sat. (%)
	(mg g ⁻¹)	(mg g ⁻¹)		Ca	Mg	Na	K		
Profil 1									
0-15	5,43	0,44	12,3	1,65	0,56	0,00	0,04	2,33	96
15-50	3,58	0,36	9,9	1,97	0,44	0,02	0,03	2,69	91
50-70	2,77	0,33	8,4	1,81	1,20	0,02	0,08	3,1	100
70-130	1,83	0,27	6,8	1,34	1,12	0,02	0,05	3,62	70
Profil 2									
0-10	4,24	0,34	12,5	1,74	0,76	0,02	2,31	2,13	227
10-35	2,24	0,2	11,2	1,15	0,53	0,03	0,31	1,61	125
35-65	2,19	0,24	9,1	1,21	0,92	0,01	0,43	2,13	121
65-130	1,97	0,26	7,6	0,61	0,41	0,02	0,25	2,57	50
Profil 3									
0-40	3,46	0,3	11,5	0,26	0,23	0,01	0,09	1,41	42
40-60	0,68	0,07	9,7	0,05	0,20	0,01	0,06	0,2	162
60-110	0,21	0,02	10,5	0,09	0,26	0,11	0,00	0,04	1153
Profil 4									
0-10	11,3	1,18	9,6	3,58	0,89	0,05	0,08	7,12	65
10-50	2,53	0,24	10,5	2,70	0,64	0,03	0,13	4,18	84
50-100	1,97	0,15	13,1	1,40	0,51	0,10	0,09	1,89	111

Annexe 5 Biomasse moyenne des racines (tMS ha⁻¹) de 9 parcelles de jachère utilisées pour comparer les techniques par excavation complète et par tarière.

Parcelle	Excavation	Tarière
JA01a	5,44	4,59
JA01b	8,59	3,45
JA01c	3,40	0,83
JA02a	5,85	2,36
JA04	4,68	0,59
JA06b	13,81	7,37
JA13a	19,57	7,97
JA18a	14,06	7,89
JA26	19,88	4,62

Annexe 6 Teneur en carbone, en azote et en phosphore de quelques composantes végétales aériennes et souterraines des champs cultivés et des jachères (données détaillées).

a.						b.					
Parcelle	C (g 100g ⁻¹ MS)					Parcelle	N (g 100g ⁻¹ MS)				
	Herb.	Litière	Racine fine	Racine épaisse	Souche		Herb.	Litière	Racine fine	Racine épaisse	Souche
AR01	37,1		34,6	38,0 ⁺		AR01	2,01		1,74	0,35 ⁺	
AR02	38,3		35,4	38,0 ⁺	38,0 ⁺	AR02	1,88		1,56	0,35 ⁺	0,35 ⁺
AR03	37,8		33,9	38,0 ⁺	38,0 ⁺	AR03	1,90		1,61	0,35 ⁺	0,35 ⁺
AR04	38,0		34,2	38,0 ⁺	38,0 ⁺	AR04	1,92		1,73	0,35 ⁺	0,35 ⁺
AR05	35,8		31,7	38,0 ⁺		AR05	1,90		1,65	0,35 ⁺	
AR06	38,2		35,0	38,0 ⁺		AR06	1,97		1,66	0,35 ⁺	
JA1a	37,6	33,1	34,0	35,9	35,9 [‡]	JA1a	0,55	0,51	0,82	0,44	0,44 [‡]
JA1b	38,8	33,1	35,4	39,5	39,5 [‡]	JA1b	0,48	0,51	0,35	0,24	0,24 [‡]
JA1c	37,7	35,9	36,7	38,4	38,4 [‡]	JA1c	0,69	0,67	0,82	0,36	0,36 [‡]
JA2a	33,7	32,4	32,7	36,0	36,0 [‡]	JA2a	0,62	0,53	0,86	0,62	0,60 [‡]
JA4	33,5	33,1	32,6	35,4	35,4 [‡]	JA4	0,95	0,51	0,86	0,40	0,40 [‡]
JA7a	34,9	31,6	33,3	36,5		JA7a	0,65	0,62	1,01	0,43	
JA12	34,4	29,8	34,3 [†]	36,6 [†]		JA12	0,72	0,53	0,78 [†]	0,40 [†]	
JA13a	32,8	34,5	34,1	36,3		JA13a	1,04	0,50	0,78	0,34	
JA17	34,4	33,4	34,3 [†]	36,6 [†]		JA17	0,72	0,42	0,78 [†]	0,40 [†]	
JA18a	32,1	34,6	36,1	35,3		JA18a	0,87	0,48	0,75	0,36	
JA26	28,3	32,4	33,6	36,2		JA26	0,63	0,36	0,73	0,39	

c.					
Parcelle	P (g 100g ⁻¹ DM)				
	Herb.	Litière	Racine fine	Racine épaisse	Souche
GN01	0,10		0,06	0,02 ⁺	
GN02	0,11		0,06	0,02 ⁺	0,02 ⁺
GN03	0,11		0,06	0,02 ⁺	0,02 ⁺
GN04	0,11		0,09	0,02 ⁺	0,02 ⁺
GN05	0,11		0,06	0,02 ⁺	
GN06	0,11		0,09	0,02 ⁺	
FA1a	0,06	0,03	0,05	0,04	0,04 [‡]
FA1b	0,07	0,03	0,03	0,01	0,01 [‡]
FA1c	0,05	0,03	0,04	0,01	0,01 [‡]
FA2a	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02 [‡]
FA4	0,09	0,03	0,05	0,03	0,03 [‡]
FA7a	0,06	0,03	0,04	0,03	
FA12	0,07	0,04	0,04 [†]	0,03 [†]	
FA13a	0,11	0,03	0,04	0,04	
FA17	0,07	0,03	0,04 [†]	0,03 [†]	
FA18a	0,08	0,04	0,04	0,04	
FA26	0,1	0,0	0,0	0,0	

+ : estimé comme la moyenne des valeurs des racines épaisses de JA1a, JA1b et JA1c.
‡ : estimé comme la teneur des racines épaisses mesurée dans les jachères âgées de un à quatre ans ; utilisé pour le calcul des stocks de C, N et P dans les jachères âgées de un à quatre ans seulement.
† non mesuré ; estimé d'après la moyenne des mesures réalisées sur les autres parcelles en jachère.
Racines fines : diamètre allant de 0 à 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises)

Annexe 7 Stockage du carbone (a), de l'azote (b) et du phosphore (c), dans la biomasse végétale pendant une succession culture-jachère.

AR : culture d'arachide. JA : jachère; le chiffre associé renvoie à l'âge de la jachère.

a. Stockage de carbone dans la biomasse ligneuse ($t\ ha^{-1}$)

Parcelle	BA ⁽¹⁾				Litière	Racine				Epaisse	Souche	BDPB ⁽²⁾
	Ligneuse					Fine (par profondeur de prélèvement en cm)						
	Tronc	Rameau	Feuille	Total		0-10	10-20	20-30	30-40			
AR01				0,05	0,88		0,07	0,05	0,04	0,02	2,0	
AR02				0,01	1,31		0,07	0,06	0,03	0,02	1,1	5,3
AR03				0,11	0,88		0,08	0,05	0,04	0,03	1,2	1,9
AR04				0,45	1,31		0,11	0,06	0,04	0,02	1,1	1,3
AR05				0,09	0,99		0,07	0,03	0,03	0,02	1,1	
AR06				0,01	1,31		0,10	0,06	0,03	0,02	1,2	
JA1a				2,45	0,61		0,27	0,09	0,07	0,05	2,0	1,3
JA1b				2,14	0,70		0,41	0,10	0,09	0,09	3,4	5,5
JA1c				1,88	0,55		0,30	0,06	0,08	0,07	1,3	1,9
JA1d	0,8	0,5	0,3	1,6								1,6
JA1e	3,0	2,0	1,4	6,4								6,4
JA1f	3,3	2,3	1,8	7,3								7,3
JA2a					2,02	0,19	0,23	0,09	0,10	0,06	2,1	4,2
JA2b	4,3	2,8	2,0	9,1								8,0
JA3a	2,2	1,2	0,5	3,9								2,9
JA3b	5,5	3,4	2,2	11,2								8,6
JA3c	4,6	3,1	1,7	9,4								7,3
JA4					3,16	0,91	0,29	0,09	0,07	0,05	1,7	1,7
JA6a	5,8	3,4	2,4	11,6								4,2
JA6b	6,0	3,3	1,6	10,9								5,7
JA7a					1,16	0,94	0,37	0,19	0,15	0,11	5,0	
JA7b	6,1	3,2	1,2	10,5								4,1
JA10a	7,4	4,2	2,5	14,1								4,3
JA10b	8,1	4,3	2,3	14,6								6,5
JA12					0,66	1,15	0,41				5,2	
JA13a					0,31	0,41	0,62	0,41	0,25	0,23	7,1	
JA13b	8,0	3,9	1,5	13,5								4,6
JA15a	9,0	5,0	2,9	16,9								4,4
JA15b	8,4	4,4	2,4	15,2								6,8
JA17					0,74	0,89	0,45				5,8	
JA18a					0,58	0,60	0,44	0,27	0,22	0,19	5,0	
JA18b	10,1	4,3	2,2	16,6								5,6
JA25	8,4	4,5	2,4	15,3								5,1
JA26					0,41	0,56	0,41	0,27	0,23	0,27	7,2	

b. Stockage d'azote dans la biomasse ligneuse ($kg\ ha^{-1}$)

Parcelle	BA ⁽³⁾				Litière	Racine				Epaisse	Souche	BDPB ⁽²⁾
	Ligneuse			Herb.		Fine (par profondeur de prélèvement en cm)						
	Tronc	Rameau	Feuille			Total	0-10	10-20	20-30			
AR01				0,63	47,7		3,39	2,62	1,92	1,15	17,9	
AR02				0,10	64,0		3,06	2,66	1,50	1,03	10,5	48,0
AR03				1,36	44,5		3,98	2,57	2,01	1,27	10,8	17,3
AR04				5,63	66,3		5,73	3,07	1,92	1,14	10,4	12,3
AR05				1,12	52,5		3,43	1,55	1,35	0,89	10,2	
AR06				0,15	67,3		4,85	2,93	1,59	1,10	10,5	
JA1a					35,8	9,5	6,40	2,26	1,63	1,17	23,9	15,6
JA1b					26,5	10,8	4,10	0,97	0,89	0,90	20,6	33,2
JA1c					34,5	10,3	6,65	1,32	1,77	1,57	12,2	18,0
JA1d	5,0	3,5	10,7	19,2								19,2
JA1e	16,9	15,7	45,9	78,4								78,4
JA1f	36,2	18,2	73,8	128,2								128,2
JA2a					37,3	3,0	6,15	2,34	2,55	1,69	35,1	70,0
JA2b	22,4	22,4	65,2	110,0								104,3
JA3a	10,7	8,9	18,7	38,3								33,2
JA3b	33,3	27,5	75,7	136,6								120,9
JA3c	23,1	22,0	55,9	101,0								90,2
JA4					89,8	14,2	7,70	2,40	1,81	1,36	18,7	18,8
JA6a	28,6	29,2	80,3	138,1								45,5
JA6b	49,0	24,2	60,3	133,5								61,8
JA7a					21,6	18,4	11,26	5,80	4,42	3,48	59,4	
JA7b	41,3	25,7	43,9	110,9								44,0
JA10a	49,9	31,5	88,1	169,5								46,8
JA10b	44,5	32,7	75,4	152,7								70,2
JA12					13,9	20,5	9,21				56,5	
JA13a					10,0	5,9	14,21	9,28	5,77	5,30	66,5	
JA13b	47,7	28,5	50,6	126,7								49,5
JA15a	56,6	38,8	101,2	196,5								47,5
JA15b	54,8	34,8	80,8	170,4								73,5
JA17					15,5	11,1	10,25				62,7	
JA18a					15,7	8,4	9,13	5,57	4,65	3,94	50,6	
JA18b	55,5	30,7	72,1	158,3								60,8
JA25	51,0	31,1	81,0	163,1								54,6
JA26					9,0	6,2	8,86	5,84	5,03	5,96	77,5	

c. Stockage de phosphore dans la biomasse ligneuse (kg ha^{-1})

Parcelle	BA ⁽¹⁾				Litière	Racine							BDPB ⁽²⁾		
	Ligneuse					Fine (par profondeur de prélèvement en cm)								Epaisse	Souche
	Tronc	Rameau	Feuille	Total		Herb.				0-10	10-20	20-30			
AR01				0,06	2,42			0,12	0,09	0,07	0,04	1,04			
AR02				0,01	3,71			0,12	0,10	0,06	0,04	0,60	2,77		
AR03				0,14	2,65			0,15	0,10	0,07	0,05	0,63	1,00		
AR04				0,56	3,88			0,30	0,16	0,10	0,06	0,60	0,71		
AR05				0,11	2,91			0,12	0,06	0,05	0,03	0,59			
AR06				0,01	3,63			0,26	0,16	0,09	0,06	0,61			
JA1a				3,91	0,62			0,39	0,14	0,10	0,07	2,18	1,42		
JA1b				3,86	0,71			0,35	0,08	0,08	0,08	0,86	1,38		
JA1c				2,50	0,46			0,32	0,06	0,09	0,08	0,34	0,50		
JA1d	1,61	0,36	0,20	2,18										2,18	
JA1e	5,11	1,30	1,00	7,41										7,41	
JA1f	7,40	2,44	1,98	11,81										11,81	
JA2a					2,40	0,23		0,29	0,11	0,12	0,08	1,17	2,33		
JA2b	7,11	1,73	1,41	10,25										8,44	
JA3a	3,83	0,73	0,37	4,93										3,13	
JA3b	9,55	2,31	1,69	13,55										9,07	
JA3c	7,76	1,83	1,20	10,79										7,15	
JA4					8,50	0,93		0,45	0,14	0,11	0,08	1,40	1,41		
JA6a	9,12	2,07	1,71	12,91									3,33	6,49	
JA6b	12,14	2,79	1,40	16,33									4,51	8,39	
JA7a					1,99	0,89		0,45	0,23	0,18	0,14	4,14			
JA7b	11,47	2,33	0,95	14,75									3,22	6,27	
JA10a	14,23	3,09	1,89	19,20									3,42	7,73	
JA10b	13,98	2,74	1,60	18,32									5,12	7,05	
JA12					1,35	1,55		0,49				4,13			
JA13a					1,05	0,36		0,73	0,48	0,30	0,27	7,83			
JA13b	14,65	2,61	1,09	18,36									3,62	5,98	
JA15a	16,63	3,49	2,13	22,26									3,47	7,91	
JA15b	15,30	3,06	1,80	20,17									5,37	6,97	
JA17					1,50	0,80		0,54				4,58			
JA18a					1,45	0,70		0,49	0,30	0,25	0,21	5,62			
JA18b	17,61	2,68	1,56	21,85									4,44	6,31	
JA25	15,77	3,04	1,67	20,47									3,99	6,12	
JA26					1,00	0,52		0,49	0,32	0,28	0,33	7,95			

Annexe 8 Evolution de la matière sèche, du carbone, de l'azote et du phosphore de la biomasse aérienne ligneuse après la défriche d'une jachère jeune (JAJ) et après celle d'une jachère âgée (JAA) (jachère jeune : âgée de moins de 10 ans ; jachère âgée : 10 ans et plus).

Deux scénarios sont considérés : 50 % et 90 % de la biomasse disponible pour le brûlis est brûlée.

Type de jachère	Jachère jeune		Jachère âgée	
Efficacité du brûlis	50%	90%	50%	90%
MS (t ha^{-1})				
Perte - récolte	5,02	5,02	19,99	19,99
Perte - feu	8,39	15,10	10,2	18,4
Restitution - non brûlé	8,39	1,68	10,25	2,05
Restitution - cendres	0,00	0,00	0,00	0,00
C (t ha^{-1})				
Perte - récolte	1,93	1,93	7,26	7,26
Perte - feu	3,13	5,63	4,0	7,1
Restitution - non brûlé	3,13	0,63	3,95	0,79
Restitution - cendres	0,00	0,00	0,00	0,00
N (kg ha^{-1})				
Perte - récolte	12,00	12,00	43,98	43,98
Perte - feu	43,71	78,68	59,2	106,6
Restitution - non brûlé	43,71	8,74	59,24	11,85
Restitution - cendres	0,00	0,00	0,00	0,00
P (kg ha^{-1})				
Perte - récolte	3,46	3,46	13,22	13,22
Perte - feu	0,00	0,00	0,0	0,0
Restitution - non brûlé	3,52	0,70	3,43	0,69
Restitution - cendres	3,52	6,33	3,43	6,18

CHAPITRE 2

Annexe 9 Corrélation de Spearman entre les propriétés physiques et chimiques des sols de 11 parcelles de jachère et six parcelles de culture d'arachide de l'auréole de brousse pour les horizons a. 0-10 cm, b. 10-20 cm, c. 20-30 cm, d. 30-40 cm, e. 0-40 cm.

Codage des variables : ARG : argile. ARGLIM : argile+limon. ARGLIMF : argile+limon fin. C : carbone. CA : calcium. CFraFin : teneur en carbone de la fraction [0-50]µm. CFraGro : teneur en carbone de la fraction [50-2000] µm. CEC : capacité d'échange en cations. CN : rapport C/N. DENS : densité apparente. LIM : limon. LIMG : limon grossier. LIMF : limon fin. K : potassium. MG : magnésium. N : azote. NA : sodium. P : phosphore. PF25 et PF42 : humidité pondérale déterminée pour une succion équivalente à pF2,5 et pF4,2. PHH2O : pH eau. PHKCL : pH KCl. S : taux de saturation. SAB : sable. SABF : sable fin. SABG : sable grossier.

a. Horizon 0-10 cm

	C	CFRAFIN	CFRAGRO	N	P	CN	PHH2O	PHKCL	CA	MG	NA	K
C	1,00 ***	0,92 ***	0,89 ***	0,85 ***	0,24	0,28	0,34	0,59 *	0,72 **	0,74 ***	0,27	0,08
CFRAFIN	0,92 ***	1,00 ***	0,69 **	0,74 ***	0,16	0,36	0,42	0,63 **	0,79 ***	0,74 ***	0,24	-0,01
CFRAGRO	0,89 ***	0,69 **	1,00 ***	0,81 ***	0,33	0,19	0,28	0,52 *	0,57 *	0,62 **	0,31	0,32
N	0,85 ***	0,74 ***	0,81 ***	1,00 ***	0,20	-0,23	0,28	0,49 *	0,71 **	0,74 ***	0,12	0,11
P	0,24	0,16	0,33	0,20	1,00 ***	0,12	0,40	0,55 *	0,37	-0,09	0,25	0,44
CN	0,28	0,36	0,19	-0,23	0,12	1,00 ***	0,25	0,30	0,12	0,04	0,43	0,06
PHH2O	0,34	0,42	0,28	0,28	0,40	0,25	1,00 ***	0,86 ***	0,63 **	0,10	0,16	0,03
PHKCL	0,59 **	0,63 **	0,52 *	0,49 *	0,55 *	0,30	0,86 ***	1,00 ***	0,74 ***	0,43	0,10	0,20
CA	0,72 **	0,79 ***	0,57 *	0,71 **	0,37	0,12	0,63 **	0,74 ***	1,00 ***	0,50 *	0,27	0,03
MG	0,74 ***	0,74 ***	0,62 **	0,74 ***	-0,09	0,04	0,10	0,43	0,50 *	1,00 ***	0,08	-0,01
NA	0,27	0,24	0,31	0,12	0,25	0,43	0,16	0,10	0,27	0,06	1,00 ***	0,23
K	0,08	-0,01	0,32	0,11	0,44	0,06	0,03	0,20	0,03	-0,01	0,23	1,00 ***
CEC	0,79 ***	0,85 ***	0,59 *	0,76 ***	-0,06	0,13	0,19	0,38	0,66 **	0,76 ***	0,29	0,06
S	0,66 **	0,72 **	0,54 *	0,67 **	0,35	0,08	0,68 **	0,77 ***	0,96 ***	0,49 *	0,19	-0,01
ARG	0,53 *	0,47	0,42	0,57 *	-0,36	-0,05	-0,38	-0,16	0,29	0,55 *	0,12	-0,02
LIMF	0,41	0,43	0,32	0,49 *	-0,08	-0,10	-0,22	0,05	0,09	0,74 ***	0,05	-0,06
LIMG	0,22	0,44	0,05	0,25	-0,02	0,00	0,29	0,40	0,36	0,51 *	-0,10	-0,14
SABF	-0,26	-0,37	-0,08	-0,38	0,40	0,27	-0,06	0,01	-0,22	-0,50 *	0,11	0,57 *
SABG	-0,09	-0,05	-0,17	-0,06	-0,60 *	-0,18	-0,18	-0,45	-0,17	-0,08	-0,09	-0,57 *
ARGLIMF	0,50 *	0,47	0,39	0,63 **	-0,28	-0,18	-0,36	-0,12	0,26	0,69 **	0,13	-0,06
PF25	0,08	0,15	-0,14	-0,05	-0,50 *	0,23	-0,13	-0,23	0,04	0,05	-0,01	-0,48 *
PF42	0,60 *	0,52 *	0,48 *	0,52 *	-0,30	0,18	-0,11	-0,01	0,34	0,50 *	0,22	-0,17
DENS	-0,08	-0,14	-0,01	-0,05	0,11	0,06	-0,02	0,08	0,09	-0,04	0,31	0,58 *

a. Horizon 0-10 cm (suite)

	CEC	S	ARG	LIMF	LIMG	SABF	SABG	ARGLIMF	PF25	PF42	DENS
C	0,79 ***	0,66 **	0,53 *	0,41	0,22	-0,26	-0,09	0,50 *	0,08	0,60 *	-0,08
CFRAFIN	0,85 ***	0,72 **	0,47	0,43	0,44	-0,37	-0,05	0,47	0,15	0,52 *	-0,14
CFRAGRO	0,59 *	0,54 *	0,42	0,32	0,05	-0,08	-0,17	0,39	-0,14	0,48 *	-0,01
N	0,76 ***	0,67 **	0,57 *	0,49 *	0,25	-0,38	-0,06	0,63 **	-0,05	0,52 *	-0,05
P	-0,06	0,35	-0,36	-0,08	-0,02	0,40	-0,60 *	-0,28	-0,50 *	-0,30	0,11
CN	0,13	0,08	-0,05	-0,10	0,00	0,27	-0,18	-0,18	0,23	0,18	0,06
PHH2O	0,19	0,68 **	-0,38	-0,22	0,29	-0,06	-0,18	-0,36	-0,13	-0,11	-0,02
PHKCL	0,38	0,77 ***	-0,16	0,05	0,40	0,01	-0,45	-0,12	-0,23	-0,01	0,08
CA	0,66 **	0,96 ***	0,29	0,09	0,36	-0,22	-0,17	0,26	0,04	0,34	0,09
MG	0,76 ***	0,49 *	0,55 *	0,74 ***	0,51 *	-0,50 *	-0,08	0,69 **	0,05	0,50 *	-0,04
NA	0,29	0,19	0,12	0,05	-0,10	0,11	-0,09	0,13	-0,01	0,22	0,31
K	0,06	-0,01	-0,02	-0,06	-0,14	0,57 *	-0,57 *	-0,06	-0,48 *	-0,17	0,58 *
CEC	1,00 ***	0,52 *	0,71 **	0,61 **	0,31	-0,35	0,02	0,74 ***	0,08	0,51 *	0,02
S	0,52 *	1,00 ***	0,16	0,02	0,40	-0,27	-0,16	0,16	0,04	0,33	0,04
ARG	0,71 **	0,16	1,00 ***	0,47	-0,06	-0,25	0,19	0,91 ***	0,39	0,77 ***	0,15
LIMF	0,61 **	0,02	0,47	1,00 ***	0,33	-0,43	0,04	0,76 ***	-0,16	0,21	-0,31
LIMG	0,31	0,40	-0,06	0,33	1,00 ***	-0,58 *	-0,16	0,05	0,08	-0,12	-0,23
SABF	-0,35	-0,27	-0,25	-0,43	-0,58 *	1,00 ***	-0,61 **	-0,39	-0,33	-0,36	0,49 *
SABG	0,02	-0,16	0,19	0,04	-0,16	-0,61 **	1,00 ***	0,18	0,40	0,32	-0,38
ARGLIMF	0,74 ***	0,16	0,91 ***	0,76 ***	0,05	-0,39	0,18	1,00 ***	0,18	0,66 **	-0,01
PF25	0,08	0,04	0,09	-0,16	0,08	-0,33	0,40	0,18	1,00 ***	0,62 **	0,05
PF42	0,51 *	0,33	0,77 ***	0,21	-0,12	-0,36	0,32	0,66 **	0,62 **	1,00 ***	0,07
DENS	0,02	0,04	0,15	-0,31	-0,23	0,49 *	-0,38	-0,01	0,05	0,07	1,00 ***

Annexe 9 (suite)

b. Horizon 10-20 cm

	C	CFRAFIN	CFRAGRO	N	P	CN	PHH2O	PHKCL	CA	MG	NA	K
C	1.00 ***	0.62 **	0.31	0.60 *	0.31	0.60 *	0.20	0.21	0.40	0.27	0.30	0.52 *
CFRAFIN	0.62 **	1.00 ***	-0.48	0.25	-0.01	0.48 *	0.21	0.19	0.45	0.03	0.05	0.07
CFRAGRO	0.31	-0.48	1.00 ***	0.22	0.39	0.20	-0.04	-0.01	-0.17	0.33	0.33	0.31
N	0.60 *	0.25	0.22	1.00 ***	0.09	-0.18	0.32	0.37	0.53 *	0.52 *	0.17	0.34
P	0.31	-0.01	0.39	0.09	1.00 ***	0.33	0.27	0.23	0.05	-0.19	0.47	0.36
CN	0.60 *	0.46 *	0.20	-0.18	0.33	1.00 ***	0.03	-0.02	0.13	-0.19	0.17	0.26
PHH2O	0.20	0.21	-0.04	0.32	0.27	0.03	1.00 ***	0.99 ***	0.83 ***	0.14	0.26	0.09
PHKCL	0.21	0.19	-0.01	0.37	0.23	-0.02	0.99 ***	1.00 ***	0.82 ***	0.17	0.17	0.14
CA	0.40	0.45	-0.17	0.53 *	0.05	0.13	0.83 ***	0.82 ***	1.00 ***	0.16	0.24	0.22
MG	0.27	0.03	0.33	0.52 *	-0.19	-0.19	0.14	0.17	0.16	1.00 ***	0.04	0.01
NA	0.30	0.05	0.33	0.17	0.47	0.17	0.26	0.17	0.24	0.04	1.00 ***	0.30
K	0.52 *	0.07	0.31	0.34	0.36	0.26	0.09	0.14	0.22	0.01	0.30	1.00 ***
CEC	0.53 *	0.23	0.16	0.47	-0.05	0.24	-0.30	-0.23	0.08	0.02	-0.16	0.57 *
S	0.25	0.26	-0.04	0.50 *	0.17	-0.10	0.94 ***	0.92 ***	0.84 ***	0.36	0.30	0.07
ARG	0.18	0.20	-0.13	0.22	-0.43	-0.12	-0.73 ***	-0.70 ***	-0.38	0.15	-0.31	-0.04
LIMF	0.21	-0.03	0.38	0.07	-0.04	0.10	-0.26	-0.27	-0.31	0.57 *	0.02	-0.02
LIMG	-0.15	-0.02	0.08	-0.12	0.19	0.07	0.15	0.19	0.05	-0.09	-0.15	-0.05
SABF	0.23	0.13	-0.05	-0.10	0.23	0.41	0.40	0.32	0.51 *	-0.27	0.47	0.42
SABG	-0.37	-0.26	-0.13	-0.05	-0.48	-0.48 *	-0.51 *	-0.55 *	0.24	-0.32	-0.56 *	
ARGLIMF	0.28	0.13	0.16	0.25	-0.30	-0.04	-0.71 **	-0.67 **	-0.47	0.35	-0.25	0.01
PF25	-0.41	-0.05	-0.41	-0.14	-0.53 *	-0.42	-0.55 *	-0.57 *	-0.29	-0.02	-0.22	-0.43
PF42	-0.10	0.06	-0.36	0.20	-0.62 **	-0.45	-0.40	-0.36	-0.09	0.16	-0.33	-0.22
DENS	0.67 **	0.35	0.30	0.32	0.04	0.44	0.18	0.19	0.24	0.35	0.07	-0.05

c. Horizon 20-30 cm

	C	N	P	CN	PHH2O	PHKCL	CA	MG	NA	K	CEC	S
C	1.00 ***	0.82 ***	-0.01	0.17	-0.27	-0.21	0.07	0.46	0.26	0.47	0.47	0.06
N	0.82 ***	1.00 ***	0.02	-0.35	-0.35	-0.29	0.14	0.42	0.19	0.26	0.38	0.07
P	-0.01	0.02	1.00 ***	0.06	-0.03	-0.06	-0.10	-0.47	0.07	0.15	0.00	-0.10
CN	0.17	-0.35	0.06	1.00 ***	0.02	0.03	-0.21	0.01	0.09	0.03	0.20	-0.15
PHH2O	-0.27	-0.35	-0.03	0.02	1.00 ***	0.98 ***	0.79 ***	-0.07	0.62 **	0.07	-0.70 **	0.85 ***
PHKCL	-0.21	-0.29	-0.06	0.03	0.98 ***	1.00 ***	0.80 ***	-0.08	0.62 **	0.09	-0.68 **	0.84 ***
CA	0.07	0.14	-0.10	-0.21	0.79 ***	0.80 ***	1.00 ***	0.02	0.62 **	0.02	-0.52 *	0.86 ***
MG	0.46	0.42	-0.47	0.01	-0.07	-0.08	0.02	1.00 ***	0.34	0.09	0.08	0.26
NA	0.26	0.19	0.07	0.09	0.62 **	0.62 **	0.62 **	0.34	1.00 ***	0.12	-0.42	0.77 ***
K	0.47	0.26	0.15	0.03	0.07	0.09	0.02	0.09	0.12	1.00 ***	0.37	0.02
CEC	0.47	0.38	0.00	0.20	-0.70 **	-0.68 **	-0.52 *	0.08	-0.42	0.37	1.00 ***	-0.70 **
S	0.06	0.07	-0.10	-0.15	0.85 ***	0.84 ***	0.86 ***	0.26	0.77 ***	0.02	-0.70 **	1.00 ***
ARG	0.70 **	0.73 ***	0.11	-0.03	-0.79 ***	-0.75 ***	-0.42	0.25	-0.16	0.19	0.68 **	-0.50 *
LIMF	-0.02	0.10	0.06	-0.19	-0.37	-0.34	-0.48 *	0.06	-0.47	0.04	0.30	-0.40
LIMG	0.07	0.04	-0.18	0.05	0.45	0.42	0.53 *	0.22	0.38	-0.12	-0.15	0.42
SABF	-0.50 *	-0.60 *	0.34	0.18	0.43	0.39	0.12	-0.71 **	-0.14	0.10	-0.25	0.06
SABG	0.09	0.15	-0.31	-0.02	-0.31	-0.26	-0.24	0.48 *	0.01	-0.33	-0.13	-0.06
ARGLIMF	0.64 **	0.69 **	0.04	-0.08	-0.83 ***	-0.80 ***	-0.52 *	0.27	-0.23	0.12	0.67 **	-0.55 *
PF25	0.37	0.65 **	-0.08	-0.35	-0.66 **	-0.65 **	-0.22	0.24	-0.18	-0.28	0.29	-0.33
PF42	0.48 *	0.68 **	0.05	-0.27	-0.72 **	-0.72 **	-0.32	0.28	-0.12	-0.05	0.44	-0.40
DENS	0.05	-0.04	-0.24	0.26	-0.13	-0.18	-0.17	0.09	0.06	0.02	0.29	-0.09

Annexe 9 (suite)

b. Horizon 10-20 cm (suite)

	CEC	S	ARG	LIMF	LIMG	SABF	SABG	ARCLIMF	PF25	PF42	DENS
C	0,53 *	0,25	0,18	0,21	-0,15	0,23	-0,37	0,28	-0,41	-0,10	0,67 **
CFRAFIN	0,23	0,26	0,20	-0,03	-0,02	0,13	-0,26	0,13	-0,05	0,06	0,35
CFRAGRO	0,16	-0,04	-0,13	0,38	0,08	-0,05	-0,13	0,16	-0,41	-0,36	0,30
N	0,47	0,50 *	0,22	0,07	-0,12	-0,10	-0,05	0,25	-0,14	0,20	0,32
P	-0,05	0,17	-0,43	-0,04	0,19	0,23	-0,48	-0,30	-0,53 *	-0,62 **	0,04
CN	0,24	-0,10	-0,12	0,10	0,07	0,41	-0,48 *	-0,04	-0,42	-0,45	0,44
PHH2O	-0,30	0,94 ***	-0,73 ***	-0,26	0,15	0,40	-0,51 *	-0,71 **	-0,55 *	-0,40	0,18
PHKCL	-0,23	0,92 ***	-0,70 **	-0,27	0,19	0,32	-0,51 *	-0,67 **	-0,57 *	-0,36	0,19
CA	0,08	0,84 ***	-0,38	-0,31	0,05	0,51 *	-0,55 *	-0,47	-0,29	-0,09	0,24
MG	0,02	0,36	0,15	0,57 *	-0,09	-0,27	0,24	0,35	-0,02	0,16	0,35
NA	-0,16	0,30	-0,31	0,02	-0,15	0,47	-0,32	-0,25	-0,22	-0,33	0,07
K	0,57 *	0,07	-0,04	-0,02	-0,05	0,42	-0,56 *	0,01	-0,43	-0,22	-0,05
CEC	1,00 ***	-0,29	0,49 *	0,17	0,01	-0,01	-0,23	0,52 *	0,03	0,14	0,09
S	-0,29	1,00 ***	-0,53 *	-0,19	0,05	0,29	-0,35	-0,53 *	-0,43	-0,23	0,19
ARG	0,49 *	-0,53 *	1,00 ***	0,19	-0,31	-0,41	0,50 *	0,91 ***	0,58 *	0,70 **	0,06
LIMF	0,17	-0,19	0,19	1,00 ***	0,17	-0,36	0,20	0,50 *	0,01	-0,10	0,35
LIMG	0,01	0,05	-0,31	0,17	1,00 ***	-0,37	-0,45	-0,12	-0,12	-0,40	-0,27
SABF	-0,01	0,29	-0,41	-0,36	-0,37	1,00 ***	-0,55 *	-0,57 *	-0,22	-0,17	0,11
SABG	-0,23	-0,35	0,50 *	0,20	-0,45	-0,55 *	1,00 ***	0,45	0,40	0,49 *	0,07
ARCLIMF	0,52 *	-0,53 *	0,91 ***	0,50 *	-0,12	-0,57 *	0,45	1,00 ***	0,38	0,46	0,16
PF25	0,03	-0,43	0,58 *	0,01	-0,12	-0,22	0,40	0,38	1,00 ***	0,77 ***	-0,30
PF42	0,14	-0,23	0,70 **	-0,10	-0,40	-0,17	0,49 *	0,46	0,77 ***	1,00 ***	0,07
DENS	0,09	0,19	0,06	0,35	-0,27	0,11	0,07	0,16	-0,30	0,07	1,00 ***

c. Horizon 20-30 cm (suite)

	ARG	LIMF	LIMG	SABF	SABG	ARCLIMF	PF25	PF42	DENS
C	0,70 **	-0,02	0,07	-0,50 *	0,09	0,64 **	0,37	0,48 *	0,05
N	0,73 ***	0,10	0,04	-0,60 *	0,15	0,69 **	0,65 **	0,68 **	-0,04
P	0,11	0,06	-0,18	0,34	-0,31	0,04	-0,08	0,05	-0,24
CN	-0,03	-0,19	0,05	0,18	-0,02	-0,08	-0,35	-0,27	0,26
PHH2O	-0,79 ***	-0,37	0,45	0,43	-0,31	-0,83 ***	-0,66 **	-0,72 **	-0,13
PHKCL	-0,75 ***	-0,34	0,42	0,39	-0,26	-0,80 ***	-0,65 **	-0,72 **	-0,18
CA	-0,42	-0,48 *	0,53 *	0,12	-0,24	-0,52 *	-0,22	-0,32	-0,17
MG	0,25	0,06	0,22	-0,71 **	0,48 *	0,27	0,24	0,28	0,09
NA	-0,16	-0,47	0,38	-0,14	0,01	-0,23	-0,18	-0,12	0,06
K	0,19	0,04	-0,12	0,10	-0,33	0,12	-0,28	-0,05	0,02
CEC	0,68 **	0,30	-0,15	-0,25	-0,13	0,67 **	0,29	0,44	0,29
S	-0,50 *	-0,40	0,42	0,06	-0,06	-0,55 *	-0,33	-0,40	-0,09
ARG	1,00 ***	0,15	-0,27	-0,57 *	0,21	0,97 ***	0,75 ***	0,88 ***	0,12
LIMF	0,15	1,00 ***	0,05	-0,30	0,14	0,34	0,13	0,09	-0,22
LIMG	-0,27	0,05	1,00 ***	-0,24	-0,31	-0,22	-0,16	-0,26	-0,23
SABF	-0,57 *	-0,30	-0,24	1,00 ***	-0,58 *	-0,66 **	-0,60 *	-0,62 **	0,12
SABG	0,21	0,14	-0,31	-0,58 *	1,00 ***	0,28	0,45	0,40	0,00
ARCLIMF	0,97 ***	0,34	-0,22	-0,66 **	0,28	1,00 ***	0,75 ***	0,85 ***	0,12
PF25	0,75 ***	0,13	-0,16	-0,60 *	0,45	0,75 ***	1,00 ***	0,93 ***	0,07
PF42	0,88 ***	0,09	-0,26	-0,62 **	0,40	0,85 ***	0,93 ***	1,00 ***	0,03
DENS	0,12	-0,22	-0,23	0,12	0,00	0,12	0,07	0,03	1,00 ***

Annexe 9 (suite)

d. Horizon 30-30 cm

	C	N	P	CN	PHH2O	PHKCL	CA	MG	NA	K	CEC	S
C	1,00 ***	0,86 ***	0,14	0,05	-0,73 **	-0,68 **	-0,38	0,40	0,36	0,26	0,80 ***	-0,60 *
N	0,86 ***	1,00 ***	-0,01	-0,44	-0,52 *	-0,53 *	-0,11	0,56 *	0,26	0,31	0,82 ***	-0,48
P	0,14	-0,01	1,00 ***	0,32	0,05	0,12	-0,02	-0,32	0,26	0,26	-0,05	0,01
CN	0,05	-0,44	0,32	1,00 ***	-0,19	-0,07	-0,36	-0,37	0,09	-0,16	-0,28	-0,03
PHH2O	-0,73 **	-0,52 *	0,05	-0,19	1,00 ***	0,82 ***	0,66 **	-0,31	-0,16	-0,22	-0,64 **	0,67 **
PHKCL	-0,68 **	-0,53 *	0,12	-0,07	0,82 ***	1,00 ***	0,69 **	-0,12	-0,05	-0,18	-0,82 ***	0,83 ***
CA	-0,38	-0,11	-0,02	-0,36	0,66 **	0,69 **	1,00 ***	0,26	0,08	-0,17	-0,49 *	0,85 ***
MG	0,40	0,56 *	-0,32	-0,37	-0,31	-0,12	0,26	1,00 ***	0,40	0,36	0,21	0,17
NA	0,36	0,26	0,26	0,09	-0,16	-0,05	0,08	0,40	1,00 ***	0,61 **	0,15	0,10
K	0,26	0,31	0,26	-0,16	-0,22	-0,18	-0,17	0,36	0,61 **	1,00 ***	0,33	-0,20
CEC	0,80 ***	0,82 ***	-0,05	-0,28	-0,64 **	-0,82 ***	-0,49 *	0,21	0,15	0,33	1,00 ***	-0,84 ***
S	-0,60 *	-0,48	0,01	-0,03	0,67 **	0,83 ***	0,85 ***	0,17	0,10	-0,20	-0,84 ***	1,00 ***
ARG	0,83 ***	0,89 ***	-0,16	-0,30	-0,69 **	-0,79 ***	-0,37	0,35	0,08	0,14	0,93 ***	-0,72 **
LIMF	0,26	0,24	0,07	-0,10	-0,41	-0,30	-0,39	0,06	0,10	0,22	0,23	-0,25
LIMG	-0,64 **	-0,65 **	0,08	0,15	0,46	0,57 *	0,25	-0,29	0,00	-0,26	-0,62 **	0,47
SABF	-0,36	-0,29	0,15	-0,02	0,61 **	0,55 *	0,34	-0,23	-0,35	-0,18	-0,44	0,38
SABG	-0,31	-0,34	-0,48	0,03	0,09	0,20	0,19	0,22	0,25	0,19	-0,31	0,32
ARGLIMF	0,83 ***	0,89 ***	-0,15	-0,31	-0,67 **	-0,77 ***	-0,38	0,33	0,08	0,17	0,93 ***	-0,72 **
PF25	0,54 *	0,65 **	-0,28	-0,43	-0,42	-0,67 **	-0,11	0,27	-0,02	-0,04	0,69 **	-0,44
PF42	0,83 ***	0,86 ***	-0,11	-0,25	-0,60 *	-0,76 ***	-0,30	0,28	0,05	0,11	0,91 ***	-0,67 **
DENS	-0,18	0,01	-0,42	-0,47	-0,14	-0,06	-0,21	0,26	-0,04	0,40	0,11	-0,14

e. Horizon 0-40 cm

	C	N	P	CN	PHH2O	PHKCL	CA	MG	NA	K	CEC	S
C	1,00 ***	0,78 ***	0,13	-0,03	0,11	0,17	0,39	0,63 **	0,59 *	0,26	0,36	0,31
N	0,78 ***	1,00 ***	0,02	-0,53 *	0,01	0,04	0,38	0,63 **	0,32	0,10	0,39	0,33
P	0,13	0,02	1,00 ***	0,23	0,26	0,28	0,07	-0,38	0,45	0,39	-0,12	0,14
CN	-0,03	-0,53 *	0,23	1,00 ***	0,22	0,23	-0,08	-0,22	0,23	-0,01	-0,33	-0,02
PHH2O	0,11	0,01	0,26	0,22	1,00 ***	0,99 ***	0,83 ***	-0,01	0,51 *	0,13	-0,70 **	0,89 ***
PHKCL	0,17	0,04	0,28	0,23	0,99 ***	1,00 ***	0,83 ***	0,02	0,53 *	0,12	-0,66 **	0,88 ***
CA	0,39	0,38	0,07	-0,08	0,83 ***	0,83 ***	1,00 ***	0,28	0,48 *	0,01	-0,39	0,95 ***
MG	0,63 **	0,63 **	-0,38	-0,22	-0,01	0,02	0,28	1,00 ***	0,39	0,10	0,27	0,31
NA	0,59 *	0,32	0,45	0,23	0,51 *	0,53 *	0,48 *	0,39	1,00 ***	0,46	0,00	0,57 *
K	0,26	0,10	0,39	-0,01	0,13	0,12	0,01	0,10	0,46	1,00 ***	0,28	0,02
CEC	0,36	0,39	-0,12	-0,33	-0,70 **	-0,66 **	-0,39	0,27	0,00	0,28	1,00 ***	-0,54 *
S	0,31	0,33	0,14	-0,02	0,89 ***	0,88 ***	0,95 ***	0,31	0,57 *	0,02	-0,54 *	1,00 ***
ARG	0,29	0,46	-0,21	-0,46	-0,76 ***	-0,76 ***	-0,38	0,26	-0,17	-0,03	0,80 ***	-0,50 *
LIMF	0,19	0,21	0,07	0,00	-0,31	-0,27	-0,35	0,25	0,10	0,12	0,27	-0,24
LIMG	-0,03	-0,14	0,29	0,23	0,37	0,43	0,24	-0,09	0,31	-0,23	-0,34	0,33
SABF	-0,20	-0,33	0,27	0,33	0,51 *	0,49 *	0,25	-0,45	-0,09	0,29	-0,50 *	0,22
SABG	0,08	0,23	-0,58 *	-0,22	-0,34	-0,36	-0,19	0,34	-0,28	-0,32	0,15	-0,18
ARGLIMF	0,34	0,52 *	-0,17	-0,51 *	-0,77 ***	-0,74 ***	-0,40	0,29	-0,09	0,00	0,87 ***	-0,50 *
PF25	0,13	0,32	-0,39	-0,43	-0,55 *	-0,57 *	-0,25	0,17	-0,21	-0,38	0,41	-0,31
PF42	0,37	0,53 *	-0,29	-0,45	-0,60 *	-0,61 **	-0,25	0,23	-0,16	-0,12	0,64 **	-0,36
DENS	0,13	0,05	-0,06	-0,13	0,04	0,02	0,07	0,48	0,31	0,51 *	0,17	0,08

Annexe 9 (suite)

d. Horizon 30-30 cm (suite)

	ARC	LIMF	LIMG	SABF	SABG	ARGLIMF	PF25	PF42	DENS
C	0,83 ***	0,26	-0,64 **	-0,36	-0,31	0,83 ***	0,54 *	0,83 ***	-0,18
N	0,89 ***	0,24	-0,65 **	-0,29	-0,34	0,89 ***	0,65 **	0,86 ***	0,01
P	-0,16	0,07	0,08	0,15	-0,48	-0,15	-0,28	-0,11	-0,42
CN	-0,30	-0,10	0,15	-0,02	0,03	-0,31	-0,43	-0,25	-0,47
PHH2O	-0,69 **	-0,41	0,46	0,61 **	0,09	-0,67 **	-0,42	-0,60 *	-0,14
PHKCL	-0,79 ***	-0,30	0,57 *	0,55 *	0,20	-0,77 ***	-0,67 **	-0,76 ***	-0,06
CA	-0,37	-0,39	0,25	0,34	0,19	-0,38	-0,11	-0,30	-0,21
MG	0,35	0,06	-0,29	-0,23	0,22	0,33	0,27	0,28	0,26
NA	0,08	0,10	0,00	-0,35	0,25	0,08	-0,02	0,05	-0,04
K	0,14	0,22	-0,26	-0,18	0,19	0,17	-0,04	0,11	0,40
CEC	0,93 ***	0,23	-0,62 **	-0,44	-0,31	0,93 ***	0,69 **	0,91 ***	0,11
S	-0,72 **	-0,25	0,47	0,38	0,32	-0,72 **	-0,44	-0,67 **	-0,14
ARG	1,00 ***	0,27	-0,65 **	-0,49 *	-0,35	0,99 ***	0,77 ***	0,96 ***	0,05
LIMF	0,27	1,00 ***	-0,19	-0,16	-0,21	0,32	0,19	0,22	0,41
LIMG	-0,65 **	-0,19	1,00 ***	-0,10	0,00	-0,68 **	-0,65 **	-0,77 ***	-0,05
SABF	-0,49 *	-0,16	-0,10	1,00 ***	-0,03	-0,44	-0,33	-0,33	-0,16
SABG	-0,35	-0,21	0,00	-0,03	1,00 ***	-0,34	-0,09	-0,29	0,42
ARGLIMF	0,99 ***	0,32	-0,68 **	-0,44	-0,34	1,00 ***	0,76 ***	0,96 ***	0,07
PF25	0,77 ***	0,19	-0,65 **	-0,33	-0,09	0,76 ***	1,00 ***	0,82 ***	0,10
PF42	0,96 ***	0,22	-0,77 ***	-0,33	-0,29	0,96 ***	0,82 ***	1,00 ***	-0,03
DENS	0,05	0,41	-0,05	-0,16	0,42	0,07	0,10	-0,03	1,00 ***

e. Horizon 0-40 cm (suite)

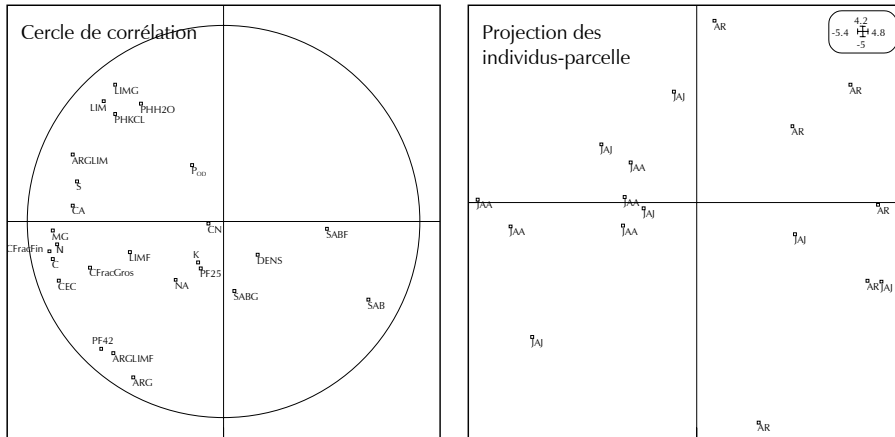
	ARC	LIMF	LIMG	SABF	SABG	ARGLIMF	PF25	PF42	DENS
C	0,29	0,19	-0,03	-0,20	0,08	0,34	0,13	0,37	0,13
N	0,46	0,21	-0,14	-0,33	0,23	0,52 *	0,32	0,53 *	0,05
P	-0,21	0,07	0,29	0,27	-0,58 *	-0,17	-0,39	-0,29	-0,06
CN	-0,46	0,00	0,23	0,33	-0,22	-0,51 *	-0,43	-0,45	-0,13
PHH2O	-0,76 ***	-0,31	0,37	0,51 *	-0,34	-0,77 ***	-0,55 *	-0,60 *	0,04
PHKCL	-0,76 ***	-0,27	0,43	0,49 *	-0,36	-0,74 ***	-0,57 *	-0,61 **	0,02
CA	-0,38	-0,35	0,24	0,25	-0,19	-0,40	-0,25	-0,25	0,07
MG	0,26	0,25	-0,09	-0,45	0,34	0,29	0,17	0,23	0,48
NA	-0,17	0,10	0,31	-0,09	-0,28	-0,09	-0,21	-0,16	0,31
K	-0,03	0,12	-0,23	0,29	-0,32	0,00	-0,38	-0,12	0,51 *
CEC	0,80 ***	0,27	-0,34	-0,50 *	0,15	0,87 ***	0,41	0,64 **	0,17
S	-0,50 *	-0,24	0,33	0,22	-0,18	-0,50 *	-0,31	-0,36	0,08
ARG	1,00 ***	0,06	-0,43	-0,55 *	0,30	0,96 ***	0,78 ***	0,91 ***	-0,06
LIMF	0,06	1,00 ***	0,10	-0,25	0,09	0,25	0,04	0,02	0,13
LIMG	-0,43	0,10	1,00 ***	-0,11	-0,55 *	-0,37	-0,30	-0,49 *	-0,16
SABF	-0,55 *	-0,25	-0,11	1,00 ***	-0,49 *	-0,62 **	-0,52 *	-0,45	0,02
SABG	0,30	0,09	-0,55 *	-0,49 *	1,00 ***	0,29	0,44	0,44	-0,14
ARGLIMF	0,96 ***	0,25	-0,37	-0,62 **	0,29	1,00 ***	0,74 ***	0,87 ***	0,02
PF25	0,78 ***	0,04	-0,30	-0,52 *	0,44	0,74 ***	1,00 ***	0,89 ***	-0,17
PF42	0,91 ***	0,02	-0,49 *	-0,45	0,44	0,87 ***	0,89 ***	1,00 ***	-0,16
DENS	-0,06	0,13	-0,16	0,02	-0,14	0,02	-0,17	-0,16	1,00 ***

a. Cercles de corrélation des variables et projection des individus - parcelles sur les plans CP 1x2 et 1x3 (la CP 1 est l'axe horizontal) (Codage des variables : voir p. A. 11).

Horizon 0-10 cm

Inertie relative : cp1 : 35% - cp2 : 16% - cp3 : 15%

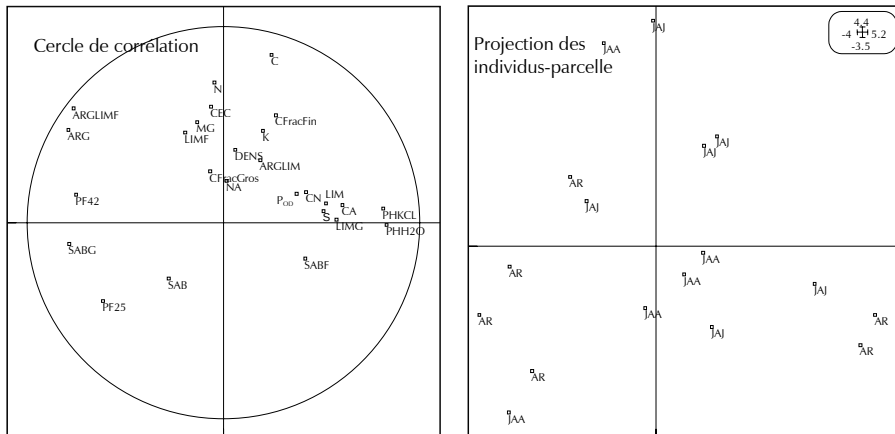
Axe 1-3



Horizon 10-20 cm

Inertie relative : cp1 : 24% - cp2 : 20% - cp3 : 15%

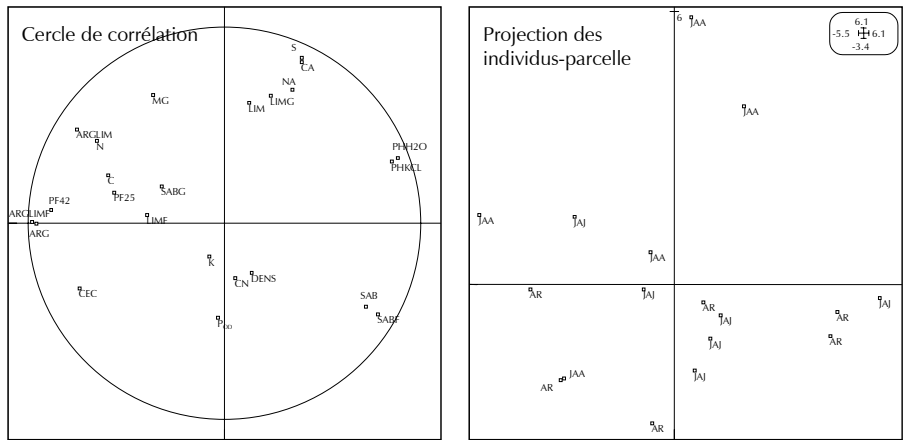
Axe 1-3



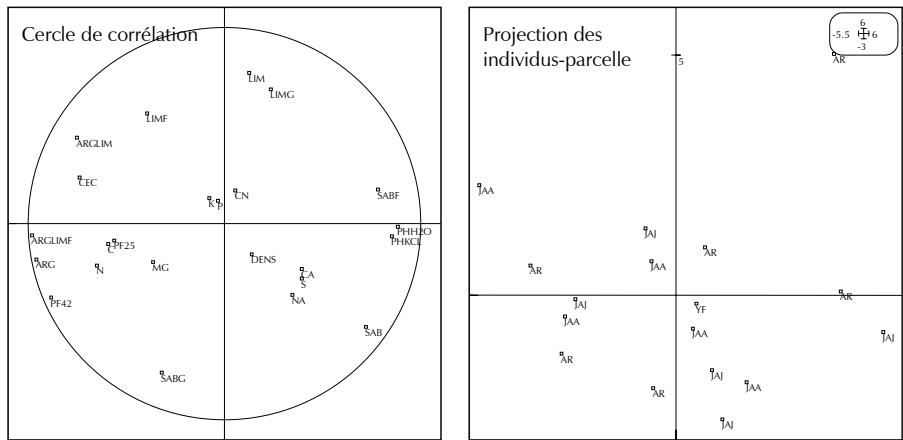
Horizon 20-30 cm

Inertie relative : cp1 : 35% - cp2 : 20% - cp3 : 13%

Axe 1-2



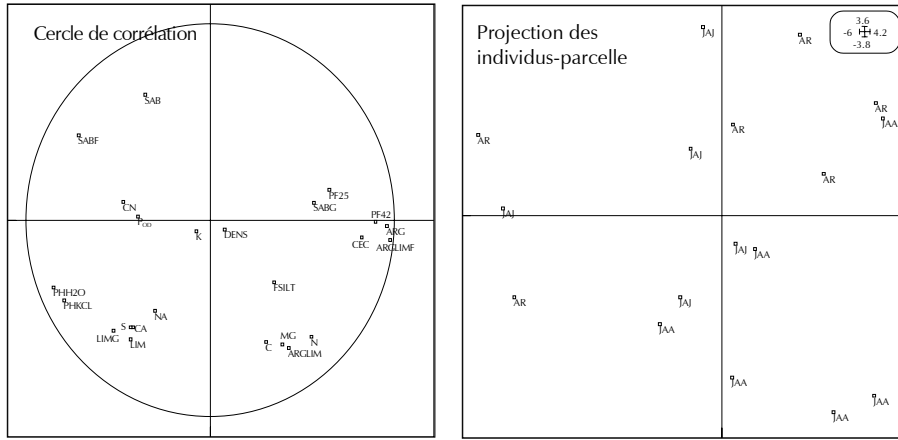
Axe 1-3



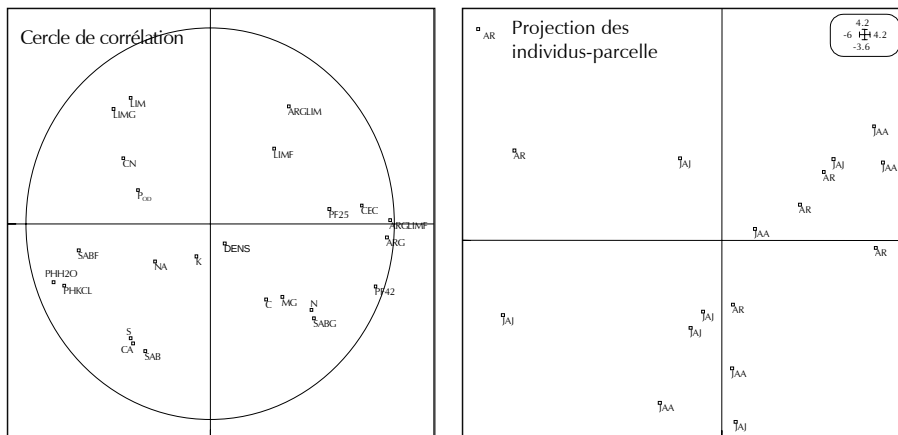
Horizon 0-40 cm

Inertie relative : cp1 : 34% - cp2 : 17% - cp3 : 15%

Axe 1-2



Axe 1-3



Annexe 10 (suite)

Codage des variables : ARG : argile. ARGLIM : argile+limon. ARGLIMF : argile+limon fin. C : carbone. CA : calcium. CFraFin : teneur en carbone de la fraction [0-50]µm. CFraGro : teneur en carbone de la fraction [50-2000] µm. CEC : capacité d'échange en cations. CN : rapport C/N. DENS : densité apparente. LIM : limon. LIMG : limon grossier. LIMF : limon fin. K : potassium. MG : magnésium. N : azote. NA : sodium. P : phosphore. PF25 et PF42 : humidité pondérale déterminée pour une succion équivalente à pF2,5 et pF4,2. PHH2O : pH eau. PHKCL : pH KCl. S : taux de saturation. SAB : sable. SABF : sable fin. SABG : sable grossier.

Codage des individus - parcelles : AR : culture d'arachide. JAJ : jachère jeune (0-9ans). JAA : jachère âgée de plus de 9 ans.

Données utilisées dans l'ACP en Annexe 11 et valeur propres en Annexe 10b.

Annexe 10 (suite) b. Valeurs propres.

Axe	Horizon (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
1	9,17	6,17	8,40	10,69	8,20
2	4,14	5,13	4,72	3,39	4,08
3	4,03	3,88	3,14	2,24	3,66
4	2,69	3,23	2,28	2,11	2,87
5	1,59	2,27	1,46	1,71	1,48
6	1,05	1,54	1,30	1,47	1,13
7	0,92	1,04	0,89	0,72	0,76
8	0,80	0,92	0,68	0,64	0,59
9	0,57	0,78	0,41	0,35	0,40
10	0,42	0,37	0,30	0,29	0,39
11	0,27	0,22	0,19	0,17	0,26
12	0,20	0,20	0,10	0,10	0,11
13	0,06	0,12	0,06	0,06	0,06
14	0,04	0,09	0,04	0,05	0,01
15	0,03	0,04	0,00	0,01	0,00
16	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Annexe 11 Propriétés des sols dans une chronoséquence de six parcelles d'arachide de l'aurole de brousse et de 11 parcelles de jachère.

a. Propriétés physiques

Parcelles	Horizon (cm)	Texture (%)					pF	pF	Densité apparente (kg dm ⁻³)	
		Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier			Echantillon total	Fract. (0-2mm)
AR01	0-10	5,8	4,4	25,8	8,9	53,6	98,5	11,2	3,2	1,47
	10-20	12,6	4,5	23,9	8,5	49,6	99,1	9,1	4,6	1,50
	20-30	19,4	4,6	17,3	11,6	47,1	100,0	8,7	6,4	1,50
	30-40	31,0	4,4	17,5	6,7	39,5	99,1	12,8	9,0	1,50
AR02	0-10	6,9	4,6	21,6	13,0	54,5	100,6	8,8	2,8	1,51
	10-20	14,6	4,8	22,4	8,6	51,0	101,4	8,2	4,5	1,35
	20-30	23,3	6,0	16,9	11,1	43,0	100,3	9,3	6,9	1,60
	30-40	37,4	5,3	15,9	8,3	34,1	101,0	12,9	10,7	1,41
AR03	0-10	11,2	6,0	17,7	23,8	42,6	101,3	5,9	4,0	1,54
	10-20	14,9	5,1	17,4	20,6	43,0	101,0	6,5	4,5	1,54
	20-30	16,3	5,2	24,0	19,5	35,8	100,8	6,8	5,0	1,50
	30-40	21,4	4,9	20,7	15,7	38,9	101,6	8,3	6,5	1,53
AR04	0-10	4,9	4,5	32,8	16,5	40,6	99,3	5,3	2,1	1,53
	10-20	9,2	4,4	38,4	10,7	36,3	99,0	5,5	2,9	1,39
	20-30	12,1	4,4	24,6	20,4	38,1	99,6	6,2	3,8	1,66
	30-40	14,6	4,0	33,0	9,7	38,2	99,5	7,2	4,7	1,31
AR05	0-10	5,3	4,5	30,9	11,1	47,0	98,8	5,4	2,5	1,52
	10-20	15,0	5,0	25,3	10,4	43,9	99,6	12,9	5,3	1,52
	20-30	24,3	4,3	24,5	7,7	39,4	100,2	15,4	7,3	1,50
	30-40	31,4	5,1	16,0	11,4	37,6	101,5	19,9	9,7	1,52
AR06	0-10	4,4	5,2	28,0	28,0	33,2	98,8	5,1	1,6	1,53
	10-20	7,0	5,6	31,1	22,8	31,9	98,4	5,9	2,4	1,51
	20-30	8,5	6,4	30,4	25,7	27,4	98,4	6,4	2,7	1,49
	30-40	10,0	6,7	32,2	21,5	30,0	100,4	7,0	3,2	1,46
JA1a	0-10	5,6	4,6	27,3	22,1	39,9	99,5	4,4	2,7	1,50
	10-20	8,5	4,4	23,5	21,2	41,5	99,1	5,1	3,8	1,54
	20-30	10,2	4,3	22,5	25,2	36,9	99,1	6,1	3,9	1,45
	30-40	12,5	4,9	31,2	14,6	36,7	99,9	6,6	4,9	1,48
JA1b	0-10	9,7	5,5	25,9	12,3	45,4	98,8	7,3	4,8	1,55
	10-20	11,4	4,7	19,3	20,5	42,9	98,8	6,4	4,5	1,54
	20-30	16,8	5,3	17,4	14,2	46,6	100,3	7,0	5,6	1,47
	30-40	29,7	5,9	8,8	16,7	38,3	99,4	11,5	9,4	1,46
JA1c	0-10	6,8	4,4	24,9	23,5	41,0	100,6	4,8	3,1	1,61
	10-20	10,3	3,7	22,2	21,3	42,1	99,6	5,2	3,7	1,50
	20-30	18,4	3,9	19,9	19,9	38,7	100,8	6,9	5,7	1,55
	30-40	29,2	5,2	15,8	13,8	36,3	100,3	11,7	8,6	1,51
JA2a	0-10	6,2	5,4	19,0	20,5	47,2	98,3	4,2	2,5	1,51
	10-20	12,4	5,8	17,7	17,4	46,8	100,1	5,4	4,2	1,56
	20-30	15,4	5,3	20,8	16,1	42,5	100,1	6,7	5,2	1,53
	30-40	18,4	5,6	15,9	15,0	45,9	100,8	7,0	6,2	1,56
JA4	0-10	6,1	6,3	28,4	14,4	43,4	98,6	4,4	2,8	1,46
	10-20	10,8	6,3	29,5	11,9	41,1	99,6	5,4	3,9	1,55
	20-30	19,0	5,5	24,5	10,7	40,3	100,0	6,2	4,8	1,49
	30-40	14,9	5,7	28,4	7,1	44,1	100,2	7,3	5,5	1,52
JA7a	0-10	7,8	6,2	34,1	7,2	44,1	99,4	4,6	2,6	1,47
	10-20	14,3	6,1	28,7	6,6	44,2	99,9	5,7	3,9	1,57
	20-30	21,3	5,0	24,5	7,9	41,4	100,1	8,0	5,9	1,54
	30-40	31,6	5,9	24,3	4,5	34,8	101,1	11,0	8,9	1,51
JA12	0-10	8,0	5,2	30,3	10,2	46,2	99,9	8,9	4,3	1,56
	10-20	10,8	4,9	24,4	16,2	43,8	100,1	8,2	4,7	1,51
	20-30	18,0	5,2	28,5	6,8	42,8	101,3	14,2	6,1	1,52
	30-40	25,2	5,4	18,3	11,3	39,6	99,8	13,6	8,4	1,55
JA13a	0-10	8,2	7,7	33,0	9,3	41,4	99,6	5,4	3,0	1,53
	10-20	14,4	7,5	26,3	10,0	42,3	100,5	6,7	4,2	1,48
	20-30	25,1	7,5	24,9	3,8	39,4	100,7	9,2	7,4	1,41
	30-40	32,8	7,2	19,0	4,8	36,7	100,5	11,1	9,1	1,64
JA17	0-10	8,4	5,8	30,0	8,0	47,7	99,9	8,2	4,4	1,45
	10-20	11,7	5,3	20,8	17,9	45,4	101,1	7,4	4,6	1,55
	20-30	14,3	4,4	26,2	7,6	48,6	101,1	7,0	5,5	1,45
	30-40	19,5	3,8	20,5	12,9	43,9	100,6	8,2	6,8	1,36
JA18a	0-10	6,0	7,7	29,1	6,3	49,9	99,0	4,5	2,9	1,51
	10-20	9,5	7,0	24,1	7,6	50,8	99,0	5,1	3,5	1,52
	20-30	16,2	7,0	24,4	5,7	46,6	99,9	6,9	5,3	1,51
	30-40	21,9	6,8	18,1	7,7	45,3	99,8	14,8	8,1	1,53
JA26	0-10	7,4	6,2	31,6	8,0	46,4	99,6	14,4	4,1	1,45
	10-20	11,1	5,9	19,5	16,4	47,8	100,7	15,2	4,4	1,51
	20-30	21,2	5,6	19,7	11,7	42,0	100,2	16,6	7,0	1,50
	30-40	37,4	6,1	13,7	10,5	32,9	100,6	19,1	11,8	1,42

elles de jachère est indiqué dans le code de la

Annexe 11 (suite)

b. Propriétés chimiques

Parcelles	Horizon (cm)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	C		C/N	P _{so} (x10 ⁻³ mg g ⁻¹)	Cations échangeables (meq 100g ⁻¹ de sol)				CEC	Taux de saturation
				(mg g ⁻¹)	(mg g ⁻¹)			Ca	Mg	Na	K		
AR01	0-10	5,87	4,96	3,93	0,33	11,90	1,70	0,96	0,28	0,00	0,02	1,96	64
	10-20	5,24	4,37	3,19	0,30	10,63	1,90	0,65	0,35	0,00	0,02	2,28	45
	20-30	4,90	4,15	3,09	0,26	11,87	2,00	0,49	0,37	0,00	0,02	2,48	35
	30-40	4,67	4,00	3,87	0,33	11,73	1,30	0,54	0,44	0,01	0,03	3,40	30
AR02	0-10	5,82	4,99	4,40	0,38	11,58	2,30	1,05	0,31	0,00	0,04	2,32	60
	10-20	5,23	4,36	3,30	0,36	9,15	1,10	0,83	0,33	0,00	0,04	2,64	46
	20-30	4,88	4,10	3,55	0,35	10,14	2,00	0,90	0,44	0,00	0,05	3,04	46
	30-40	4,75	4,01	4,12	0,40	10,30	1,90	1,00	0,52	0,01	0,04	3,92	40
AR03	0-10	5,66	4,99	5,07	0,41	12,37	2,40	1,47	0,48	0,02	0,04	2,68	75
	10-20	5,44	4,65	4,28	0,35	12,22	1,40	1,19	0,49	0,00	0,05	2,80	62
	20-30	5,32	4,54	3,40	0,32	10,62	0,80	1,11	0,46	0,00	0,04	2,76	58
	30-40	5,23	4,46	3,41	0,35	9,73	1,20	1,12	0,51	0,01	0,03	2,96	56
AR04	0-10	6,24	5,71	5,02	0,37	13,56	2,90	1,78	0,43	0,00	0,05	2,48	91
	10-20	5,99	5,37	3,75	0,32	11,73	2,00	1,75	0,27	0,00	0,03	2,32	89
	20-30	5,86	5,17	3,30	0,27	12,20	1,60	1,48	0,28	0,02	0,03	2,56	70
	30-40	5,79	5,09	2,85	0,25	11,41	1,60	1,58	0,30	0,04	0,03	2,00	97
AR05	0-10	5,89	5,04	4,20	0,35	12,00	2,60	1,56	0,34	0,03	0,04	2,24	88
	10-20	5,10	4,27	3,77	0,31	12,15	1,90	0,70	0,24	0,00	0,04	2,44	40
	20-30	4,88	4,11	3,92	0,35	11,21	1,70	1,00	0,35	0,00	0,03	3,04	46
	30-40	5,41	4,06	3,60	0,37	9,73	1,10	0,99	0,43	0,01	0,04	3,68	40
AR06	0-10	6,02	5,22	4,31	0,29	14,87	3,20	1,12	0,34	0,02	0,04	2,20	69
	10-20	5,64	4,76	3,70	0,24	15,41	2,50	1,20	0,25	0,01	0,05	2,44	62
	20-30	5,52	4,59	2,66	0,23	11,55	2,30	1,00	0,22	0,00	0,03	2,32	54
	30-40	5,36	4,44	2,55	0,22	11,61	2,00	0,92	0,22	0,00	0,02	1,76	66
JA1a	0-10	6,22	5,65	5,82	0,58	10,03	4,70	2,03	0,48	0,00	0,05	2,34	109
	10-20	6,18	5,54	4,20	0,37	11,51	2,90	2,05	0,30	0,02	0,05	2,34	103
	20-30	5,91	5,18	3,02	0,31	9,75	2,30	1,71	0,23	0,02	0,05	1,94	104
	30-40	5,75	5,11	2,48	0,23	10,80	3,30	1,63	0,22	0,00	0,03	2,10	90
JA1b	0-10	6,02	5,22	7,42	0,58	12,70	3,70	2,19	0,50	0,05	0,09	2,86	99
	10-20	5,86	5,15	4,90	0,43	11,54	2,60	1,78	0,39	0,01	0,07	2,54	88
	20-30	5,51	4,74	3,90	0,34	11,47	2,10	1,45	0,36	0,02	0,04	2,30	81
	30-40	5,16	4,36	4,12	0,39	10,57	2,20	1,50	0,52	0,05	0,04	3,30	64
JA1c	0-10	5,82	5,19	5,09	0,40	12,72	2,90	1,37	0,43	0,01	0,08	2,22	85
	10-20	5,64	4,83	3,91	0,32	12,22	2,60	1,02	0,40	0,01	0,07	2,14	70
	20-30	5,35	4,46	3,67	0,32	11,67	2,00	0,93	0,57	0,02	0,06	2,42	65
	30-40	5,05	4,22	4,00	0,39	10,40	2,50	1,10	0,70	0,03	0,07	3,18	60
JA2a	0-10	5,78	4,99	4,40	0,37	11,88	2,30	1,00	0,38	0,00	0,06	2,40	60
	10-20	5,39	4,60	4,34	0,33	13,17	1,40	0,84	0,43	0,02	0,06	2,48	55
	20-30	5,22	4,42	3,25	0,28	11,61	0,90	0,78	0,51	0,00	0,06	3,04	45
	30-40	5,08	4,30	3,01	0,27	11,14	0,80	0,73	0,47	0,00	0,05	2,64	47
JA4	0-10	5,91	5,21	6,96	0,46	15,12	2,80	1,29	0,50	0,03	0,06	2,68	70
	10-20	5,59	4,86	4,27	0,35	12,19	2,20	1,01	0,50	0,00	0,07	2,64	59
	20-30	5,28	4,54	4,36	0,32	13,61	1,50	0,90	0,48	0,01	0,07	2,80	52
	30-40	5,02	4,29	3,77	0,28	13,46	2,00	0,86	0,44	0,04	0,05	2,78	50
JA7a	0-10	5,86	5,17	5,35	0,54	9,90	2,70	1,71	0,60	0,00	0,04	2,74	86
	10-20	5,46	4,71	5,29	0,40	13,22	2,50	1,04	0,66	0,00	0,03	2,50	69
	20-30	5,20	4,41	4,95	0,42	11,78	2,10	0,97	0,70	0,02	0,03	2,94	59
	30-40	4,81	4,11	4,01	0,39	10,29	1,20	0,92	0,68	0,02	0,04	3,62	46
JA12	0-10	6,21	5,57	7,49	0,54	13,88	2,20	2,10	0,69	0,03	0,04	2,86	100
	10-20	5,94	5,29	3,58	0,38	9,43	0,70	2,17	0,71	0,00	0,04	2,34	125
	20-30	5,56	4,80	3,45	0,35	9,85	0,70	3,28	0,67	0,03	0,03	2,14	187
	30-40	5,30	4,51	3,11	0,37	8,42	0,50	1,92	0,59	0,00	0,02	2,62	97
JA13a	0-10	5,79	5,13	4,82	0,47	10,25	2,00	1,22	0,65	0,00	0,08	2,62	74
	10-20	5,42	4,62	4,24	0,39	10,88	2,50	0,95	0,65	0,04	0,07	2,58	67
	20-30	4,95	4,19	4,16	0,39	10,68	2,10	0,90	0,58	0,01	0,06	3,06	51
	30-40	4,74	4,07	4,00	0,38	10,53	1,30	0,89	0,56	0,03	0,05	3,66	42
JA17	0-10	6,10	5,56	7,27	0,51	14,26	2,30	3,40	0,60	0,00	0,03	2,82	143
	10-20	5,95	5,24	4,02	0,36	11,16	1,00	2,70	0,63	0,01	0,02	2,10	160
	20-30	5,52	4,66	3,44	0,32	10,76	0,80	2,70	0,71	0,02	0,02	2,10	164
	30-40	5,12	4,34	3,74	0,30	12,47	0,90	1,82	0,68	0,02	0,03	2,22	115
JA18a	0-10	6,06	5,32	5,25	0,51	10,30	2,80	1,63	0,64	0,01	0,04	2,54	91
	10-20	5,65	4,88	3,57	0,32	11,14	2,30	0,80	0,60	0,00	0,03	1,82	79
	20-30	5,12	4,32	3,10	0,29	10,68	1,20	0,62	0,65	0,01	0,03	2,38	55
	30-40	4,84	4,08	3,22	0,32	10,07	1,20	1,36	0,55	0,03	0,04	2,78	71
JA26	0-10	5,74	5,05	5,96	0,46	12,95	2,60	1,37	0,62	0,00	0,03	2,42	84
	10-20	5,33	4,36	3,36	0,30	11,19	2,20	0,46	0,43	0,02	0,02	1,90	49
	20-30	4,70	4,02	3,40	0,33	10,29	1,70	0,23	0,29	0,00	0,02	2,70	20
	30-40	4,50	3,85	4,49	0,38	11,82	1,30	0,19	0,23	0,00	0,02	3,66	12

JA = jachère ; AR =arachide. L'âge des parcelles de jachère est dans le code de la parcelle

Annexe 12 Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore dans le système plante-sol à trois étapes principales de la succession culture-jachère.

	Stock total		
	Ch. d'arachide	Jachère jeune	Jachère âgée
C (t ha⁻¹)			
Plante	5,5	17,7	29,0
Sol 0-20 cm fraction fine	9,9	11,6	11,3
Sol 0-20 cm fraction grossière	2,2	4,2	3,6
Sol 20-40 cm	10,1	11,2	10,7
Total	27,8	44,6	54,7
N (kg ha⁻¹)			
Plante	106	231	333
Sol 0-20 cm	996	1304	1277
Sol 20-40 cm	924	985	1023
Total	2026	2520	2633
P (kg ha⁻¹)			
Plante	5,9	19,6	33,8
Sol 0-20 cm (OD)	6,5	8,5	6,2
Sol 20-40 cm (OD)	4,9	5,7	3,5
Total	17,3	33,8	43,5

Jachère jeune : âgée de 0 à 9ans. Jachère âgée : de plus de 9 ans.

OD : phosphore assimilable (sol) mesuré selon la méthode de Olsen modifiée par Dabin (1967).

Annexe 13 Stockage dans le sol du carbone, de l'azote et du phosphore assimilable (P_{OD}) dans une chronoséquence de six parcelles de culture d'arachide (AR) de l'auréole de brousse et de 11 parcelles de jachère (JA).

Parcelle	Stock (à profondeur de sol équivalente) par horizon en cm				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
Stock de C ($t\ ha^{-1}$)					
AR01	5,78	4,79	4,63	5,80	21,00
AR02	6,65	4,43	5,67	5,80	22,56
AR03	7,80	6,57	5,10	5,14	24,61
AR04	7,66	5,22	5,48	3,75	22,10
AR05	6,37	5,71	5,89	5,46	23,42
AR06	6,58	5,56	3,97	3,74	19,85
JA1a	8,71	6,49	4,40	3,68	23,28
JA1b	11,39	7,55	5,75	6,02	30,70
JA1c	8,20	5,87	5,67	6,02	25,76
JA2a	6,62	6,79	4,95	4,67	23,03
JA4	10,17	6,58	6,51	5,74	29,00
JA7a	7,83	8,29	7,60	6,04	29,76
JA12	11,66	5,42	5,25	4,84	27,18
JA13a	7,40	6,25	5,88	6,59	26,12
JA17	10,57	6,25	4,97	5,11	26,90
JA18a	7,82	5,43	4,67	4,94	22,85
JA26	8,58	5,08	5,11	6,38	25,15
Stock de N ($kg\ ha^{-1}$)					
AR01	485	451	390	495	1821
AR02	574	484	559	564	2182
AR03	631	538	480	528	2177
AR04	565	445	449	328	1787
AR05	530	470	525	561	2086
AR06	442	361	344	322	1469
JA1a	866	564	452	341	2223
JA1b	896	654	501	569	2621
JA1c	645	480	485	579	2189
JA2a	558	515	426	420	1920
JA4	671	541	478	427	2117
JA7a	793	627	645	588	2654
JA12	841	574	534	575	2523
JA13a	721	576	551	623	2469
JA17	741	558	462	409	2170
JA18a	767	488	438	490	2182
JA26	669	454	494	539	2156
Stock de P_{OD} ($kg\ ha^{-1}$)					
AR01	2,5	2,9	3,0	1,9	10,3
AR02	3,5	1,5	3,2	2,7	10,8
AR03	3,7	2,2	1,2	1,8	8,9
AR04	4,4	2,8	2,7	2,1	12,0
AR05	3,9	2,9	2,5	1,7	11,0
AR06	4,9	3,8	3,4	2,9	15,0
JA1a	7,1	4,5	3,3	4,9	19,8
JA1b	5,7	4,0	3,1	3,2	16,0
JA1c	4,7	3,9	3,1	3,8	15,4
JA2a	3,5	2,2	1,4	1,2	8,3
JA4	4,1	3,4	2,2	3,0	12,8
JA7a	4,0	3,9	3,2	1,8	12,9
JA12	3,4	1,1	1,1	0,8	6,3
JA13a	3,1	3,7	3,0	2,1	11,9
JA17	3,3	1,5	1,2	1,2	7,3
JA18a	4,2	3,5	1,8	1,8	11,4
JA26	3,8	3,3	2,5	1,8	11,5

L'âge des parcelles de jachère est mentionné dans le code de la parcelle.

Annexe 14 Stockage du carbone ($t\ ha^{-1}$) dans deux fractions du sol dans une chronoséquence de six parcelles d'arachide (AR) de l'auréole de brousse et de 11 parcelles de jachère (JA).

Fraction	[0-50] μm		[50-2000] μm	
	Horizon (cm)		Horizon (cm)	
Parcelle	0-10	10-20	0-10	10-20
AR1	4,87	4,90	1,71	0,67
AR2	6,39	4,81	1,27	0,41
AR3	5,04	4,91	1,26	0,81
AR4	4,57	4,54	1,21	0,20
AR5	4,99	3,27	1,64	1,17
AR6	6,11	5,16	1,70	1,42
JA1a	6,00	3,89	2,71	2,60
JA1b	8,30	7,29	3,09	0,26
JA1c	5,49	4,33	2,72	1,54
JA2a	4,89	5,18	1,73	1,60
JA4	7,59	4,27	2,58	2,30
JA7a	5,96	6,05	1,87	2,24
JA12	8,62	4,01	3,05	1,40
JA13a	5,64	4,73	1,76	1,53
JA17	8,09	6,05	2,48	0,20
JA18a	5,98	3,95	1,84	1,48
JA26	6,23	3,16	2,34	1,92

L'âge des parcelles de jachère est mentionné dans le code de la parcelle

*Annexe 15 Dynamique de décomposition des racines de *Combretum glutinosum* Perr. (en % de la biomasse initiale restante) après la défriche d'une jachère de 15 ans selon des mesures réalisées pendant une expérience avec des sachets de décomposition.*

Temps d'incubation (en mois)	Diamètre des racines (mm)		
	0-2	2-5	5-10
0	100,0	100,0	100,0
6	35,7 $\pm$ 3.5	43,7 $\pm$ 4.8	56,1 $\pm$ 4.8
12	25,5 $\pm$ 3.1	26,5 $\pm$ 4.6	30,6 $\pm$ 6.4
18	14,0 $\pm$ 4.7	15,0 $\pm$ 5.3	9,6 $\pm$ 4.9
24	7,8 $\pm$ 1.7	4,0 $\pm$ 1.4	6,8 $\pm$ 2.3

$\pm$: erreur type ; $n=20$.

Annexe 16 Stocks restants de matière sèche, carbone, azote et phosphore issus du compartiment racinaire en décomposition après la défriche d'une jachère jeune (JAJ) et d'une jachère âgée (JAA) (souches retirées).

	Temps après la coupe (mois)				
	0	6	12	18	24
Matière sèche (t ha⁻¹)					
Jachère jeune	8,7	4,7	2,3	0,8	0,5
Jachère âgée	20,5	11,2	5,4	2,0	1,3
Carbone (t ha⁻¹)					
Jachère jeune	3,2	1,7	0,8	0,3	0,2
Jachère âgée	7,4	4,0	2,0	0,7	0,5
Azote (kg ha⁻¹)					
Jachère jeune	42	22	11	4	3
Jachère âgée	91	47	24	9	6
Phosphore (kg ha⁻¹)					
Jachère jeune	2,4	1,2	0,6	0,2	0,2
Jachère âgée	7,6	4,1	2,0	0,7	0,5

CHAPITRE 3

Annexe 17 Teneur en carbone, en azote et en phosphore des composantes de la biomasse d'arachide (AR), de mil (MI), de maïs (MA) et de riz (RI).

Parcelle	Epi	Paille	Adventices ligneuses et herbacées	Racines	
	/gousse	/tige		fine	épaisse
Carbone (g 100g ⁻¹ MS)					
AR01	46,6	33,2	35,6	34,6	38,0 ⁺
AR02	45,9	34,0	35,2	35,4	38,0 ⁺
AR03	45,9	33,8	35,9	33,9	38,0 ⁺
AR04	44,3	34,1	37,1	34,2	38,0 ⁺
AR05	41,9	32,9	35,5	31,7	38,0 ⁺
AR06	46,7	33,6	35,0	35,0	38,0
MI01	34,9	36,6	35,9	32,8	32,8 [‡]
MI02	35,3	37,9	35,2	36,2	36,2 [‡]
MI03	35,3	35,5	34,6	34,3	34,3 [‡]
MI04	35,6	38,1	35,2	37,3	37,3 [‡]
MA01	35,9	35,4	24,8	33,4	33,4 [‡]
MA02	35,2	34,8	27,9	35,5	35,5 [‡]
RI01	33,2	31,9	32,7	30,0	30,0 [‡]
RI02	31,2	29,6	32,6	29,6	29,6 [‡]
Azote (g 100g ⁻¹ MS)					
AR01	3,09	1,65	0,85	1,74	0,35 ⁺
AR02	2,72	1,54	0,84	1,56	0,35 ⁺
AR03	2,51	1,91	0,75	1,61	0,35 ⁺
AR04	2,78	1,56	0,61	1,73	0,35 ⁺
AR05	3,12	1,78	1,02	1,65	0,35 ⁺
AR06	3,02	1,74	0,89	1,66	0,35 ⁺
MI01	1,43	0,29	1,10	0,99	0,99 [‡]
MI02	0,98	0,20	1,30	1,00	1,00 [‡]
MI03	1,23	0,32	1,50	1,14	1,14 [‡]
MI04	1,29	0,27	1,30	1,01	1,01 [‡]
MA01	1,02	0,81	1,47	1,39	1,39 [‡]
MA02	1,39	0,79	1,68	1,23	1,23 [‡]
RI01	0,67	0,42	0,92	0,83	0,83 [‡]
RI02	0,58	0,39	0,90	0,69	0,69 [‡]
Phosphore (g 100g ⁻¹ MS)					
AR01	0,19	0,07	0,05	0,06	0,02 ⁺
AR02	0,15	0,09	0,07	0,06	0,02 ⁺
AR03	0,19	0,09	0,05	0,06	0,02 ⁺
AR04	0,17	0,08	0,06	0,09	0,02 ⁺
AR05	0,18	0,09	0,07	0,06	0,02 ⁺
AR06	0,16	0,08	0,08	0,09	0,02 ⁺
MI01	0,27	0,06	0,25	0,08	0,08 [‡]
MI02	0,25	0,06	0,19	0,06	0,06 [‡]
MI03	0,24	0,08	0,12	0,07	0,07 [‡]
MI04	0,20	0,07	0,19	0,08	0,08 [‡]
MA01	0,25	0,21	0,36	0,08	0,08 [‡]
MA02	0,15	0,18	0,41	0,07	0,07 [‡]
RI01	0,09	0,08	0,19	0,06	0,06 [‡]
RI02	0,18	0,11	0,23	0,05	0,05 [‡]

⁺ : estimé selon la valeur moyenne mesurée sur la biomasse de racines épaisses de trois jachères d'un an (voir la Partie I)

[‡] : valeur extrapolée à partir de la teneur des racines fines.

Racines fines : diamètre de 0 à 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises)

Annexe 18 Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore dans la biomasse végétale des principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique de Sare Yorobana, au sud du Sénégal.

Parcelle	Epi	Paille	Adventices ligneuses et herbacées	Racines fines par horizon en cm					Racines
	/gousse	/ tige		0-10	10-20	20-30	30-40	0-40	épaisses
Carbone (t ha ⁻¹)									
AR01	0,31	0,50	0,12	0,07	0,05	0,04	0,02	0,18	1,97
AR02	0,54	0,63	0,14	0,07	0,06	0,03	0,02	0,19	1,15
AR03	0,34	0,39	0,27	0,08	0,05	0,04	0,03	0,21	1,19
AR04	0,55	0,60	0,61	0,11	0,06	0,04	0,02	0,23	1,14
AR05	0,28	0,39	0,41	0,07	0,03	0,03	0,02	0,14	1,12
AR06	0,52	0,51	0,29	0,10	0,06	0,03	0,02	0,22	1,15
MI01	0,49	1,61	0,10	0,11	0,06	0,03	0,03	0,23	0,08
MI02	0,65	2,38	0,14	0,12	0,08	0,04	0,03	0,28	0,04
MI03	0,86	3,48	0,46	0,18	0,11	0,05	0,03	0,37	0,01
MI04	0,87	3,67	0,45	0,26	0,09	0,02	0,03	0,40	0,27
MA01	1,31	1,67	0,34	0,05	0,02	0,02	0,01	0,10	0,00
MA02	1,97	1,81	0,27	0,06	0,02	0,02	0,02	0,12	0,01
RI01	0,43	0,69	0,03	0,88	0,26	0,10	0,08	1,31	0,03
RI02	1,44	1,32	0,13	0,46	0,11	0,04	0,03	0,65	0,01
Azote (kg ha ⁻¹)									
AR01	20,5	25,0	2,8	3,4	2,6	1,9	1,1	9,1	17,9
AR02	32,2	28,6	3,3	3,1	2,7	1,5	1,0	8,3	10,5
AR03	18,4	21,9	5,6	4,0	2,6	2,0	1,3	9,8	10,8
AR04	34,5	27,3	10,1	5,7	3,1	1,9	1,1	11,9	10,4
AR05	21,0	21,0	11,6	3,4	1,6	1,3	0,9	7,2	10,2
AR06	33,9	26,3	7,3	4,9	2,9	1,6	1,1	10,5	10,5
MI01	20,2	12,7	3,0	3,2	1,9	0,8	1,1	6,9	2,3
MI02	18,2	12,6	5,1	3,4	2,3	1,2	0,9	7,8	1,0
MI03	30,0	31,4	19,8	6,0	3,6	1,8	1,0	12,4	0,4
MI04	31,5	26,0	16,8	7,1	2,4	0,7	0,7	10,9	7,4
MA01	37,3	38,1	20,2	2,2	0,6	0,7	0,6	4,1	0,2
MA02	78,0	41,2	16,4	2,1	0,8	0,7	0,6	4,2	0,4
RI01	8,7	9,1	0,8	24,2	7,2	2,7	2,2	36,3	0,9
RI02	26,7	17,4	3,6	10,7	2,5	1,0	0,8	15,0	0,2
Phosphore (kg ha ⁻¹)									
AR01	1,26	1,06	0,16	0,12	0,09	0,07	0,04	0,31	1,04
AR02	1,78	1,67	0,27	0,12	0,10	0,06	0,04	0,32	0,60
AR03	1,39	1,03	0,37	0,15	0,10	0,07	0,05	0,37	0,63
AR04	2,11	1,40	0,93	0,30	0,16	0,10	0,06	0,62	0,60
AR05	1,21	1,06	0,75	0,12	0,06	0,05	0,03	0,26	0,59
AR06	1,80	1,21	0,64	0,26	0,16	0,09	0,06	0,57	0,61
MI01	3,81	2,63	0,68	0,26	0,15	0,06	0,09	0,56	0,19
MI02	4,63	3,77	0,72	0,21	0,14	0,07	0,05	0,47	0,06
MI03	5,83	7,86	1,58	0,37	0,22	0,11	0,06	0,76	0,02
MI04	4,88	6,73	2,39	0,56	0,19	0,05	0,06	0,86	0,59
MA01	9,14	9,89	4,95	0,13	0,04	0,04	0,03	0,24	0,01
MA02	8,41	9,38	3,99	0,12	0,04	0,04	0,04	0,24	0,02
RI01	1,17	1,73	0,17	1,75	0,52	0,20	0,16	2,63	0,06
RI02	8,30	4,90	0,92	0,78	0,18	0,07	0,06	1,09	0,02

AR : arachide. MI : mil. MA : maïs. RI : riz.

Racines fines : diamètre de 0 à 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises)

Annexe 19 Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore dans le sol des principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique de Sare Yorobana (exprimé en profondeur équivalente de sol).

Parcelle	Stock (à profondeur de sol équivalente) par horizon en cm				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
Carbone (t ha⁻¹)					
AR01	5,78	4,79	4,63	5,80	21,0
AR02	6,65	4,43	5,67	5,80	22,6
AR03	7,80	6,57	5,10	5,14	24,6
AR04	7,66	1,76	5,48	3,75	22,1
AR05	6,37	5,71	5,89	5,46	23,4
AR06	6,58	5,56	3,97	3,74	19,8
MI01	10,83	5,25	4,05	4,60	24,7
MI02	7,85	5,54	4,36	3,47	21,2
MI03	9,53	5,81	3,77	4,69	23,8
MI04	8,56	5,85	4,09	4,34	22,8
MA01	12,40	5,78	3,53	3,28	25,0
MA02	17,16	10,23	5,72	4,10	37,2
RI01	20,13	15,56	12,61	11,28	59,6
RI02	26,25	20,53	17,39	13,60	77,8
Azote (kg ha⁻¹)					
AR01	485	451	390	495	1821
AR02	574	484	559	564	2182
AR03	631	538	480	528	2177
AR04	565	445	449	328	1787
AR05	530	470	525	561	2086
AR06	442	361	344	322	1469
MI01	807	461	394	495	2157
MI02	601	399	275	292	1568
MI03	768	491	466	498	2223
MI04	747	442	375	347	1910
MA01	1135	510	305	282	2233
MA02	1618	810	440	325	3193
RI01	1642	1101	668	493	3905
RI02	2519	2329	2010	1442	8300
Phosphore (assimilable) (kg ha⁻¹)					
AR01	2,5	2,9	3,0	1,9	10,3
AR02	3,5	1,5	3,2	2,7	10,8
AR03	3,7	2,2	1,2	1,8	8,9
AR04	4,4	2,8	2,7	2,1	12,0
AR05	3,9	2,9	2,5	1,7	11,0
AR06	4,9	3,8	3,4	2,9	15,0
MI01	14,6	12,5	12,9	19,3	59,3
MI02	5,1	4,6	3,5	3,2	16,5
MI03	8,6	6,1	4,5	4,4	23,6
MI04	15,6	11,0	9,7	5,8	42,2
MA01	33,2	20,7	18,9	20,4	93,3
MA02	65,0	47,2	30,5	24,5	167,2
RI01	13,9	12,4	8,4	6,3	41,0
RI02	19,7	66,4	87,0	59,2	232,3

AR : arachide. MI : mil. MA : maïs. RI : riz.

Annexe 20 Corrélation de Spearman entre les propriétés physiques et chimiques des sols des principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique de Sare Yorobana pour les horizons a. 0-10 cm, b. 10-20 cm, c. 20-30 cm, d. 30-40 cm, e. 0-40 cm.

Codage des variables : ARG : argile. ARGLIM : argile+limon. ARGLIMF : argile+limon fin. C : carbone. CA : calcium. CFraFin : teneur en carbone de la fraction [0-50]µm. CFraGro : teneur en carbone de la fraction [50-2000] µm. CEC : capacité d'échange en cations. CN : rapport C/N. DENS : densité apparente. LIM : limon. LIMG : limon grossier. LIMF : limon fin. K : potassium. MG : magnésium. N : azote. NA : sodium. P : phosphore. PF25 et PF42 : humidité pondérale déterminée pour une succion équivalente à pF2,5 et pF4,2. PHH2O : pH eau. PHKCL : pH KCl. S : taux de saturation. SAB : sable. SABF : sable fin. SABG : sable grossier.

a. Horizon 0-10 cm

	C	CFRAFIN	CFRAGRO	N	P	CN	PHH2O	PHKCL	CA	MG	NA	K
C	1,00 ***	0,90 ***	0,87 ***	0,95 ***	0,89 ***	-0,34	0,77 **	0,82 **	0,88 ***	0,92 ***	-0,51	0,88 ***
CFRAFIN	0,90 ***	1,00 ***	0,62 *	0,83 ***	0,86 ***	-0,27	0,70 *	0,78 **	0,98 ***	0,84 ***	-0,51	0,92 ***
CFRAGRO	0,87 ***	0,62 *	1,00 ***	0,79 **	0,81 **	-0,20	0,73 **	0,75 **	0,66 *	0,82 **	-0,29	0,72 **
N	0,95 ***	0,83 ***	0,79 **	1,00 ***	0,79 **	-0,53	0,64 *	0,67 *	0,79 **	0,84 ***	-0,42	0,80 **
P	0,89 ***	0,86 ***	0,81 **	0,79 **	1,00 ***	-0,29	0,86 ***	0,87 ***	0,90 ***	0,91 ***	-0,37	0,98 ***
CN	-0,34	-0,27	-0,20	-0,53	-0,29	1,00 ***	-0,13	-0,09	-0,23	-0,31	0,19	-0,31
PHH2O	0,77 **	0,70 *	0,73 **	0,64 *	0,86 ***	-0,13	1,00 ***	0,95 ***	0,78 **	0,85 ***	-0,55	0,83 ***
PHKCL	0,82 **	0,78 **	0,75 **	0,67 *	0,87 ***	-0,09	0,95 ***	1,00 ***	0,85 ***	0,88 ***	-0,61 *	0,84 ***
CA	0,88 ***	0,98 ***	0,66 *	0,79 **	0,90 ***	-0,23	0,78 **	0,85 ***	1,00 ***	0,85 ***	-0,48	0,94 ***
MG	0,92 ***	0,84 ***	0,82 **	0,84 ***	0,91 ***	-0,31	0,85 ***	0,88 ***	0,85 ***	1,00 ***	-0,45	0,90 ***
NA	-0,51	-0,51	-0,29	-0,42	-0,37	0,19	-0,55	-0,61 *	-0,48	-0,45	1,00 ***	-0,38
K	0,88 ***	0,92 ***	0,72 **	0,80 **	0,98 ***	-0,31	0,83 ***	0,84 ***	0,94 ***	0,90 ***	-0,38	1,00 ***
CEC	0,97 ***	0,94 ***	0,75 **	0,95 ***	0,85 ***	-0,41	0,65 *	0,74 **	0,91 ***	0,86 ***	-0,46	0,87 ***
S	0,73 **	0,80 **	0,57	0,62 *	0,78 **	-0,03	0,83 ***	0,80 **	0,80 **	0,85 ***	-0,42	0,83 ***
ARG	0,00	-0,01	-0,21	0,19	-0,23	-0,58 *	-0,47	-0,44	-0,14	-0,16	0,01	-0,19
LIMF	0,05	0,07	0,04	0,13	0,11	-0,24	-0,30	-0,23	-0,02	0,08	0,39	0,14
LIMG	0,01	0,36	-0,09	-0,14	0,29	0,22	0,28	0,36	0,44	0,12	-0,13	0,35
SABF	0,27	0,13	0,36	0,22	0,34	0,02	0,06	0,14	0,12	0,35	0,30	0,28
SABG	-0,24	-0,32	-0,24	-0,15	-0,48	-0,05	-0,16	-0,27	-0,35	-0,38	-0,25	-0,46
ARCLIMF	0,08	0,04	-0,03	0,30	-0,05	-0,71 *	-0,42	-0,41	-0,08	-0,01	0,26	-0,02
PF25	-0,13	-0,09	-0,29	0,04	-0,30	-0,44	-0,44	-0,52	-0,24	-0,26	-0,04	-0,22
PF42	0,22	0,21	0,04	0,41	0,04	-0,79 **	-0,21	-0,18	0,12	0,13	-0,04	0,08
DENS	-0,35	-0,26	-0,29	-0,47	-0,47	0,70 *	-0,40	-0,25	-0,24	-0,41	0,11	-0,49

	CEC	S	ARG	LIMF	LIMG	SABF	SABG	ARCLIMF	PF25	PF42	DENS
C	0,97 ***	0,73 **	0,00	0,05	0,01	0,27	-0,24	0,08	-0,13	0,22	-0,35
CFRAFIN	0,94 ***	0,80 **	-0,01	0,07	0,36	0,13	-0,32	0,04	-0,09	0,21	-0,26
CFRAGRO	0,75 **	0,57	-0,21	0,04	-0,09	0,36	-0,24	-0,03	-0,29	0,04	-0,29
N	0,95 ***	0,62 *	0,19	0,13	-0,14	0,22	-0,15	0,30	0,04	0,41	-0,47
P	0,85 ***	0,78 **	-0,23	0,11	0,29	0,34	-0,48	-0,05	-0,30	0,04	-0,47
CN	-0,41	-0,03	-0,58 *	-0,24	0,22	0,02	-0,05	-0,71 *	-0,44	-0,79 **	0,70 *
PHH2O	0,65 *	0,83 ***	-0,47	-0,30	0,28	0,06	-0,16	-0,42	-0,44	-0,21	-0,40
PHKCL	0,74 **	0,80 **	-0,44	-0,23	0,36	0,14	-0,27	-0,41	-0,52	-0,18	-0,25
CA	0,91 ***	0,80 **	-0,14	-0,02	0,44	0,12	-0,35	-0,08	-0,24	0,12	-0,24
MG	0,86 ***	0,85 ***	-0,16	0,08	0,12	0,35	-0,38	-0,01	-0,26	0,13	-0,41
NA	-0,46	-0,42	0,01	0,39	-0,13	0,30	-0,25	0,26	-0,04	-0,04	0,11
K	0,87 ***	0,83 ***	-0,19	0,14	0,35	0,28	-0,46	-0,02	-0,22	0,08	-0,49
CEC	1,00 ***	0,67 *	0,16	0,11	0,07	0,27	-0,29	0,22	-0,07	0,36	-0,31
S	0,67 *	1,00 ***	-0,33	-0,15	0,32	0,02	-0,17	-0,29	-0,22	-0,12	-0,24
ARG	0,16	-0,33	1,00 ***	0,19	-0,51	-0,01	0,21	0,82 **	0,64 *	0,80 **	-0,04
LIMF	0,11	-0,15	0,19	1,00 ***	-0,06	0,64 *	-0,65 *	0,63 *	0,30	0,32	-0,36
LIMG	0,07	0,32	-0,51	-0,06	1,00 ***	-0,22	-0,34	-0,43	-0,29	-0,26	0,11
SABF	0,27	0,02	-0,01	0,64 *	-0,22	1,00 ***	-0,82 **	0,25	-0,36	-0,04	-0,16
SABG	-0,29	-0,17	0,21	-0,65 *	-0,34	-0,82 **	1,00 ***	-0,12	0,37	0,04	0,19
ARCLIMF	0,22	-0,29	0,82 **	0,63 *	-0,43	0,25	-0,12	1,00 ***	0,67 *	0,88 ***	-0,36
PF25	-0,07	-0,22	0,64 *	0,30	-0,29	-0,36	0,37	0,67 *	1,00 ***	0,68 *	-0,26
PF42	0,36	-0,12	0,80 **	0,32	-0,26	-0,04	0,04	0,88 ***	0,68 *	1,00 ***	-0,33
DENS	-0,31	-0,24	-0,04	-0,36	0,11	-0,16	0,19	-0,36	-0,26	-0,33	1,00 ***

Annexe 20 (suite)

b. Horizon 10-20 cm

	C	CFRAPHIN	CFRAGRO	N	P	CN	PHH2O	PHKCL	CA	MG	NA	K
C	1,00 ***	0,78 **	0,48	0,48	0,25	0,37	0,21	0,20	0,34	0,27	0,22	0,41
CFRAPHIN	0,78 **	1,00 ***	-0,01	0,15	0,16	0,57	0,17	0,13	0,34	0,16	0,22	0,10
CFRAGRO	0,48	-0,01	1,00 ***	0,74 **	0,21	-0,07	0,22	0,27	0,26	0,38	0,08	0,62 *
N	0,48	0,15	0,74 **	1,00 ***	0,00	-0,46	0,04	0,09	0,25	0,29	0,11	0,29
P	0,25	0,16	0,21	0,00	1,00 ***	0,24	0,90 ***	0,94 ***	0,82 **	0,77 **	0,39	0,82 **
CN	0,37	0,57	-0,07	-0,46	0,24	1,00 ***	0,27	0,17	0,15	0,08	0,10	0,23
PHH2O	0,21	0,17	0,22	0,04	0,90 ***	0,27	1,00 ***	0,97 ***	0,80 **	0,85 ***	0,41	0,82 **
PHKCL	0,20	0,13	0,27	0,09	0,94 ***	0,17	0,97 ***	1,00 ***	0,87 ***	0,84 ***	0,41	0,83 ***
CA	0,34	0,34	0,26	0,25	0,82 **	0,15	0,80 **	0,87 ***	1,00 ***	0,61 *	0,44	0,68 *
MG	0,27	0,16	0,38	0,29	0,77 **	0,08	0,85 ***	0,84 ***	0,61 *	1,00 ***	0,08	0,85 ***
NA	0,22	0,22	0,08	0,11	0,39	0,10	0,41	0,41	0,44	0,08	1,00 ***	0,20
K	0,41	0,10	0,62 *	0,29	0,82 **	0,23	0,82 **	0,83 ***	0,68 *	0,85 ***	0,20	1,00 ***
CEC	0,28	0,18	0,58 *	0,39	0,28	0,12	0,11	0,25	0,39	0,24	-0,03	0,36
S	0,40	0,30	0,32	0,27	0,80 **	0,19	0,91 ***	0,88 ***	0,83 ***	0,78 **	0,45	0,82 **
ARG	-0,04	-0,18	-0,06	0,17	-0,79 **	-0,45	-0,81 **	-0,78 **	-0,66 *	-0,55	-0,64 *	-0,60 *
LIMF	0,30	0,47	0,06	-0,22	0,24	0,79 **	0,23	0,15	0,10	0,33	-0,27	0,35
LIMG	0,31	0,65 *	-0,46	-0,28	0,28	0,54	0,27	0,19	0,32	0,05	0,44	-0,01
SABF	0,36	0,24	0,43	-0,04	0,49	0,57	0,58 *	0,57	0,43	0,36	0,56	0,61 *
SABG	-0,57	-0,79 **	0,13	0,11	-0,29	-0,66 *	-0,27	-0,22	-0,30	-0,15	-0,51	-0,16
ARGLIMF	0,20	0,16	0,10	0,29	-0,62 *	-0,15	-0,67 *	-0,65 *	-0,53	-0,28	-0,68 *	-0,42
PF25	-0,07	-0,04	-0,05	0,05	-0,43	-0,12	-0,60 *	-0,60 *	-0,60 *	-0,22	-0,63 *	-0,38
PF42	0,08	0,01	0,12	0,32	-0,54	-0,31	-0,69 *	-0,66 *	-0,55	-0,29	-0,65 *	-0,41
DENS	0,41	0,31	0,21	-0,11	0,55	0,53	0,66 *	0,56	0,24	0,70 *	0,09	0,60 *

	CEC	S	ARG	LIMF	LIMG	SABF	SABG	ARGLIMF	PF25	PF42	DENS
C	0,28	0,40	-0,04	0,30	0,31	0,36	-0,57	0,20	-0,07	0,08	0,41
CFRAPHIN	0,18	0,30	-0,18	0,47	0,65 *	0,24	-0,79 **	0,16	-0,04	0,01	0,31
CFRAGRO	0,58 *	0,32	-0,06	0,06	-0,46	0,43	0,13	0,10	-0,05	0,12	0,21
N	0,39	0,27	0,17	-0,22	-0,28	-0,04	0,11	0,29	0,05	0,32	-0,11
P	0,28	0,80 **	-0,79 **	0,24	0,28	0,49	-0,29	-0,62 *	-0,43	-0,54	0,55
CN	0,12	0,19	-0,45	0,79 **	0,54	0,57	-0,66 *	-0,15	-0,12	-0,31	0,53
PHH2O	0,11	0,91 ***	-0,81 **	0,23	0,27	0,58 *	-0,27	-0,67 *	-0,60 *	-0,69 *	0,66 *
PHKCL	0,25	0,88 ***	-0,78 **	0,15	0,19	0,57	-0,22	-0,65 *	-0,60 *	-0,66 *	0,56
CA	0,39	0,83 ***	-0,66 *	0,10	0,32	0,43	-0,30	-0,53	-0,60 *	-0,55	0,24
MG	0,24	0,78 **	-0,55	0,33	0,05	0,36	-0,15	-0,28	-0,22	-0,29	0,70 *
NA	-0,03	0,45	-0,64 *	-0,27	0,44	0,56	-0,51	-0,68 *	-0,63 *	-0,65 *	0,09
K	0,36	0,82 **	-0,60 *	0,35	-0,01	0,61 *	-0,16	-0,42	-0,38	-0,41	0,60 *
CEC	1,00 ***	0,03	-0,14	0,31	-0,15	0,27	-0,16	0,25	0,19	0,18	0,07
S	0,03	1,00 ***	-0,71 **	0,17	0,31	0,51	-0,28	-0,62 *	-0,64 *	-0,61 *	0,48
ARG	-0,14	-0,71 **	1,00 ***	-0,31	-0,46	-0,66 *	0,47	0,80 **	0,55	0,75 **	-0,43
LIMF	0,31	0,17	-0,31	1,00 ***	0,40	0,26	-0,50	0,17	0,28	0,02	0,52
LIMG	-0,15	0,31	-0,46	0,40	1,00 ***	0,10	-0,82 **	-0,24	-0,17	-0,39	0,24
SABF	0,27	0,51	-0,66 *	0,26	0,10	1,00 ***	-0,46	-0,56	-0,63 *	-0,65 *	0,52
SABG	-0,16	-0,28	0,47	-0,50	-0,82 **	-0,46	1,00 ***	0,13	0,18	0,34	-0,41
ARGLIMF	0,25	-0,62 *	0,80 **	0,17	-0,24	-0,56	0,13	1,00 ***	0,81 **	0,88 ***	-0,14
PF25	0,19	-0,64 *	0,55	0,28	-0,17	-0,63 *	0,18	0,81 **	1,00 ***	0,88 ***	-0,12
PF42	0,18	-0,61 *	0,75 **	0,02	-0,39	-0,65 *	0,34	0,88 ***	0,88 ***	1,00 ***	-0,30
DENS	0,07	0,48	-0,43	0,52	0,24	0,52	-0,41	-0,14	-0,12	-0,30	1,00 ***

Annexe 20 (suite)

c. Horizon 20-30 cm

	C	N	P	CN	PHH2O	PHKCL	CA	MG	NA	K	CEC	S
C	1,00 ***	0,67 *	-0,48	0,20	-0,54	-0,43	-0,12	-0,27	0,08	-0,36	0,69 *	-0,41
N	0,67 *	1,00 ***	-0,46	-0,51	-0,60 *	-0,47	-0,02	-0,12	-0,01	-0,18	0,88 ***	-0,36
P	-0,48	-0,46	1,00 ***	0,05	0,84 ***	0,72 **	0,45	0,68 *	-0,34	0,80 **	-0,23	0,74 **
CN	0,20	-0,51	0,05	1,00 ***	0,22	0,25	0,06	-0,09	0,26	-0,17	-0,44	0,14
PHH2O	-0,54	-0,60 *	0,84 ***	0,22	1,00 ***	0,95 ***	0,71 *	0,67 *	-0,29	0,77 **	-0,42	0,90 ***
PHKCL	-0,43	-0,47	0,72 **	0,25	0,95 ***	1,00 ***	0,84 ***	0,52	-0,12	0,64 *	-0,37	0,86 ***
CA	-0,12	-0,02	0,45	0,06	0,71 *	0,84 ***	1,00 ***	0,52	-0,27	0,52	0,06	0,76 **
MG	-0,27	-0,12	0,68 *	-0,09	0,67 *	0,52	0,52	1,00 ***	-0,70 *	0,83 ***	0,09	0,78 **
NA	0,08	-0,01	-0,34	0,26	-0,29	-0,12	-0,27	-0,70 *	1,00 ***	-0,46	-0,25	-0,39
K	-0,36	-0,18	0,80 **	-0,17	0,77 **	0,64 *	0,52	0,83 ***	-0,46	1,00 ***	-0,04	0,88 ***
CEC	0,69 *	0,88 ***	-0,23	-0,44	-0,42	-0,37	0,06	0,09	-0,25	-0,04	1,00 ***	-0,25
S	-0,41	-0,36	0,74 **	0,14	0,90 ***	0,86 ***	0,76 **	0,78 **	-0,39	0,88 ***	-0,25	1,00 ***
ARG	0,38	0,67 *	-0,62 *	-0,51	-0,76 **	-0,74 **	-0,46	-0,31	0,15	-0,40	0,46	-0,64 *
LIMF	-0,23	-0,16	0,39	0,01	0,24	0,12	0,08	0,49	-0,50	0,29	0,10	0,31
LIMG	-0,57	-0,33	0,11	-0,03	0,24	0,26	0,20	-0,02	0,12	0,05	-0,29	0,24
SABF	-0,10	-0,47	0,20	0,55	0,47	0,53	0,44	0,01	-0,15	0,08	-0,41	0,43
SABG	-0,05	-0,07	-0,04	-0,10	-0,08	-0,13	-0,30	-0,13	0,29	-0,01	-0,25	-0,21
ARGLIMF	0,48	0,75 **	-0,39	-0,54	-0,68 *	-0,71 **	-0,41	-0,02	-0,18	-0,26	0,73 **	-0,56
PF25	0,29	0,56	-0,40	-0,55	-0,71 **	-0,77 **	-0,52	-0,17	-0,09	-0,36	0,55	-0,65 *
PF42	0,63 *	0,84 ***	-0,55	-0,43	-0,71 **	-0,64 *	-0,30	-0,21	0,06	-0,34	0,68 *	-0,56
DENS	0,11	0,16	0,19	0,04	0,24	0,32	0,50	0,37	-0,01	0,29	0,26	0,36

	ARG	LIMF	LIMG	SABF	SABG	ARGLIMF	PF25	PF42	DENS
C	0,38	-0,23	-0,57	-0,10	-0,05	0,48	0,29	0,63 *	0,11
N	0,67 *	-0,16	-0,33	-0,47	-0,07	0,75 **	0,56	0,84 ***	0,16
P	-0,62 *	0,39	0,11	0,20	-0,04	-0,39	-0,40	-0,55	0,19
CN	-0,51	0,01	-0,03	0,55	-0,10	-0,54	-0,55	-0,43	0,04
PHH2O	-0,76 **	0,24	0,24	0,47	-0,08	-0,68 *	-0,71 **	-0,71 **	0,24
PHKCL	-0,74 **	0,12	0,26	0,53	-0,13	-0,71 **	-0,77 **	-0,64 *	0,32
CA	-0,46	0,08	0,20	0,44	-0,30	-0,41	-0,52	-0,30	0,50
MG	-0,31	0,49	-0,02	0,01	-0,13	-0,02	-0,17	-0,21	0,37
NA	0,15	-0,50	0,12	-0,15	0,29	-0,18	-0,09	0,06	-0,01
K	-0,40	0,29	0,05	0,08	-0,01	-0,26	-0,36	-0,34	0,29
CEC	0,46	0,10	-0,29	-0,41	-0,25	0,73 **	0,55	0,68 *	0,26
S	-0,64 *	0,31	0,24	0,43	-0,21	-0,56	-0,65 *	-0,56	0,36
ARG	1,00 ***	-0,52	-0,43	-0,81 **	0,50	0,85 ***	0,87 ***	0,92 ***	-0,08
LIMF	-0,52	1,00 ***	0,35	0,29	-0,69 *	-0,11	-0,19	-0,46	0,23
LIMG	-0,43	0,35	1,00 ***	0,27	-0,61 *	-0,48	-0,30	-0,58 *	-0,13
SABF	-0,81 **	0,29	0,27	1,00 ***	-0,53	-0,80 **	-0,83 ***	-0,71 **	-0,02
SABG	0,50	-0,69 *	-0,61 *	-0,53	1,00 ***	0,24	0,29	0,38	-0,03
ARGLIMF	0,85 ***	-0,11	-0,48	-0,80 **	0,24	1,00 ***	0,92 ***	0,90 ***	0,01
PF25	0,87 ***	-0,19	-0,30	-0,83 ***	0,29	0,92 ***	1,00 ***	0,79 **	-0,11
PF42	0,92 ***	-0,46	-0,58 *	-0,71 **	0,38	0,90 ***	0,79 **	1,00 ***	0,00
DENS	-0,08	0,23	-0,13	-0,02	-0,03	0,01	-0,11	0,00	1,00 ***

Annexe 20 (suite)

d. Horizon 30-40 cm

	C	N	P	CN	PHH2O	PHKCL	CA	MG	NA	K	CEC	S
C	1,00 ***	0,96 ***	-0,64 *	-0,49	-0,75 **	-0,64 *	0,13	-0,17	0,15	-0,40	0,85 ***	-0,67 *
N	0,96 ***	1,00 ***	-0,71 **	-0,62 *	-0,78 **	-0,67 *	0,18	-0,28	0,08	-0,45	0,82 **	-0,69 *
P	-0,64 *	-0,71 **	1,00 ***	0,34	0,75 **	0,75 **	0,20	0,70 *	-0,01	0,80 **	-0,32	0,73 **
CN	-0,49	-0,62 *	0,34	1,00 ***	0,39	0,15	-0,55	0,10	-0,13	0,08	-0,47	0,16
PHH2O	-0,75 **	-0,78 **	0,75 **	0,39	1,00 ***	0,90 ***	0,25	0,45	0,21	0,69 *	-0,52	0,86 ***
PHKCL	-0,64 *	-0,67 *	0,75 **	0,15	0,90 ***	1,00 ***	0,56	0,46	0,20	0,69 *	-0,49	0,98 ***
CA	0,13	0,18	0,20	-0,55	0,25	0,56	1,00 ***	0,16	0,14	0,31	0,14	0,57
MG	-0,17	-0,28	0,70 *	0,10	0,45	0,46	0,16	1,00 ***	0,12	0,78 **	0,19	0,39
NA	0,15	0,08	-0,01	-0,13	0,21	0,20	0,14	0,12	1,00 ***	0,03	0,00	0,13
K	-0,40	-0,45	0,80 **	0,08	0,69 *	0,69 *	0,31	0,78 **	0,03	1,00 ***	0,04	0,62 *
CEC	0,85 ***	0,82 **	-0,32	-0,47	-0,52	-0,49	0,14	0,19	0,00	0,04	1,00 ***	-0,54
S	-0,67 *	-0,69 *	0,73 **	0,16	0,86 ***	0,98 ***	0,57	0,39	0,13	0,62 *	-0,54	1,00 ***
ARG	0,89 ***	0,87 ***	-0,62 *	-0,60 *	-0,68 *	-0,63 *	0,05	-0,13	0,19	-0,25	0,86 ***	-0,63 *
LIMF	-0,15	-0,16	0,45	0,29	0,19	0,13	-0,04	0,39	-0,10	0,25	-0,05	0,07
LIMG	-0,67 *	-0,67 *	0,47	0,47	0,64 *	0,66 *	0,22	-0,05	-0,01	0,07	-0,76 **	0,68 *
SABF	-0,79 **	-0,68 *	0,31	0,28	0,41	0,28	-0,31	0,08	-0,15	0,15	-0,73 **	0,26
SABG	-0,24	-0,29	0,17	-0,17	0,23	0,27	-0,05	0,31	0,11	0,44	-0,03	0,23
ARGLIMF	0,96 ***	0,92 ***	-0,52	-0,49	-0,64 *	-0,59 *	0,13	0,01	0,13	-0,22	0,94 ***	-0,61 *
PF25	0,92 ***	0,91 ***	-0,62 *	-0,55	-0,69 *	-0,68 *	0,02	-0,08	0,10	-0,32	0,90 ***	-0,70 *
PF42	0,94 ***	0,92 ***	-0,57	-0,55	-0,66 *	-0,60 *	0,15	-0,08	0,11	-0,27	0,92 ***	-0,61 *
DENS	-0,41	-0,48	0,73 **	0,27	0,61 *	0,57	0,07	0,86 ***	-0,06	0,78 **	-0,06	0,46

	ARG	LIMF	LIMG	SABF	SABG	ARGLIMF	PF25	PF42	DENS
C	0,89 ***	-0,15	-0,67 *	-0,79 **	-0,24	0,96 ***	0,92 ***	0,94 ***	-0,41
N	0,87 ***	-0,16	-0,67 *	-0,68 *	-0,29	0,92 ***	0,91 ***	0,92 ***	-0,48
P	-0,62 *	0,45	0,47	0,31	0,17	-0,52	-0,62 *	-0,57	0,73 **
CN	-0,60 *	0,29	0,47	0,28	-0,17	-0,49	-0,55	-0,55	0,27
PHH2O	-0,68 *	0,19	0,64 *	0,41	0,23	-0,64 *	-0,69 *	-0,66 *	0,61 *
PHKCL	-0,63 *	0,13	0,66 *	0,28	0,27	-0,59 *	-0,68 *	-0,60 *	0,57
CA	0,05	-0,04	0,22	-0,31	-0,05	0,13	0,02	0,15	0,07
MG	-0,13	0,39	-0,05	0,08	0,31	0,01	-0,08	-0,08	0,86 ***
NA	0,19	-0,10	-0,01	-0,15	0,11	0,13	0,10	0,11	-0,06
K	-0,25	0,25	0,07	0,15	0,44	-0,22	-0,32	-0,27	0,78 **
CEC	0,86 ***	-0,05	-0,76 **	-0,73 **	-0,03	0,94 ***	0,90 ***	0,92 ***	-0,06
S	-0,63 *	0,07	0,68 *	0,26	0,23	-0,61 *	-0,70 *	-0,61 *	0,46
CLAY	1,00 ***	-0,37	-0,87 ***	-0,71 **	0,08	0,92 ***	0,95 ***	0,96 ***	-0,43
FSILT	-0,37	1,00 ***	0,19	0,34	-0,60 *	-0,10	-0,20	-0,28	0,52
CSILT	-0,87 ***	0,19	1,00 ***	0,37	-0,21	-0,75 **	-0,80 **	-0,75 **	0,22
FSAND	-0,71 **	0,34	0,37	1,00 ***	0,07	-0,78 **	-0,69 *	-0,82 **	0,34
CSAND	0,08	-0,60 *	-0,21	0,07	1,00 ***	-0,16	-0,09	-0,08	0,27
CLAYFSI	0,92 ***	-0,10	-0,75 **	-0,78 **	-0,16	1,00 ***	0,97 ***	0,98 ***	-0,26
PF25	0,95 ***	-0,20	-0,80 **	-0,69 *	-0,09	0,97 ***	1,00 ***	0,97 ***	-0,34
PF42	0,96 ***	-0,28	-0,75 **	-0,82 **	-0,08	0,98 ***	0,97 ***	1,00 ***	-0,38
DENS	-0,43	0,52	0,22	0,34	0,27	-0,26	-0,34	-0,38	1,00 ***

Annexe 20 (suite)

e. Horizon 0-40 cm

	C	N	P	CN	PHH2O	PHKCL	CA	MG	NA	K	CEC	S
C	1,00 ***	0,90 ***	0,41	-0,51	0,40	0,42	0,55	0,59 *	-0,01	0,72 **	0,69 *	0,46
N	0,90 ***	1,00 ***	0,36	-0,62 *	0,26	0,23	0,34	0,62 *	-0,12	0,71 *	0,71 **	0,34
P	0,41	0,36	1,00 ***	0,17	0,90 ***	0,84 ***	0,78 **	0,69 *	-0,24	0,83 ***	0,31	0,84 ***
CN	-0,51	-0,62 *	0,17	1,00 ***	0,33	0,33	0,14	-0,16	0,00	-0,21	-0,57	0,27
PHH2O	0,40	0,26	0,90 ***	0,33	1,00 ***	0,94 ***	0,82 **	0,68 *	-0,19	0,79 **	0,10	0,95 ***
PHKCL	0,42	0,23	0,84 ***	0,33	0,94 ***	1,00 ***	0,90 ***	0,51	-0,03	0,65 *	0,06	0,91 ***
CA	0,55	0,34	0,78 **	0,14	0,82 **	0,90 ***	1,00 ***	0,55	-0,06	0,67 *	0,37	0,83 ***
MG	0,59 *	0,62 *	0,69 *	-0,16	0,68 *	0,51	0,55	1,00 ***	-0,47	0,90 ***	0,49	0,70 *
NA	-0,01	-0,12	-0,24	0,00	-0,19	-0,03	-0,06	-0,47	1,00 ***	-0,34	-0,39	-0,18
K	0,72 **	0,71 *	0,83 ***	-0,21	0,79 **	0,65 *	0,67 *	0,90 ***	-0,34	1,00 ***	0,53	0,80 **
CEC	0,69 *	0,71 **	0,31	-0,57	0,10	0,06	0,37	0,49	-0,39	0,53	1,00 ***	0,09
S	0,46	0,34	0,84 ***	0,27	0,95 ***	0,91 ***	0,83 ***	0,70 *	-0,18	0,80 **	0,09	1,00 ***
ARG	-0,05	0,07	-0,73 **	-0,70 *	-0,79 **	-0,76 **	-0,57	-0,34	0,06	-0,44	0,20	-0,74 **
LIMF	0,06	0,16	0,21	0,12	0,11	-0,11	-0,04	0,43	-0,21	0,34	0,20	0,12
LIMG	-0,11	-0,22	0,50	0,63 *	0,46	0,54	0,50	0,01	0,41	0,10	-0,27	0,46
SABF	0,16	0,03	0,32	0,39	0,50	0,42	0,26	0,22	0,13	0,36	-0,25	0,49
SABG	0,07	0,15	-0,15	-0,47	-0,14	-0,13	-0,20	-0,02	-0,36	-0,02	0,15	-0,17
ARGLIMF	0,07	0,22	-0,61 *	-0,66 *	-0,76 **	-0,79 **	-0,51	-0,12	-0,15	-0,29	0,46	-0,70 *
PF25	-0,03	0,10	-0,43	-0,57	-0,64 *	-0,72 **	-0,50	-0,03	-0,25	-0,22	0,42	-0,63 *
PF42	0,22	0,35	-0,54	-0,73 **	-0,68 *	-0,68 *	-0,42	-0,07	-0,18	-0,20	0,52	-0,60 *
DENS	0,35	0,16	0,59 *	0,20	0,68 *	0,49	0,56	0,75 **	-0,48	0,68 *	0,36	0,60 *

	ARG	LIMF	LIMG	SABF	SABG	ARGLIMF	PF25	PF42	DENS
C	0,89 ***	-0,15	-0,67 *	-0,79 **	-0,24	0,96 ***	0,92 ***	0,94 ***	-0,41
N	0,87 ***	-0,16	-0,67 *	-0,68 *	-0,29	0,92 ***	0,91 ***	0,92 ***	-0,48
P	-0,62 *	0,45	0,47	0,31	0,17	-0,52	-0,62 *	-0,57	0,73 **
CN	-0,60 *	0,29	0,47	0,28	-0,17	-0,49	-0,55	-0,55	0,27
PHH2O	-0,68 *	0,19	0,64 *	0,41	0,23	-0,64 *	-0,69 *	-0,66 *	0,61 *
PHKCL	-0,63 *	0,13	0,66 *	0,28	0,27	-0,59 *	-0,68 *	-0,60 *	0,57
CA	0,05	-0,04	0,22	-0,31	-0,05	0,13	0,02	0,15	0,07
MG	-0,13	0,39	-0,05	0,08	0,31	0,01	-0,08	-0,08	0,86 ***
NA	0,19	-0,10	-0,01	-0,15	0,11	0,13	0,10	0,11	-0,06
K	-0,25	0,25	0,07	0,15	0,44	-0,22	-0,32	-0,27	0,78 **
CEC	0,86 ***	-0,05	-0,76 **	-0,73 **	-0,03	0,94 ***	0,90 ***	0,92 ***	-0,06
S	-0,63 *	0,07	0,68 *	0,26	0,23	-0,61 *	-0,70 *	-0,61 *	0,46
CLAY	1,00 ***	-0,37	-0,87 ***	-0,71 **	0,08	0,92 ***	0,95 ***	0,96 ***	-0,43
FSILT	-0,37	1,00 ***	0,19	0,34	-0,60 *	-0,10	-0,20	-0,28	0,52
CSILT	-0,87 ***	0,19	1,00 ***	0,37	-0,21	-0,75 **	-0,80 **	-0,75 **	0,22
FSAND	-0,71 **	0,34	0,37	1,00 ***	0,07	-0,78 **	-0,69 *	-0,82 **	0,34
CSAND	0,08	-0,60 *	-0,21	0,07	1,00 ***	-0,16	-0,09	-0,08	0,27
CLAYFSI	0,92 ***	-0,10	-0,75 **	-0,78 **	-0,16	1,00 ***	0,97 ***	0,98 ***	-0,26
PF25	0,95 ***	-0,20	-0,80 **	-0,69 *	-0,09	0,97 ***	1,00 ***	0,97 ***	-0,34
PF42	0,96 ***	-0,28	-0,75 **	-0,82 **	-0,08	0,98 ***	0,97 ***	1,00 ***	-0,38
DENS	-0,43	0,52	0,22	0,34	0,27	-0,26	-0,34	-0,38	1,00 ***

Annexe 21 Analyse en composantes principales (CP) des propriétés des sols de 12 parcelles cultivées.

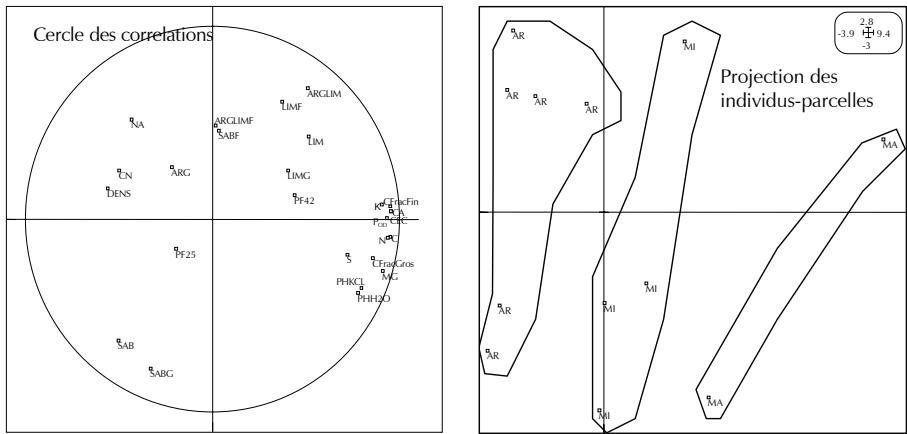
a. Cercles de corrélation des variables et projection des individus - parcelles sur les plans CP 1x2 et 1x3 (CP1 étant l'axe horizontal)

Codage des variables : voir p. A.17.

Horizon 0-10 cm

Inertie relative : cp1 : 45% - cp2 : 18% - cp3 : 13%

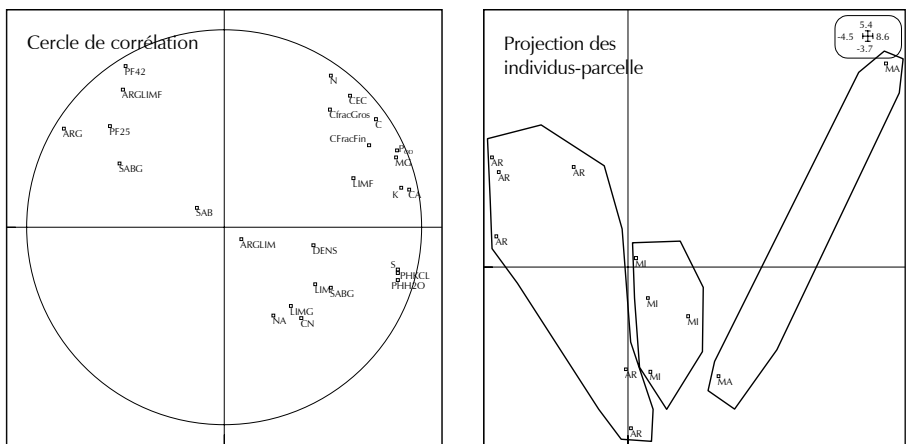
Axe 1-3



Horizon 10-20 cm

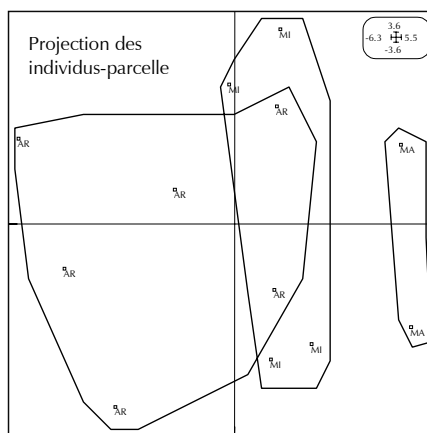
Inertie relative : cp1 : 42% - cp2 : 20% - cp3 : 19%

Axe 1-3

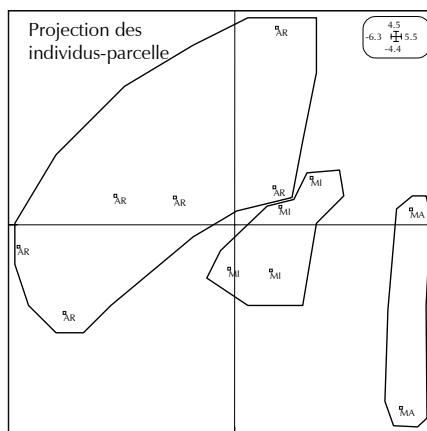


Inertie relative : cp1 : 44% - cp2 : 17% - cp3 : 14%

Cercle de corrélation



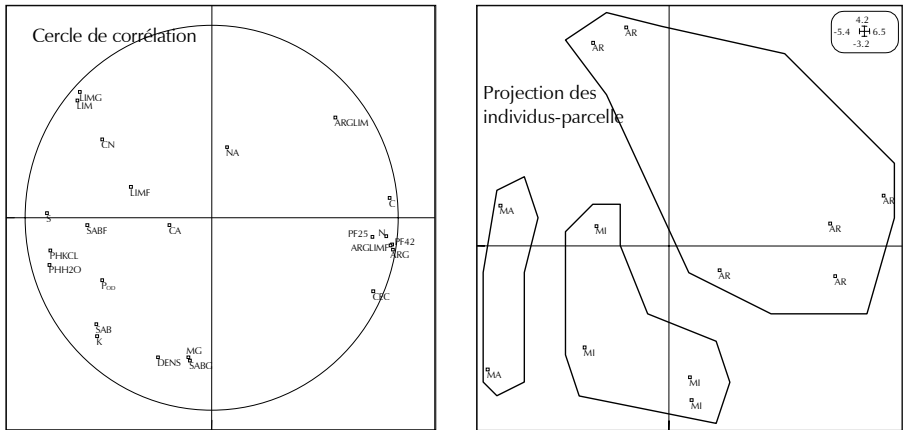
	Projection des	a ₀	4.5
--	----------------	----------------	-----



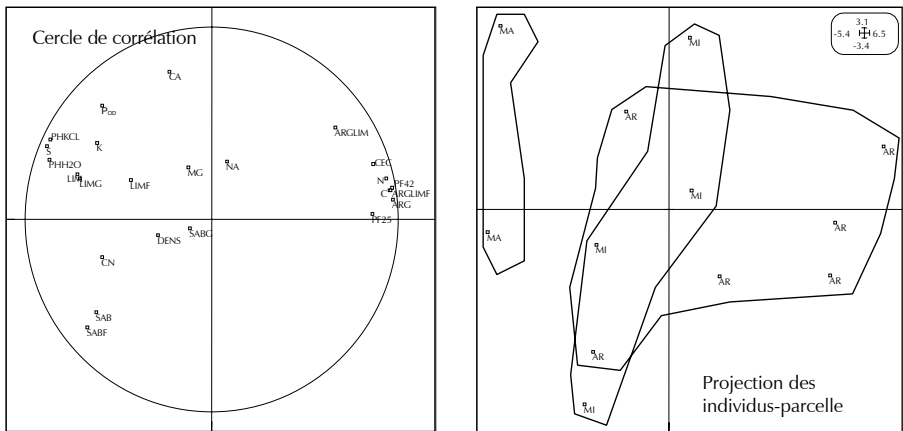
Horizon 30-40 cm

Inertie relative : cp1 : 50% - cp2 : 17% - cp3 : 12%

Axe 1-2



Axe 1-3

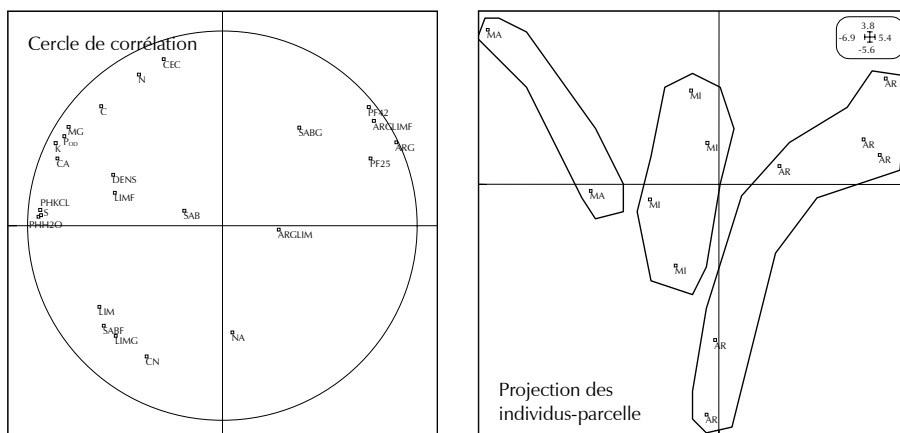


Annexe 21a (suite)

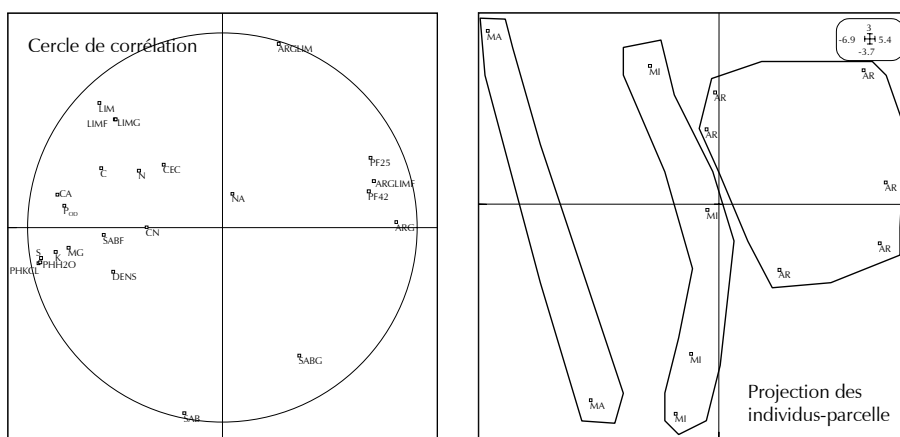
Horizon 0-40 cm

Inertie relative : cp1 : 45% - cp2 : 22% - cp3 : 17%

Axe 1-2



Axe 1-3



Codage des variables : ARG : argile. ARGLIM : argile+limon. ARGLIMF : argile+limon fin. C : carbone. CA : calcium. CFraFin : teneur en carbone de la fraction [0-50]µm. CFraGro : teneur en carbone de la fraction [50-2000] µm. CEC : capacité d'échange en cations. CN : rapport C/N. DENS : densité apparente. LIM : limon. LIMG : limon grossier. LIMF : limon fin. K : potassium. MG : magnésium. N : azote. NA : sodium. P : phosphore. PF25 et PF42 : humidité pondérale déterminée pour une succion équivalente à pF2,5 et pF4,2. PHH20 : pH eau. PHKCL : pH KCl. S : taux de saturation. SAB : sable. SABF : sable fin. SABG : sable grossier.

Codage des individus - parcelles : AR : culture d'arachide. MI : mil. MA : maïs.

Annexe 21 (suite) b. Valeurs propres.

Axe	Horizon (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40
1	11,70	10,89	11,70	12,06	10,70
2	4,73	5,15	4,73	4,12	5,32
3	3,44	4,99	3,44	2,85	4,00
4	2,53	1,94	2,53	2,29	1,55
5	1,36	1,08	1,36	0,94	0,87
6	1,05	0,74	1,05	0,81	0,71
7	0,66	0,50	0,66	0,36	0,39
8	0,24	0,38	0,24	0,30	0,23
9	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16
10	0,08	0,12	0,08	0,08	0,05
11	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Annexe 22 Propriétés des sols des principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique de Sare Yorobana.

a. Propriétés physiques

Parcelle	Horizon	Texture (%)						pF 2.5	pF 4.2	Densité apparente (g.dm ⁻³)	
		Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	Total			Echantillon total	Frac. 10-2mm
AR06	0-10	4,4	5,2	28,0	28,0	33,2	98,8	5,1	1,6	1,53	1,52
	10-20	7,0	5,6	31,1	22,8	31,9	98,4	5,9	2,4	1,51	1,50
	20-30	8,5	6,4	30,4	25,7	27,4	98,4	6,4	2,7	1,49	1,49
	30-40	10,0	6,7	32,2	21,5	30,0	100,4	7,0	3,2	1,46	1,46
	0-40	7,5	6,0	30,4	24,5	30,6	99,0	6,1	2,5	1,50	1,50
AR04	0-10	4,9	4,5	32,8	16,5	40,6	99,3	5,3	2,1	1,53	1,53
	10-20	9,2	4,4	38,4	10,7	36,3	99,0	5,5	2,9	1,39	1,39
	20-30	12,1	4,4	24,6	20,4	38,1	99,6	6,2	3,8	1,66	1,66
	30-40	14,6	4,0	33,0	9,7	38,2	99,5	7,2	4,7	1,31	1,31
	0-40	10,2	4,3	32,2	14,3	38,3	99,4	6,1	3,4	1,47	1,47
AR05	0-10	5,3	4,5	30,9	11,1	47,0	98,8	5,4	2,5	1,52	1,52
	10-20	15,0	5,0	25,3	10,4	43,9	99,6	12,9	5,3	1,52	1,52
	20-30	24,3	4,3	24,5	7,7	39,4	100,2	15,4	7,3	1,50	1,50
	30-40	31,4	5,1	16,0	11,4	37,6	101,5	19,9	9,7	1,52	1,52
	0-40	19,0	4,7	24,2	10,2	42,0	100,0	13,4	6,2	1,51	1,51
AR01	0-10	5,8	4,4	25,8	8,9	53,6	98,5	11,2	3,2	1,47	1,47
	10-20	12,6	4,5	23,9	8,5	49,6	99,1	9,1	4,6	1,50	1,50
	20-30	19,4	4,6	17,3	11,6	47,1	100,0	8,7	6,4	1,50	1,50
	30-40	31,0	4,4	17,5	6,7	39,5	99,1	12,8	9,0	1,50	1,50
	0-40	17,2	4,5	21,1	8,9	47,5	99,2	10,5	5,8	1,49	1,49
AR02	0-10	6,9	4,6	21,6	13,0	54,5	100,6	8,8	2,8	1,51	1,51
	10-20	14,6	4,8	22,4	8,6	51,0	101,4	8,2	4,5	1,35	1,35
	20-30	23,3	6,0	16,9	11,1	43,0	100,3	9,3	6,9	1,60	1,60
	30-40	37,4	5,3	15,9	8,3	34,1	101,0	12,9	10,7	1,41	1,41
	0-40	20,6	5,2	19,2	10,3	45,7	100,8	9,8	6,2	1,47	1,47
AR03	0-10	11,2	6,0	17,7	23,8	42,6	101,3	5,9	4,0	1,54	1,54
	10-20	14,9	5,1	17,4	20,6	43,0	101,0	6,5	4,5	1,54	1,54
	20-30	16,3	5,2	24,0	19,5	35,8	100,8	6,8	5,0	1,50	1,50
	30-40	21,4	4,9	20,7	15,7	38,9	101,6	8,3	6,5	1,53	1,51
	0-40	16,0	5,3	20,0	19,9	40,1	101,2	6,9	5,0	1,53	1,52
MI02	0-10	3,3	4,4	26,1	16,2	49,0	99,0	5,4	1,9	1,50	1,50
	10-20	7,3	6,0	25,9	16,5	44,1	99,8	5,9	2,7	1,54	1,54
	20-30	11,0	5,9	21,7	20,0	41,6	100,2	6,5	3,6	1,53	1,53
	30-40	13,6	4,2	20,0	17,7	44,0	99,5	7,1	4,1	1,54	1,54
	0-40	8,8	5,1	23,4	17,6	44,7	99,6	6,2	3,1	1,53	1,53
MI01	0-10	5,6	4,0	29,2	10,3	50,6	99,7	5,8	2,5	1,56	1,55
	10-20	8,8	4,6	17,3	16,2	52,2	99,1	5,9	3,0	1,49	1,49
	20-30	13,4	4,3	19,8	15,6	46,6	99,7	7,1	4,1	1,52	1,51
	30-40	23,1	4,4	21,1	8,9	42,5	100,0	10,2	6,9	1,55	1,55
	0-40	12,7	4,3	21,9	12,8	48,0	99,6	7,3	4,1	1,53	1,53
MI03	0-10	4,9	4,9	25,0	17,4	46,6	98,8	5,7	2,3	1,45	1,45
	10-20	10,2	5,6	29,2	13,0	41,5	99,5	6,5	3,2	1,54	1,54
	20-30	16,4	6,1	26,6	13,0	37,8	99,9	8,2	4,9	1,55	1,55
	30-40	23,2	5,9	16,0	15,4	39,6	100,1	10,3	6,8	1,56	1,56
	0-40	13,7	5,6	24,2	14,7	41,4	99,6	7,7	4,3	1,53	1,52
MI04	0-10	6,6	8,3	26,2	19,5	38,4	99,0	7,6	2,9	1,44	1,44
	10-20	8,1	9,4	32,6	15,2	34,0	99,3	7,0	3,0	1,58	1,58
	20-30	10,1	9,9	28,7	15,1	35,7	99,5	7,3	3,6	1,56	1,56
	30-40	12,4	9,1	24,2	16,5	36,2	98,4	8,0	4,2	1,58	1,58
	0-40	9,3	9,2	27,9	16,6	36,1	99,1	7,5	3,4	1,54	1,54
MA02	0-10	5,4	6,5	30,9	17,0	38,8	98,6	7,0	4,5	1,44	1,43
	10-20	6,3	9,2	29,8	17,4	36,1	98,8	6,6	4,0	1,54	1,54
	20-30	7,6	9,4	21,6	25,5	34,9	99,0	5,9	3,7	1,57	1,57
	30-40	8,6	9,5	33,4	13,6	34,9	100,0	5,7	3,8	1,58	1,58
	0-40	7,0	8,7	28,9	18,4	36,2	99,1	6,3	4,0	1,53	1,53
MA01	0-10	5,7	4,1	25,3	19,3	45,8	100,2	4,7	2,8	1,46	1,45
	10-20	7,2	4,3	24,2	20,9	43,6	100,2	3,0	2,3	1,55	1,55
	20-30	9,1	5,0	25,5	15,3	45,3	100,2	2,7	2,8	1,53	1,53
	30-40	10,4	5,2	23,6	18,1	43,2	100,5	4,2	3,1	1,55	1,55
	0-40	8,1	4,7	24,7	18,4	44,5	100,3	3,7	2,8	1,52	1,52
RI01	0-10	16,6	29,0	32,4	13,5	7,0	98,5	21,4	10,1	1,38	1,38
	10-20	17,2	27,1	32,4	13,5	7,9	98,1	17,6	9,2	1,50	1,50
	20-30	13,7	25,1	35,0	15,8	10,9	100,5	14,7	6,8	1,64	1,64
	30-40	10,9	20,5	28,2	26,3	14,4	100,3	11,2	5,4	1,66	1,66
	0-40	14,6	25,4	32,0	17,3	10,1	99,4	16,2	7,9	1,54	1,54
RI02	0-10	44,9	21,1	21,7	5,7	5,6	99,0	26,3	19,4	1,37	1,37
	10-20	57,9	16,1	17,7	1,6	5,1	98,4	30,1	23,1	1,24	1,24
	20-30	43,8	15,4	18,8	13,7	6,9	98,6	27,7	20,9	1,30	1,30
	30-40	52,2	14,8	13,9	11,3	5,8	98,0	24,3	18,2	1,35	1,35
	0-40	49,7	16,9	18,0	8,1	5,9	98,5	27,1	20,4	1,32	1,32

AR : arachide. MI : mil. MA : maïs. RI : riz.

Annexe 22 (suite)

b. Propriétés chimiques

Parcelle	Horizon	pH	pH	C	N	C/N	P _{so}	Cations échangeables (meq 100g ⁻¹ de sol)				CEC	Taux de saturation
		(H ₂ O)	(KCl)	(mg g ⁻¹)	(mg g ⁻¹)		(x10 ³ mg g ⁻¹)	Ca	Mg	Na	K		
AR06	0-10	6,02	5,22	4,31	0,29	14,87	3,20	1,12	0,34	0,02	0,04	2,20	69
	10-20	5,64	4,76	3,70	0,24	15,41	2,50	1,20	0,25	0,01	0,05	2,44	62
	20-30	5,52	4,59	2,66	0,23	11,55	2,30	1,00	0,22	0,00	0,03	2,32	54
	30-40	5,36	4,44	2,55	0,22	11,61	2,00	0,92	0,22	0,00	0,02	1,76	66
	0-40	5,64	4,75	3,31	0,25	13,36	2,50	1,06	0,26	0,01	0,04	2,18	63
AR04	0-10	6,24	5,71	5,02	0,37	13,56	2,90	1,78	0,43	0,00	0,05	2,48	91
	10-20	5,99	5,37	3,75	0,32	11,73	2,00	1,75	0,27	0,00	0,03	2,32	89
	20-30	5,86	5,17	3,30	0,27	12,20	1,60	1,48	0,28	0,02	0,03	2,56	70
	30-40	5,79	5,09	2,85	0,25	11,41	1,60	1,58	0,30	0,04	0,03	2,00	97
	0-40	5,97	5,34	3,73	0,30	12,22	2,03	1,65	0,32	0,02	0,03	2,34	87
AR05	0-10	5,89	5,04	4,20	0,35	12,00	2,60	1,56	0,34	0,03	0,04	2,24	88
	10-20	5,10	4,27	3,77	0,31	12,15	1,90	0,70	0,24	0,00	0,04	2,44	40
	20-30	4,88	4,11	3,92	0,35	11,21	1,70	1,00	0,35	0,00	0,03	3,04	46
	30-40	5,41	4,06	3,60	0,37	9,73	1,10	0,99	0,43	0,01	0,04	3,68	40
	0-40	5,32	4,37	3,87	0,35	11,27	1,83	1,06	0,34	0,01	0,04	2,85	54
AR01	0-10	5,87	4,96	3,93	0,33	11,90	1,70	0,96	0,28	0,00	0,02	1,96	64
	10-20	5,24	4,37	3,19	0,30	10,63	1,90	0,65	0,35	0,00	0,02	2,28	45
	20-30	4,90	4,15	3,09	0,26	11,87	2,00	0,49	0,37	0,00	0,02	2,48	35
	30-40	4,67	4,00	3,87	0,33	11,73	1,30	0,54	0,44	0,01	0,03	3,40	30
	0-40	5,17	4,37	3,52	0,31	11,53	1,73	0,66	0,36	0,00	0,02	2,53	44
AR02	0-10	5,82	4,99	4,40	0,38	11,58	2,30	1,05	0,31	0,00	0,04	2,32	60
	10-20	5,23	4,36	3,30	0,36	9,15	1,10	0,83	0,33	0,00	0,04	2,64	46
	20-30	4,88	4,10	3,55	0,35	10,14	2,00	0,90	0,44	0,00	0,05	3,04	46
	30-40	4,75	4,01	4,12	0,40	10,30	1,90	1,00	0,52	0,01	0,04	3,92	40
	0-40	5,17	4,37	3,84	0,37	10,29	1,83	0,95	0,40	0,00	0,04	2,98	48
AR03	0-10	5,66	4,99	5,07	0,41	12,37	2,40	1,47	0,48	0,02	0,04	2,68	75
	10-20	5,44	4,65	4,28	0,35	12,22	1,40	1,19	0,49	0,00	0,05	2,80	62
	20-30	5,32	4,54	3,40	0,32	10,62	0,80	1,11	0,46	0,00	0,04	2,76	58
	30-40	5,23	4,46	3,41	0,35	9,73	1,20	1,12	0,51	0,01	0,03	2,96	56
	0-40	5,41	4,66	4,04	0,36	11,23	1,45	1,22	0,49	0,01	0,04	2,80	63
MI02	0-10	6,66	6,13	5,22	0,40	13,06	3,40	1,71	1,12	0,00	0,13	2,40	123
	10-20	6,39	5,43	3,61	0,26	13,87	3,00	1,34	0,56	0,00	0,15	2,08	99
	20-30	5,97	4,95	2,85	0,18	15,83	2,30	1,09	0,55	0,00	0,14	2,24	80
	30-40	5,76	4,70	2,26	0,19	11,88	2,10	0,87	0,57	0,00	0,14	2,20	72
	0-40	6,20	5,30	3,48	0,26	13,66	2,70	1,25	0,70	0,00	0,14	2,23	94
MI01	0-10	6,42	5,78	6,97	0,52	13,41	9,40	3,21	0,80	0,00	0,20	3,68	114
	10-20	6,33	5,60	3,53	0,31	11,38	8,40	1,87	0,55	0,00	0,18	2,96	88
	20-30	6,07	5,29	2,67	0,26	10,28	8,50	1,32	0,48	0,00	0,16	2,60	75
	30-40	5,76	4,96	2,98	0,32	9,30	12,50	1,82	0,63	0,01	0,26	3,64	75
	0-40	6,15	5,41	4,04	0,35	11,09	9,70	2,06	0,62	0,00	0,20	3,22	88
MI03	0-10	6,38	5,65	6,58	0,53	12,41	5,90	1,78	0,69	0,01	0,18	2,80	95
	10-20	6,17	5,39	3,78	0,32	11,82	4,00	1,49	0,62	0,00	0,19	2,32	99
	20-30	5,94	5,11	2,43	0,30	8,11	2,90	1,30	0,77	0,00	0,24	2,64	88
	30-40	5,72	4,84	3,02	0,32	9,42	2,80	1,25	0,83	0,01	0,25	3,20	73
	0-40	6,05	5,25	3,95	0,37	10,44	3,90	1,45	0,73	0,01	0,22	2,74	89
MI04	0-10	6,36	5,56	5,96	0,52	11,47	10,90	2,71	0,82	0,00	0,38	3,56	110
	10-20	6,34	5,48	3,71	0,28	13,24	7,00	1,58	0,64	0,00	0,14	2,92	81
	20-30	6,00	5,12	2,62	0,24	10,92	6,20	1,15	0,70	0,00	0,12	2,68	74
	30-40	5,81	4,83	2,75	0,22	12,49	3,70	0,91	0,74	0,02	0,12	2,56	70
	0-40	6,13	5,25	3,76	0,32	12,03	6,95	1,59	0,73	0,00	0,19	2,93	84
MA02	0-10	6,58	6,14	11,98	1,13	10,61	45,40	4,31	1,55	0,00	0,40	5,76	109
	10-20	6,69	6,04	6,66	0,53	12,63	30,70	3,16	1,13	0,00	0,37	4,04	115
	20-30	6,74	6,03	3,64	0,28	12,99	19,40	2,14	0,78	0,00	0,31	2,84	114
	30-40	6,66	5,98	2,59	0,21	12,63	15,50	1,39	0,65	0,00	0,31	2,28	103
	0-40	6,67	6,05	6,22	0,54	12,21	27,75	2,75	1,03	0,00	0,35	3,73	110
MA01	0-10	6,72	6,30	8,54	0,78	10,92	22,90	2,76	1,22	0,00	0,20	3,96	106
	10-20	6,75	6,21	3,74	0,33	11,33	13,40	1,61	0,66	0,03	0,24	2,36	107
	20-30	6,80	6,03	2,31	0,20	11,55	12,40	1,12	0,49	0,01	0,37	1,88	105
	30-40	6,73	5,96	2,12	0,18	11,62	13,20	0,98	0,53	0,01	0,38	2,00	95
	0-40	6,75	6,13	4,18	0,37	11,36	15,48	1,62	0,72	0,01	0,30	2,55	103
RI01	0-10	5,23	4,44	14,59	1,19	12,26	10,10	3,09	0,39	0,02	0,04	7,84	45
	10-20	4,90	4,04	10,38	0,74	14,13	8,30	2,03	0,17	0,02	0,02	6,92	32
	20-30	4,80	4,05	7,69	0,41	18,87	5,10	0,89	0,10	0,00	0,00	4,44	22
	30-40	4,80	4,05	6,81	0,30	22,90	3,80	0,77	0,11	0,01	0,00	3,40	26
	0-40	4,93	4,15	9,87	0,66	17,04	6,83	1,70	0,19	0,01	0,02	5,65	31
RI02	0-10	4,81	4,04	19,17	1,84	10,42	14,40	5,32	1,01	0,05	0,04	12,24	53
	10-20	4,68	3,86	16,51	1,87	8,82	53,40	4,39	0,93	0,04	0,06	13,60	40
	20-30	4,67	3,88	13,37	1,55	8,65	66,90	3,57	0,82	0,03	0,02	11,92	37
	30-40	4,71	3,88	10,07	1,07	9,43	43,80	3,24	0,76	0,03	0,02	10,40	39
	0-40	4,72	3,92	14,78	1,58	9,33	44,63	4,13	0,88	0,04	0,04	12,04	42

AR : arachide. MI : mil. MA : maïs. RI : riz.

Annexe 23 Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore dans le sol des principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique de Sare Yorobana, sud Sénégal (exprimé en masse équivalente de sol).

Parcelle	Stock (masse de sol équivalente) par horizon en cm			
	0-10	0-20	0-30	0-40
Carbone (t ha⁻¹)				
AR01	6,0	10,9	15,6	21,4
AR02	6,8	11,8	17,2	23,5
AR03	7,8	14,4	19,5	24,6
AR04	7,7	13,4	18,3	22,6
AR05	6,5	12,2	18,1	23,6
AR06	6,6	12,3	16,2	20,1
MI01	10,8	16,2	20,2	24,7
MI02	8,0	13,5	17,8	21,2
MI03	10,0	15,6	19,2	23,8
MI04	9,1	14,6	18,5	22,6
MA01	12,9	18,4	21,8	25,0
MA02	18,2	27,9	33,2	37,1
RI01	22,1	37,5	48,7	59,0
RI02	29,3	53,7	71,9	86,0
Azote (kg ha⁻¹)				
AR01	507	965	1356	1858
AR02	584	1136	1663	2270
AR03	631	1169	1649	2177
AR04	569	1057	1458	1835
AR05	538	1015	1541	2100
AR06	446	814	1159	1490
MI01	802	1279	1668	2152
MI02	613	1009	1277	1564
MI03	806	1288	1737	2220
MI04	788	1204	1563	1895
MA01	1184	1666	1961	2236
MA02	1707	2472	2877	3185
RI01	1795	2856	3432	3878
RI02	2834	5638	7723	9175
Phosphore (kg ha⁻¹)				
AR01	2,6	5,6	8,5	10,5
AR02	3,5	5,3	8,4	11,2
AR03	3,7	5,8	7,0	8,9
AR04	4,5	7,5	9,9	12,3
AR05	4,0	6,9	9,4	11,1
AR06	4,9	8,8	12,2	15,2
MI01	14,5	27,4	40,2	59,1
MI02	5,2	9,8	13,3	16,4
MI03	9,0	15,0	19,3	23,5
MI04	16,6	27,1	36,4	42,0
MA01	34,8	55,0	73,5	93,5
MA02	69,1	114,9	143,3	166,6
RI01	15,4	27,7	35,0	40,7
RI02	25,5	114,0	209,8	268,2

AR : arachide. MI : mil. MA : maïs. RI : riz.

La parcelle de référence pour le calcul de la masse de sol équivalente est AR03.

Annexe 24 Stockage du carbone ($t\ ha^{-1}$) dans deux fractions de sol des principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique de Sare Yorobana, au sud du Sénégal (exprimé en masse de sol équivalente).

Horizon (cm)	0-10		0-20	
Fraction (μm)	[0-50]	[50-2000]	[0-50]	[50-2000]
AR01	4,74	1,24	9,45	1,37
AR02	5,08	1,67	8,86	3,02
AR03	6,11	1,70	11,26	3,11
AR04	6,42	1,28	11,63	1,72
AR05	5,15	1,29	10,10	2,10
AR06	4,91	1,72	9,90	2,40
MI01	7,89	2,86	12,16	4,05
MI02	6,20	1,77	11,03	2,46
MI03	6,28	3,71	11,24	4,41
MI04	7,38	1,65	12,40	2,20
MA01	6,96	5,99	11,20	7,22
MA02	10,36	7,86	18,37	9,67
RI01	19,23	3,35	33,65	4,44
RI02	26,40	3,52	51,09	4,63

AR : arachide. MI : mil. MA : maïs. RI : riz.

La parcelle de référence pour le calcul du poids de sol équivalent est AR03.

Annexe 25 Effet de la gestion des intrants organiques sur les propriétés physiques et le statut organique du sol.

Parcelle	Plateau	Gestion	Masse de la fraction [p-50] µm (g 100 g ⁻¹ de sol)										Densité apparente (kg dm ⁻³)										Teneur en carbone (g kg ⁻¹)										Stock de carbone (masse de sol équivalente)				
			par horizon de sol (cm)										par horizon de sol (cm)										par horizon de sol (cm)										(t ha ⁻¹) par horizon de sol (cm)				
			0-10	10-20	20-30	30-40	0-20	0-30	0-40				0-10	10-20	20-30	30-40	0-40						0-10	10-20	20-30	30-40	0-40										
AR04	1	BrJa	18,7	24,5	29,2	29,0	21,6	24,1	25,3	1,53	1,48	1,69	1,31	1,50	5,47	4,25	3,33	3,26	4,08	8,33	14,81	18,91	19,59	24,27													
AR04	2	BrJa	20,3	23,4	23,7	23,3	21,9	22,5	22,7	1,53	1,48	1,69	1,31	1,50	5,43	4,24	3,33	3,26	4,08	8,26	14,86	18,71	21,79														
AR04	3	BrJa	18,2	23,2	24,7	27,7	20,7	22,0	23,4	1,53	1,30	1,64	1,32	1,45	4,64	3,15	3,26	2,29	3,33	7,06	11,88	16,58	19,85														
AR04	4	BrJa	19,0	24,0	25,0	29,1	22,5	22,6	24,4	1,53	1,30	1,64	1,32	1,45	4,53	3,26	3,94	3,74	3,87	6,89	11,84	17,69	23,03														
AR02	1	BrJa	19,6	26,5	35,4	46,5	23,1	27,2	32,0	1,45	1,35	1,52	1,51	1,46	4,69	3,26	3,44	3,09	3,62	7,09	12,04	16,99	21,38														
AR02	2	BrJa	17,8	25,5	34,5	48,6	21,7	25,9	31,6	1,58	1,35	1,68	1,31	1,48	4,11	3,33	3,66	5,15	4,06	6,27	11,39	16,60	23,88														
AR03	1	BrJa	24,9	26,8	30,1	37,5	25,9	27,3	29,8	1,52	1,53	1,44	1,50	1,50	4,63	4,08	3,33	3,02	3,76	7,04	13,27	18,07	22,38														
AR03	2	BrJa	26,2	28,0	29,9	33,9	27,1	28,0	29,5	1,52	1,53	1,50	1,53	1,52	5,43	4,00	3,81	3,42	4,16	8,26	14,37	19,87	24,76														
AR03	3	BrJa	26,0	26,7	29,0	30,5	26,4	27,2	28,1	1,50	1,59	1,55	1,56	1,55	5,19	4,52	3,07	3,73	4,13	7,89	14,81	19,22	24,51														
AR03	4	BrJa	25,3	26,9	27,3	29,1	26,1	26,5	27,2	1,62	1,51	1,51	1,51	1,54	5,04	4,50	3,38	3,46	4,09	7,68	14,63	19,53	24,47														
AR06	1	BrParc	28,9	32,6	25,7	32,9	30,7	29,0	30,0	1,56	1,50	1,49	1,46	1,50	4,65	3,75	2,66	2,39	3,36	7,09	12,83	16,68	20,11														
AR06	2	BrParc	22,1	29,3	34,4	37,2	25,7	28,6	30,7	1,56	1,50	1,49	1,46	1,50	4,04	3,08	1,84	2,66	2,91	6,16	10,89	13,52	17,31														
AR06	3	BrParc	23,5	30,1	29,0	33,7	26,8	27,5	29,1	1,49	1,51	1,50	1,46	1,49	4,93	4,58	3,45	2,49	3,87	7,49	14,46	19,42	22,99														
AR06	4	BrParc	18,4	30,6	28,2	31,5	24,5	25,7	27,2	1,49	1,51	1,50	1,46	1,49	3,63	3,39	2,67	2,66	3,09	5,52	10,67	14,51	18,32														
AR05	1	BrParc	19,1	31,0	35,6	47,1	25,0	28,6	33,2	1,50	1,51	1,49	1,49	1,50	4,69	4,22	3,99	3,42	4,08	7,13	13,57	19,32	24,22														
AR05	2	BrParc	22,1	30,3	35,7	44,6	26,2	29,4	33,2	1,45	1,55	1,54	1,55	1,53	6,33	4,10	4,66	3,32	4,60	9,55	15,74	22,50	27,28														
AR05	3	BrParc	14,9	25,9	36,4	42,5	20,4	25,7	29,9	1,55	1,53	1,48	1,51	1,52	3,01	3,49	4,05	4,14	3,67	4,57	9,88	15,71	21,63														
AR05	4	BrParc	19,4	24,0	30,1	37,0	21,7	24,5	27,6	1,56	1,47	1,49	1,52	1,51	2,76	3,26	2,99	3,52	3,13	4,19	9,16	13,46	18,49														
MI02	1	Cas	18,1	22,5	26,1	28,7	20,3	22,2	23,8	1,50	1,53	1,53	1,54	1,52	6,06	3,11	3,06	2,40	3,66	9,19	13,92	18,34	21,60														
MI02	2	Cas	21,3	22,5	24,9	26,4	21,9	22,9	23,8	1,50	1,56	1,53	1,54	1,53	4,39	4,10	2,64	2,11	3,31	6,67	12,93	16,76	19,61														
MI01	1	Cas	16,5	23,5	25,4	36,4	20,0	21,8	25,5	1,58	1,53	1,55	1,57	1,55	6,13	2,93	2,61	2,65	3,58	9,41	13,98	17,74	21,53														
MI01	2	Cas	16,7	23,8	33,7	41,4	20,3	24,7	28,9	1,54	1,52	1,51	1,54	1,53	6,39	2,84	2,97	3,93	4,03	9,75	14,12	18,36	23,93														
MI01	3	Cas	17,2	23,0	22,3	31,1	20,1	20,8	23,4	1,55	1,50	1,48	1,54	1,52	6,31	4,91	2,62	2,61	4,11	9,61	17,12	20,90	24,62														
MI01	4	Cas	18,0	19,6	24,9	33,9	18,8	20,9	24,1	1,55	1,40	1,52	1,54	1,50	9,07	3,42	2,49	2,72	4,43	13,87	19,12	22,67	26,56														
MI04	1	CasParc	36,6	40,1	47,3	48,2	38,3	41,3	43,0	1,37	1,60	1,57	1,56	1,53	7,93	5,52	4,65	3,63	5,43	11,87	20,07	26,77	31,98														
MI04	2	CasParc	28,2	28,3	29,5	31,3	28,2	28,6	29,3	1,44	1,57	1,55	1,55	1,53	5,36	3,33	2,05	3,55	3,57	8,07	13,06	15,94	20,97														
MI04	3	CasParc	29,3	33,0	30,5	32,7	31,1	30,9	31,4	1,46	1,60	1,62	1,63	1,58	5,64	3,46	1,99	2,11	3,30	8,51	13,73	16,61	19,61														
MI04	4	CasParc	20,6	25,9	27,0	27,0	23,2	24,5	25,1	1,47	1,53	1,51	1,58	1,52	4,92	2,52	1,79	1,70	2,73	7,42	11,20	13,77	16,20														
MI03	1	CasParc	19,0	27,0	31,3	44,6	23,0	25,8	30,5	1,46	1,54	1,55	1,59	1,54	4,84	3,05	2,58	2,62	3,27	7,31	11,89	15,61	19,35														
MI03	2	CasParc	16,5	24,5	29,8	49,1	20,5	23,6	30,0	1,46	1,54	1,55	1,59	1,54	5,53	4,14	3,16	2,81	3,91	8,37	14,62	19,16	23,19														
MI03	3	CasParc	19,3	26,1	27,5	37,9	22,7	24,3	27,7	1,44	1,53	1,55	1,53	1,51	5,99	3,57	1,60	2,86	3,50	9,01	14,29	19,50	20,56														
MI03	4	CasParc	21,8	29,9	27,2	31,0	25,8	26,3	27,5	1,44	1,53	1,55	1,53	1,51	9,94	4,38	2,28	3,78	5,12	14,89	21,28	24,61	29,99														
MA02	1	CasParcOrd	18,4	23,1	22,7	26,1	20,8	21,4	22,6	1,40	1,44	1,56	1,58	1,49	16,95	8,61	3,25	2,48	7,72	24,64	36,63	40,67	44,18														
MA02	2	CasParcOrd	28,1	30,9	31,1	31,2	29,5	30,0	30,3	1,40	1,52	1,58	1,58	1,52	11,60	6,38	3,30	2,57	5,96	17,29	26,46	31,00	34,67														
MA02	3	CasParcOrd	26,1	39,2	40,9	35,4	32,7	35,4	35,4	1,48	1,56	1,54	1,56	1,54	10,38	7,56	4,99	3,08	6,50	15,72	27,18	34,44	38,93														
MA02	4	CasParcOrd	30,3	39,2	40,4	40,3	34,7	36,6	37,6	1,48	1,63	1,61	1,61	1,58	9,41	4,10	3,02	2,23	4,69	14,20	20,38	24,86	28,13														
MA01	1	CasParcOrd	15,7	16,8	21,8	19,1	16,3	18,1	18,4	1,37	1,55	1,55	1,55	1,51	7,95	4,18	2,37	2,26	4,19	11,78	17,73	21,03	24,26														
MA01	2	CasParcOrd	14,8	17,1	18,4	23,7	15,9	16,8	18,5	1,40	1,56	1,57	1,49	1,51	7,28	3,53	1,96	1,86	3,68	10,83	15,90	18,65	21,45														
MA01	3	CasParcOrd	14,7	39,1	19,5	22,0	24,9	24,4	23,8	1,40	1,54	1,45	1,48	1,47	8,05	2,95	1,96	1,87	3,70	11,92	15,04	18,80	21,46														
MA01	4	CasParcOrd	24,1	27,1	26,9	28,9	25,6	26,0	26,7	1,66	1,54	1,54	1,64	1,60	10,89	4,30	2,95	1,40	5,14	17,02	24,14	28,56	32,06														

Description des traitements en Figure 3.1. Le plateau 1 de la parcelle AR03 a été choisie comme référence pour le calcul de la masse de sol équivalente.

Annexe 26 Apports organiques de carbone, d'azote et de phosphore dans les champs de case selon trois schémas différents de gestion organique de la fertilité .

Traitement	Mil, sans parcage (Cas)	Mil, parcage (CasParc)	Maïs parcage+ordures ménagères (CasParcOrd)
Entrée de carbone ($t\ ha^{-1}\ an^{-1}$)			
Racines	0,2	0,5	0,1
Fumier	0,1	1,6	2,8
Ordures ménagères	0,0	0,0	1,4
Résidus de culture	1,7	3,2	2,0
Total	2,0	5,3	6,3
Entrée d'azote ($kg\ ha^{-1}\ an^{-1}$)			
Racines	7,1	13,4	3,2
Fumier	3,8	67,8	114,3
Ordures ménagères	0,0	0,0	35,1
Résidus de culture	13,3	37,6	57,9
Total	24,2	118,8	210,5
Entrée de phosphore ($kg\ ha^{-1}\ an^{-1}$)			
Racines	0,5	1,0	0,2
Fumier	0,9	16,4	27,7
Ordures ménagères	0,0	0,0	5,1
Résidus de culture	2,8	3,4	4,6
Total	4,3	20,8	37,5

Hypothèses : (1) composition chimique des fèces frais ($g\ 100g^{-1}$ MO sèche) : C : 35 (de Ridder and van Keulen, 1990) ; N : 1,44 ; Pt : 0,35 (Hamon, dans Coulomb et al., 1980). (2) 80 % des résidus de culture sont restitués au sol par le piétinement par les animaux

Note : l'exudation racinaire du carbone et la fixation biologique de l'azote ne sont pas inclus.

Annexe 27 Evaluation de la qualité du sol de 23 parcelles de culture et de jachère (Chapitres 2 et 3) selon les critères de Feller (1995b) basés sur la teneur en carbone et la teneur en éléments fins.

Parcelle	Type	Argile + limon fin (%)	Teneur en C (g kg ⁻¹ sol)
JA1a	Jachère jeune	10,2	5,82
JA1b	Jachère jeune	15,2	7,42
JA1c	Jachère jeune	11,2	5,09
JA2a	Jachère jeune	11,6	4,40
JA4	Jachère jeune	12,4	6,96
JA7a	Jachère jeune	14	5,35
JA12	Jachère âgée	13,2	7,49
JA13a	Jachère âgée	15,9	4,82
JA17	Jachère âgée	14,2	7,27
JA18a	Jachère âgée	13,7	5,25
JA26	Jachère âgée	13,6	5,96
AR01	Champ de brousse	10,2	3,93
AR02	Champ de brousse	11,5	4,40
AR03	Champ de brousse	17,2	5,07
AR04	Champ de brousse	9,4	5,02
AR05	Champ de brousse	9,8	4,20
AR06	Champ de brousse	9,6	4,31
MI01	Champ de case	9,6	6,97
MI02	Champ de case	7,7	5,22
MI03	Champ de case	9,8	6,58
MI04	Champ de case	14,9	5,96
MA01	Champ de case	9,8	8,54
MA02	Champ de case	11,9	11,98
RI01	Rizière	45,6	14,59
RI02	Rizière	66	19,17

Jachère jeune : âgée de 0 à 9ans. Jachère âgée : de plus de 9 ans.

CHAPITRE 4

Annexe 28 Précipitations annuelles moyennes (mm) durant les 60 dernières années (Service de la Météorologie Nationale, station de Kolda).

Année	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947
Précip.	975			1063	1018	1558	1028	1071	1378	1186
Année	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957
Précip.		1019	1543	1286	1372	1356	1232	1289	1221	1629
Année	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967
Précip.	2152	1139	1115	1206	1216	1440	1200	1178	1147	1219
Année	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
Précip.	760	1410	1046	1383	873	1172	1019	1188	920	645
Année	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Précip.	992	823	566	1002	848	726	865	794	1110	1072
Année	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Précip.	1018	1102	787	656	1325	1196	1175	959	1003	1125

Annexe 29 Distribution spatiale de l'utilisation des terres illustrée par la distance des cultures à la concession.

Culture	Distance moyenne à la concession (m)
mil x maïs	160
maïs	287
mil	416
sorgho	516
coton	543
arachide	640
jachère	903

Annexe 30 Surfaces (en ha) bénéficiant de la mise en jachère et de la fumure animale (durant la saison sèche 1996-97 et pendant le parcage de nuit seulement) dans le système agropastoral du village de Sare Yorobana.

Intensité de culture	Intensité de fumure (tMS ha ⁻¹)									
	0,00	>0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	6-7	7-8	8-9	>9
0-0.1	6,9									
0.1-0.2	3,8	0,5								
0.2-0.3	3,2									
0.3-0.4	11,0									
0.4-0.5	12,2	0,2								
0.5-0.6	8,5	1,7								
0.6-0.7	3,4		3,3							
0.7-0.8	5,2		0,7							
0.8-0.9	6,2		0,7			0,7				
0.9-<1	6,3	0,5	0,2							
1	41,6	4,4	2,9	4,1	2,4	5,2	2,3	1,2	0,6	2,6

Annexe 31 Structure de la population et moyens de production de 16 ménages du village de Sare Yorobana.

Type de lignage		Noble					
Case		Amad	Diou	Mama	Mamo	Sali	Seko
Structure de la population en juin 1997							
Population permanente							
Homme	> 59 ans	0	0	1	0	0	0
	15-59 ans	2	6	4	1	3	2
Femme	> 59 ans	0	0	2	0	1	1
	15-59 ans	2	3	4	7	4	3
Total	réel	7	14	32	27	22	12
	unités à nourir [†]	5,5	11,5	21,5	17,5	15	9
	unités de travail [‡]	4,2	7,7	10,2	7,1	6,2	3,7
Population totale (avec employeurs temporaires)							
Total	réel	7	16	37	30	24	13
	unités à nourir [†]	5,5	13,5	26,5	20,5	17	10
	unités de travail [‡]	4,2	9,7	15,2	10,1	8,2	4,7
Moyen de production							
Cheptel	(en UBT [‡])	0	79	71	100	49	31
Equipement	charrue	1	3	6	3	3	2
	sarcloir	1	2	4	3	2	2
	semoir	0	2	4	2	2	1
	charrette	0	2	3	1	1	1

[†] voir 4.2.2.2. pour la méthode de calcul.

[‡] unité de bétail tropical (1UBT = 250 kg de poids vif).

Annexe 31 (suite)

Type de lignage		Captif			
Case		Awa	Doud	Fode	Isa
Structure de la population en juin 1997					
Population permanente					
Homme	> 59 ans	0	1	0	1
	15-59 ans	1	0	6	6
Femme	> 59 ans	0	0	0	0
	15-59 ans	1	1	2	6
Total	réel	4	3	17	22
	unités à nourir [†]	3	2,5	12,5	17,5
	unités de travail [‡]	1,7	0,5	8,2	10,2
Population totale (avec employeurs temporaires)					
Total	réel	4	4	17	22
	unités à nourir [†]	3	3,5	12,5	17,5
	unités de travail [‡]	1,7	1,5	8,2	10,2
Moyen de production					
Cheptel	(en UBT [‡])	0	0	0	0
Equipement	charrue	1	1	2	1
	sarcloir	1	1	2	0
	semoir	0	1	1	0
	charrette	0	1	0	0

[†] voir 4.2.2.2. pour la méthode de calcul.

[‡] unité de bétail tropical (1UBT = 250 kg de poids vif).

Annexe 32 Corrélation de Spearman entre les variables descriptives de la structure de 16 des 18 ménages de Sare Yorobana.

	UBT	SP	%Sali	%Srent	%Sjach
UBT	1,00 ***	0,80 ***	0,05	0,12	-0,05
SG	0,80 ***	1,00 ***	-0,23	-0,20	0,27
%Sali	0,05	-0,23	1,00 ***	0,78 ***	-0,94 ***
%Srent	0,12	-0,20	0,78 ***	1,00 ***	-0,93 ***
%Sjach	-0,05	0,27	-0,94 ***	-0,93 ***	1,00 ***
UBT/adu	0,99 ***	0,75 ***	0,13	0,20	-0,13
SG/adu	0,63 **	0,66 **	-0,11	-0,17	0,19
UTSai/UTTot	0,59 *	0,28	0,29	0,19	-0,23
Equ/UTPerm	0,38	0,08	0,07	-0,14	0,05
UTPerm/UNPerm	-0,22	-0,04	-0,06	0,08	0,01

	UBT/adu	SP/adu	UTSai/UTTot	Equ/UTPm	UTPm/UNPm
UBT	0,99 ***	0,63 **	0,59 *	0,38	-0,22
SP	0,75 ***	0,66 **	0,28	0,08	-0,04
%Sviv	0,13	-0,11	0,29	0,07	-0,06
%Srent	0,20	-0,17	0,19	-0,14	0,08
%Sjach	-0,13	0,19	-0,23	0,05	0,01
UBT/adu	1,00 ***	0,61 *	0,63 **	0,42	-0,21
SP/adu	0,61 *	1,00 ***	0,67 **	0,53 *	-0,27
UTSai/UTTot	0,63 **	0,67 **	1,00 ***	0,79 ***	-0,58 *
Equ/UTPm	0,42	0,53 *	0,79 ***	1,00 ***	-0,49
UTPm/UNPm	-0,21	-0,27	-0,58 *	-0,49	1,00 ***

« : » correspond au rapport entre deux variables.

Adu : taille de la population adulte (âgée de 15 ans et plus). Equ : équipement (voir 4.2.2.2.). SP : surface possédée. UNPm : unité à nourrir permanente (voir 4.2.2.2.). UBT : taille du troupeau (en unités de bétail tropical). UT : unité de travail (voir 4.2.2.2.). Pm/Sai/Tot : population permanente, saisonnière, totale. %SJach, %SViv, %Srent : distribution respective des surfaces allouées à la jachère, à l'alimentation et aux cultures de rente (en % de la SP).

Annexe 33 Données utilisées pour l'analyse en composantes principales de la structure de 16 des 18 ménages de Sare Yorobana.

« : » correspond au rapport entre deux variables.

Type de lignage	Noble					
Case	Amad	Diou	Mama	Mamo	Sali	Seko
UBT	0,0	79,3	70,5	99,6	49,1	31,2
SP	4,6	12,2	22,6	15,2	10,2	4,9
UBT/Adu	0,00	8,81	6,41	12,45	6,14	5,20
SP/Adu	1,15	1,35	2,05	1,90	1,27	0,82
UTSai/UTPm	0,00	0,21	0,33	0,30	0,24	0,21
Equ/UTPm	0,48	0,91	1,37	1,13	1,13	1,35
UTPm/UNPm	0,76	0,67	0,47	0,41	0,41	0,41
%SViv	45,6	28,6	31,6	34,8	39,5	43,9
%SRent	38,5	45,3	36,0	38,4	39,8	44,1
%Sja	15,9	26,1	32,3	26,8	20,6	12,0

Type de lignage	Captif									
Case	Awa	Doud	Fode	Isa	SaDI	Said	SaWA	Soul	Tidi	Yaou
UBT	9,1	0,0	21,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,4	36,0
SP	14,0	2,9	7,3	7,2	2,8	3,1	1,0	7,9	11,0	14,7
UBT/Adu	0,57	0,00	3,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,43	3,00
SP/Adu	0,87	1,45	1,22	1,19	0,22	0,79	0,48	0,99	1,37	1,23
UTSai/UTPm	0,00	0,67	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Equ/UTPm	0,21	6,00	0,68	0,44	0,10	0,00	1,18	0,61	0,80	0,24
UTPm/UNPm	0,61	0,20	0,66	0,47	0,58	0,62	0,57	0,66	0,63	0,49
%SViv	19,3	23,4	41,5	35,2	37,0	29,5	70,6	28,4	19,7	16,9
%SRent	21,6	19,0	45,7	40,4	56,8	38,6	29,4	15,8	25,6	9,9
%Sja	59,1	57,6	12,8	24,5	6,3	31,8	0,0	55,9	54,7	73,2

« : » correspond au rapport entre deux variables.

Adu : taille de la population adulte (âgée de 15 ans et plus). Equ : équipement (voir 4.2.2.2.). SP : surface possédée. UNPm : unité à nourrir permanente (voir 4.2.2.2.). UBT : taille du troupeau (en unités de bétail tropical). UT : unité de travail (voir 4.2.2.2.). Pm/Sai/Tot : population permanente, saisonnière, totale. %SJac, %SViv, %Srent : distribution respective des surfaces allouées à la jachère, à l'alimentation et aux cultures de rente (en % de la SP).

a. Cercles de corrélation des variables et projections des individus-concessions (1ère et 3ème CP).

Inertie relative : cp1 : 40% - cp2 : 25% - cp3 : 22%

[illegible]

b. Valeurs propres

Axe	Valeurs propres
1	4,51
2	2,28
3	1,42
4	0,73
5	0,45
6	0,32
7	0,15
8	0,13
9	0,01
10	0,01

Annexe 35 Rendement (tMS ha⁻¹) des composantes de la biomasse récoltable des cultures de :
a. arachide; b. mil ; c. maïs ; d. sorgho ; e. riz.

a. Arachide

Parcelle	Placeau	Racine		Fane		Adventice		Gousse	
		fine	épaisse	tige	feuille	ligneuse	herbacée	grain	coque
AR01	1	0,392	0,372	0,74	0,26	0,08	0,07	0,14	0,07
	2	0,524	1,419	1,07	0,58	0,04	0,08	0,56	0,26
	3	0,761	3,331	1,33	0,56	0,41	0,43	0,68	0,25
	4	0,409	0,020	1,15	0,37	0,00	0,18	0,47	0,22
AR02	1	0,363	0,032	1,36	0,43	0,00	0,25	0,85	0,38
	2	0,485	0,093	2,31	0,47	0,04	0,27	1,17	0,45
	3	0,541	0,020	1,24	0,47	0,00	0,16	0,62	0,33
	4	0,729	0,020	0,81	0,34	0,04	0,80	0,69	0,26
AR03	1	0,709	0,406	0,70	0,42	0,82	0,62	0,45	0,19
	2	0,479	0,000	0,58	0,48	0,27	0,57	0,23	0,12
	3	0,758	0,000	0,67	0,57	0,04	0,40	0,88	0,34
	4	0,495	0,000	0,82	0,34	0,03	0,25	0,52	0,21
AR04	1	0,643	0,020	1,33	0,53	1,30	1,20	1,23	0,08
	2	0,698	0,020	1,37	0,55	0,44	0,20	0,93	0,35
	3	0,654	0,036	1,54	0,62	2,32	0,17	1,09	0,45
	4	0,748	0,020	0,68	0,27	0,73	0,26	0,59	0,24
AR05	1	0,543	0,000	1,49	0,39	0,00	0,60	0,85	0,36
	2	0,418	0,000	0,91	0,21	0,96	1,53	0,51	0,18
	3	0,472	0,000	0,81	0,28	0,00	0,71	0,22	0,17
	4	0,316	0,000	0,40	0,22	0,00	0,77	0,29	0,11
AR06	1	0,605	0,020	1,00	0,40	0,02	0,85	0,94	0,38
	2	0,763	0,120	1,34	0,54	0,09	0,54	0,85	0,39
	3	0,464	0,020	1,15	0,46	0,01	0,71	0,77	0,29
	4	0,689	0,020	0,82	0,33	0,00	1,05	0,62	0,25
AR07	1			0,78	0,45	0,70	0,26	0,70	0,26
	2			0,96	0,49	0,43	0,21	0,43	0,21
	3			1,17	0,26	0,40	0,16	0,40	0,16
	4			1,34	0,33	0,69	0,27	0,69	0,27

Racines fines : diamètre de 0 à 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises).

b. Mil

Parcelle	Placeau	Racine		Paille	Adventices herbacées	Epi	
		fine	épaisse			graine	non comestible
MI01	1	0,558	0,000	4,75	0,34	1,23	0,568
	2	0,614	0,000	3,61	0,29	0,87	0,465
	3	0,397	0,022	3,45	0,27	0,71	0,349
	4	1,235	0,921	5,72	0,19	0,96	0,491
MI02	1	0,654	0,019	6,42	0,40	1,00	0,564
	2	0,730	0,019	5,23	0,33	1,20	0,766
	3	0,693	0,043	7,53	0,47	1,53	0,579
	4	1,059	0,317	5,93	0,37	1,19	0,578
MI03	1	0,878	0,019	9,18	0,59	1,52	0,727
	2	1,208	0,046	8,52	0,87	1,51	1,075
	3	1,088	0,042	11,28	2,46	1,52	1,031
	4	1,185	0,019	10,33	1,36	1,58	0,761
MI04	1	1,253	1,422	8,62	1,16	1,38	0,756
	2	0,626	0,000	8,58	1,15	1,86	1,060
	3	1,938	1,508	9,70	1,30	1,84	0,977
	4	0,499	0,000	11,59	1,55	1,23	0,652
MIxMA01	1			2,22	1,41	0,38	0,38
	2			4,10	0,99	0,54	0,45
	3			5,56	0,90	0,77	0,89
	4			3,62	1,90	1,01	0,59
MIxMA02	1			7,34	3,15	0,83	0,78
	2			2,74	4,04	0,40	0,29
	3			2,76	3,49	0,49	0,42
	4			4,54	2,70	0,59	0,77

c. Maïs

Parcelle	Placeau	Racine		Tige	Adventices herbacées	Epi		
		fine	épaisse			grain	spathe	rafle
MA01	1	0,290	0,000	5,61	1,23	2,51	0,42	0,63
	2	0,243	0,000	3,85	1,73	2,79	0,44	0,81
	3	0,358	0,000	4,60	1,42	1,91	0,37	0,59
	4	0,299	0,049	4,77	1,12	3,00	0,44	0,73
MA02	1	0,280	0,000	5,83	1,36	4,34	0,58	1,32
	2	0,209	0,039	4,80	1,40	4,21	0,72	1,27
	3	0,397	0,000	5,08	0,85	3,88	0,94	0,95
	4	0,475	0,085	5,13	0,29	2,96	0,54	0,73
MIxMA01	1			2,00		0,82	0,11	0,23
	2			2,67		2,01	0,32	0,52
	3			3,04		2,20	0,29	0,61
	4			2,40		1,58	0,18	0,39
MIxMA02	1			1,35		1,03	0,16	0,20
	2			1,24		0,59	0,09	0,14
	3			1,43		0,66	0,10	0,16
	4			1,03		0,56	0,10	0,14

Racines fines : diamètre de 0 à 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises).

d. Sorgho

Parcelle	Placeau	Tige	Adventices herbacées	Epi	
				grain	non comestible
SO01	1	8,44	0,72	1,99	0,90
	2	2,38	2,01	0,48	0,21
	3	9,22	0,95	2,46	1,48
	4	4,52	1,31	0,97	0,55
SO02	1	16,38	0,23	2,26	0,84
	2	11,28	0,48	1,72	0,74
	3	15,37	1,62	2,12	1,21
	4	10,80	2,80	1,57	0,82

e. Riz

Parcelle	Placeau	Racine		Tige	Adventices herbeuses	Epi	
		fine	épaisse			grain	non comestible
RI01	1	5,35	0,110	2,31	0,08	0,64	0,72
	2	3,49	0,073	2,50	0,14	0,69	0,53
	3	4,88	0,108	1,67	0,09	0,53	0,62
	4	3,78	0,120	2,17	0,05	0,94	0,53
RI02	1	2,21	0,000	4,82	0,48	2,60	1,75
	2	2,47	0,000	3,47	0,32	3,40	1,98
	3	1,79	0,082	4,33	0,55	2,33	1,36
	4	2,24	0,043	5,18	0,24	3,02	2,00

Racines fines : diamètre de 0 à 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises).

Annexe 36 Quantités totales et distribution spatiale et verticale de la matière sèche, du carbone, de l'azote et du phosphore (P_{OD}) dans la biomasse des systèmes d'utilisation de l'espace du village.

a. surfaces ; b. matière sèche ; c. carbone ; d. azote; e. phosphore ; f. valeurs de stockage de C, N et POD utilisées pour le calcul des stocks du sol jusqu'à 40 cm de profondeur (issues des Chapitres 2 et 3).

Surface (ha)	Auréole de brousse				Auréole de case				Palmerale				Rizière
	Plateau		Glacis		Glacis		Glacis		Palmerale		Rizière		
	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	
	100,0	44,0		16,7	25,9		0,0	21,4	31,9	16,2			

b. Matière sèche (t ha⁻¹)

	Auréole de brousse				Auréole de case				Palmerale				Rizière	Total non cultivé	Total cultivé	Village	Distribution (%)
	Plateau		Glacis		Glacis		Glacis		Palmerale		Rizière						
	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé					
Ligneux	3042	6	241	1	0	958	0	4242	7	4249							44
Herbe/adventices herb.	329	22	90	17	0	24	96	4	515	67	582						6
Récolte		52		30		23		22		127	127						1
Paille		106		79		74		37		297	297						3
Litière	209		35		0	67		310		310							3
Souche	1227	139	148	34	0	0	0	0	1376	173	1548						16
Racine épaisse	1230	66	83	19	0	5	169	2	1483	92	1575						16
Racine fine	262	29	23	16	0	12	470	69	756	126	881						9
Total	6300	420	621	198	1	137	1759	133	8681	889	9570						100
Distribution(%)	66	4	6	2	0	1	18	1	91	9	100						

c. Carbone (t ha⁻¹)

	Auréole de brousse				Auréole de case				Palmerale				Rizière	Total non cultivé	Total cultivé	Village	Distribution (%)
	Plateau		Glacis		Glacis		Glacis		Palmerale		Rizière						
	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé					
Ligneux	1141	2	91	1	0	0	441	0	1673	3	1676						16
Herbe/adventices herb.	116	8	33	6	0	8	35	1	184	23	207						2
Récolte		22		12		8		7		50	50						0
Paille		38		29		28		11		106	106						1
Litière	68		11		0	22		101		101							1
Souche	451	53	55	13	0	0	0	0	506	66	572						5
Racine épaisse	448	25	29	7	0	2	76	0	554	34	588						6
Racine fine	90	10	8	6	0	4	211	20	309	41	350						3
Sol (0-20 cm)	1538	529	257	306	1	340	317	669	2112	1844	3956						38
Sol (20-40 cm)	1116	491	139	216	0	178	336	445	1591	1330	2922						28
Total 0-20 cm	3853	689	485	379	1	390	1101	710	5440	2167	7607						100
Distribution(%)	51	9	6	5	0	5	14	9	72	28	100						
Total 0-40 cm	4968	1179	624	596	2	568	1438	1155	7031	3498	10529						100
Distribution(%)	47	11	6	6	0	5	14	11	67	33	100						

d. Azote (kg ha^{-1})

	Auréole de brousse				Auréole de case				Palmerale	Rizière	Total non cultivé	Total cultivé	Village	Distribution (%)	
	Plateau		Glacis		Glacis		Non cultivé								
	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé							
Ligneux Herbe/adventices herb. Récolte Paille	12583	277	1202	67	3	0	7950	0			21739	345	22083	6	3
	2138	254	529	211	1	311	629	36			3297	812	4109	1	1
		1203		594		297		137				2230	2230	1	0
		1074		508		260		151				1993	1993	1	0
Litière	1076		179		0		344				1600		1600	0	0
Souche	4835	482	559	118	1	0	0				5396	600	5995	2	1
Racine épaisse	4644	252	390	95	1	49	1352	13			6386	408	6795	2	1
Racine fine	2115	395	183	205	0	129	3757	521			6056	1251	7307	2	1
Sol (0-20 cm)	128257	43495	21389	25723	51	28728	27473	61568			177170	159514	336684	87	52
Sol (20-40 cm)	102429	45059	12470	19382	30	16010	29171	37408			144100	117859	261959	40	40
Total 0-20 cm	155648	47432	24431	27521	59	29774	41505	62426			221642	167153	388795	100	
Distribution(%)	40	12	6	7	0	8	11	16			57	43	100		
Total 0-40 cm	258077	92491	36901	46903	89	45783	70676	99834			365742	285012	650754	100	
Distribution(%)	40	14	6	7	0	7	11	15			56	44	100		

e. Phosphore (total dans la plante, disponible dans le sol) (kg ha^{-1})

	Auréole de brousse				Auréole de case				Palmerale	Rizière	Total non cultivé	Total cultivé	Village	Distribution (%)
	Plateau		Glacis		Glacis		Non cultivé							
	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé	Non cultivé	Cultivé						
Ligneux	1501	28	112	7	0	0	0	0	0	1614	34	1648	26	19
Herbe/adventices herb.	195	28	50	28	0	47	0	8	8	245	112	357	6	4
Récolte		109		65		54		29	29		257	257	4	3
Paille		112		66		62		35	35		275	275	4	3
Litière	3		1		0		0			4		4	0	0
Souche	338	0	35	0	0	0	0	0	0	372	0	372	6	4
Souche	380	15	25	6	0	3	0	1	1	405	25	430	7	5
Racine épaisse	113	13	11	3	0	0	0	0	0	124	16	139	2	2
Racine fine	718	280	120	171	0	643	0	913	913	838	2006	2844	45	32
Sol (0-20 cm)	428	208	71	127	0	426	0	1304	1304	500	2085	2565	41	26
Sol (20-40 cm)	3248	583	352	347	1	809	1	987	987	3601	2726	6327	100	
Total 0-20 cm	51	9	6	5	0	13	0	16	16	57	43	100		
Distribution(%)														
Total 0-40 cm	3676	792	424	473	1	1235	1	2291	2291	4101	4791	8892	100	
Distribution(%)	41	9	5	5	0	14	0	26	26	46	54	100		

t : horizon du sol pour lequel les stocks de C, N et POD du sol ont été pris en compte. Les résultats pour les racines ont toujours été calculés jusqu'à 40 cm de profondeur. Racines fines : diamètre de 0 à 2 mm. Racines épaisses : diamètre supérieur à 2 mm (souches non comprises).

Annexe 36 (suite) f. Stocks de carbone, d'azote et de phosphore assimilable dans le sol par hectare utilisés pour le calcul des stocks dans l'horizon 20-40 cm du sol du village (issu des Chapitres 2 et 3).

Unité géomorphologique	Glacis	Plateau	Bas fond
C (t ha ⁻¹)	8,3	11,2	27,4
N (kg ha ⁻¹)	748	1024	2306

Auréole	Case; contiguë à une concession:		Brousse		Bas fond
	oui	non	culture	jachère	
P _{OD} (kg ha ⁻¹)	46,5	13,1	4,7	4,3	80,4

Annexe 37 Autosuffisance en fumier et en fourrage des concessions de Sare Yorobana selon un bilan agropastoral simplifié.

Case	Taille du troupeau (moyenne sur déc 96-juin 97)	Poids métabolique du troupeau (moyenne sur déc 96-juin 97)	Stock de fourrage	Besoin en fourrage	Fourrage disponible / besoin	Surface en culture et céréales inondées	Production de fumier pendant la nuit	Besoin en fumier
Unité	(UBT)	(kg)	(tMS)	(tMS)		(ha)	(tMS)	(tMS)
Calcul	(1)	(2)	(3)	(4)=(2)*MOVI/10 ³	(5)=(3)/(4)	(6)	(7)=(2)*MOFE/10 ³ *0,53	(8)=(7)/(6)*2,5
Amad	0	0	16,0	0,0	nd	1,6	0,0	0,00
Diou	79	5526	46,9	85,0	0,6	3,4	25,6	3,04
Mama	71	4870	118,2	74,9	1,6	6,4	22,6	1,42
Mamo	100	6907	72,3	106,3	0,7	5,3	32,0	2,42
Sali	49	3381	48,7	52,0	0,9	4,7	15,7	1,35
SaBA	0	0	8,7	0,0	nd	0,4	0,0	0,00
Seko	31	2167	17,2	33,3	0,5	2,3	10,0	1,76
Tidi	9	634	62,9	9,8	6,5	2,9	2,9	0,41
Doud	0	0	18,0	0,0	nd	0,8	0,0	0,00
SaDI	21	1471	24,5	22,6	1,1	2,4	6,8	1,14
Yaou	0	0	27,2	0,0	nd	1,9	0,0	0,00
Isa	0	0	16,2	0,0	nd	1,2	0,0	0,00
Said	0	0	11,7	0,0	nd	0,8	0,0	0,00
Awa	0	0	3,5	0,0	nd	0,9	0,0	0,00
Fode	0	0	37,4	0,0	nd	2,2	0,0	0,00
SaWA	20	1344	48,7	20,7	2,4	2,2	6,2	1,15
Soul	36	2463	70,0	37,9	1,8	2,5	11,4	1,84
Village	416	28762	648,2	442,6	1,5	42	133,3	1,28

† voir Chapitre 5 ; MOVI=15,4 kg de matière sèche par kilo de poids métabolique (de Décembre à Juin) ; MOFE=8,7 kg de matière sèche par kilo de poids métabolique (de décembre à juin).
Source : ISRA/CIRAD-EMVT, Programme ABT.

Annexe 38 Analyse de la sensibilité du stockage de carbone à la valeur seuil de l'intensité de culture (IC) déterminant la biomasse adventice ligneuse dans les parcelles cultivées.

Composante	Variation du seuil d'IC	
	-10%	+10%
Champs cultivés		
Ligneux	-6,9	23,0
Souche	-6,9	23,0
Racine épaisse	-6,0	19,8
Biomasse souterraine	-4,7	15,5
Biomasse	-2,1	7,0
Ecosystème	-0,2	0,6
Ensemble du terroir villageois		
Ligneux	0,0	0,0
Souche	-0,8	2,6
Racine épaisse	-0,3	1,2
Biomasse souterraine	-0,4	1,5
Biomasse	-0,2	0,6
Ecosystème	-0,1	0,2

Variation relative (en %) du stock de matière sèche dans différents compartiments.

Annexe 39 Evolution de l'utilisation de l'espace (données en ha) dans le village de Sare Yorobana pour la période 1997-2047 selon les prévisions d'un modèle statique (voir la description dans 4.2.4.).

R0 N0														
Année	1997	1998	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021
Céréales pluviales	47	45	46	50	53	57	61	65	69	74	79	84	89	94
Arachide	44	45	46	49	51	54	57	59	62	66	69	72	76	80
Jachères jeunes	51	51	52	55	59	62	66	70	74	69	61	52	43	34
Jachères âgées	66	67	63	54	45	35	25	14	3	0	0	0	0	0

R30 N0														
Année	1997	1998	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021
Céréales pluviales	47	35	34	36	38	41	44	47	50	54	57	61	65	69
Arachide	44	45	46	49	51	54	57	59	62	66	69	72	76	80
Jachères jeunes	51	45	45	47	50	53	56	60	63	67	71	75	67	59
Jachères âgées	66	83	83	76	68	60	51	42	32	22	11	0	0	0

R100 N0														
Année	1997	1998	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021
Céréales pluviales	47	23	20	20	21	23	24	26	28	30	32	34	36	39
Arachide	44	45	46	49	51	54	57	59	62	66	69	72	76	80
Jachères jeunes	51	38	37	38	41	43	45	48	51	54	57	60	63	66
Jachères âgées	66	102	105	101	95	89	82	74	67	59	51	42	33	23

R30 N30														
Année	1997	1998	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021
Céréales pluviales	47	49	49	51	55	58	62	66	70	74	79	84	89	94
Arachide	44	59	60	63	67	70	74	77	81	85	90	94	99	104
Jachères jeunes	51	61	61	64	68	72	73	65	57	48	40	30	21	10
Jachères âgées	66	39	38	29	19	8	0	0	0	0	0	0	0	0

R100 N30														
Année	1997	1998	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021
Céréales pluviales	47	32	28	29	31	33	35	37	39	42	45	47	50	53
Arachide	44	59	60	63	67	70	74	77	81	85	90	94	99	104
Jachères jeunes	51	51	50	52	54	58	61	64	68	71	74	67	59	51
Jachères âgées	66	66	69	64	56	48	39	30	20	9	0	0	0	0

Annexe 39 (suite)

R0 N0														
Année	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045	2047	
Céréales pluviales	100	106	113	119	126	134	142	150	158	167	177	187	208	
Arachide	84	88	93	89	82	74	67	58	50	41	31	21	0	
Jachères jeunes	24	14	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Jachères âgées	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

R30 N0														
Année	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045	2047	
Céréales pluviales	73	77	82	87	92	98	103	109	116	122	129	137	144	
Arachide	84	88	93	97	102	108	105	99	92	86	79	71	64	
Jachères jeunes	51	42	33	24	13	3	0	0	0	0	0	0	0	
Jachères âgées	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

R100 N0														
Année	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045	2047	
Céréales pluviales	41	44	46	49	52	56	59	62	66	70	74	78	83	
Arachide	84	88	93	97	102	108	113	119	125	131	134	130	125	
Jachères jeunes	70	74	69	61	53	45	36	27	17	7	0	0	0	
Jachères âgées	13	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

R30 N30														
Année	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045	2047	
Céréales pluviales	99	105	111	118	124	132	139	147	155	164	173	182	192	
Arachide	109	103	97	90	84	76	69	61	53	44	35	26	16	
Jachères jeunes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Jachères âgées	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

R100 N30														
Année	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045	2047	
Céréales pluviales	57	60	63	67	71	75	80	84	89	94	99	105	110	
Arachide	109	115	121	127	133	133	129	124	119	114	109	103	98	
Jachères jeunes	42	33	24	14	4	0	0	0	0	0	0	0	0	
Jachères âgées	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

«R» correspond à l'accroissement relatif (%) du rendement des céréales comparé à sa valeur de 1997.

«N» correspond à l'accroissement relatif (%) du niveau de vie comparé à celui de 1997.

Annexe 40 Evolution du stockage de carbone (tC) dans le système plante-sol du territoire du village de Sare Yorobana pour la période 1997-2047 selon les estimations obtenues après modélisation (voir la description dans 4.2.4.).

Année	1997	1998	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021
Biomasse végétale aérienne														
R=0, N=0	1644	1656	1614	1509	1396	1277	1153	1022	884	816	767	715	661	604
R=30, N=0	1644	1849	1845	1765	1670	1569	1464	1353	1236	1114	985	850	801	752
R=100, N=0	1644	2075	2107	2061	1989	1910	1826	1739	1647	1550	1449	1342	1230	1113
R=30, N=30	1644	1323	1306	1198	1074	944	833	786	737	685	630	573	512	449
R=100, N=30	1644	1641	1678	1614	1519	1416	1308	1194	1075	949	829	783	735	684
Biomasse végétale souterraine														
R=0, N=0	1215	1225	1193	1110	1020	926	827	723	614	564	529	493	455	415
R=30, N=0	1215	1385	1383	1320	1245	1166	1083	996	904	807	706	600	566	532
R=100, N=0	1215	1571	1598	1564	1508	1446	1382	1314	1242	1167	1088	1005	918	826
R=30, N=30	1215	970	959	874	776	673	588	556	522	486	449	409	368	325
R=100, N=30	1215	1232	1264	1216	1142	1062	978	890	797	699	606	576	544	511
Biomasse végétale et sol														
R=0, N=0	6495	6517	6437	6235	6017	5789	5549	5298	5033	4896	4792	4683	4569	4449
R=30, N=0	6495	6889	6881	6727	6544	6351	6148	5934	5710	5475	5227	4968	4866	4763
R=100, N=0	6495	7324	7385	7297	7158	7006	6846	6677	6501	6315	6120	5915	5700	5473
R=30, N=30	6495	5876	5845	5637	5399	5148	4933	4834	4730	4621	4506	4386	4259	4126
R=100, N=30	6495	6489	6560	6437	6254	6057	5849	5630	5400	5159	4926	4830	4729	4623

Année	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045	2047
Biomasse végétale aérienne													
R=0, N=0	543	480	414	401	406	412	417	423	430	436	443	451	466
R=30, N=0	701	647	591	532	469	404	389	394	398	403	408	414	419
R=100, N=0	989	859	797	750	700	648	593	535	475	411	368	371	374
R=30, N=30	386	391	395	400	405	410	415	421	427	434	440	447	455
R=100, N=30	631	575	517	455	391	368	372	375	379	382	386	390	394
Biomasse végétale souterraine													
R=0, N=0	372	328	282	266	260	255	249	242	236	229	221	214	197
R=30, N=0	497	461	422	381	339	294	278	274	269	264	258	252	246
R=100, N=0	730	629	585	554	522	487	451	413	373	332	301	298	294
R=30, N=30	281	277	272	267	262	256	251	245	238	231	224	217	209
R=100, N=30	476	440	401	361	318	300	297	293	290	286	282	277	273
Biomasse végétale et sol													
R=0, N=0	4322	4190	4050	4022	4031	4042	4052	4064	4075	4088	4101	4114	4144
R=30, N=0	4656	4543	4424	4299	4169	4031	4000	4008	4017	4026	4036	4046	4056
R=100, N=0	5236	4986	4861	4761	4657	4548	4433	4312	4185	4051	3959	3965	3971
R=30, N=30	3994	4002	4011	4020	4029	4039	4049	4060	4071	4083	4095	4108	4122
R=100, N=30	4512	4395	4273	4144	4008	3961	3967	3973	3980	3987	3994	4002	4010

«R» correspond à l'accroissement relatif (%) du rendement des céréales comparé à sa valeur de 1997.

«N» correspond à l'accroissement relatif (%) du niveau de vie comparé à celui de 1997.

Annexe 41 Flux anthropogéniques de carbone, d'azote et de phosphore établis entre novembre 1996 et novembre 1997 à Sare Yorobana : a. valeurs absolues ; b. répartition selon la source ; c. répartition selon le site.
 Les flux dus au bétail concernent la saison sèche uniquement.

a. Quantités en valeur absolue.

	Auréole de savane				Auréole de brousse							
	Sav. arborée		Sav. arbustive		Sav. herbacée		Total		Jachère		Rente	
	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie
Matière sèche (t)												
Récolte	13	46	2	7	21	79	36	132	11	36	15	41
Bétail											58	63
Bois											84	140
Chaume	nd		nd		8		8		nd		70	72
Résidus					nd							
Total	13	46	2	7	21	87	36	140	11	122	17	148
<i>Différence</i>												
	-34		-5		-65		-104		-130		+35	
Carbone (t)												
Récolte	5	16	1	2	9	27	15	45	5	12	6	14
Bétail											24	23
Bois											35	49
Chaume	nd		nd		3		3		nd		26	28
Résidus					nd							
Total	5	16	1	2	9	30	15	48	5	45	8	56
<i>Différence</i>												
	-11		-2		-21		-34		-48		+17	
Azote (kg)												
Récolte	383	958	57	143	649	1623	1089	2723	357	780	481	864
Bétail											2634	1348
Bois											200	
Chaume					57		57					
Résidus												
Total	383	958	57	143	649	1680	1089	2780	357	980	481	3207
<i>Différence</i>												
	-575		-85		-1031		-1691		-2726		+927	
Phosphore (kg)												
Récolte	31,7	61,3	4,8	9,3	53,8	104,1	90,3	174,7	28,8	48,3	39,1	54,0
Bétail											147,4	81,6
Bois											215,4	183,8
Chaume					6		6					
Résidus												
Total	32	61	5	9	54	110	90	180	29	107	39	202
<i>Différence</i>												
	-30		-5		-56		-90		-163		-4	
Surface (ha)	171		175		99		445		42		28	

a. Quantités en valeur absolue (suite).

	Auréole de case						Ferme				Rivière				Hors village				Autre				Village				Total			
	Jachère		Rente		Alimentation		Total		Entrée		Sortie		Village		Entrée		Sortie		Total		Entrée		Sortie		Entrée		Sortie			
	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie		
Matière sèche (t)																														
Récolte	1	3	0	0	54	24	54	27	129	81	22	81	22	21	22	81	27	102	4	14	178	216	239	443	184	265				
Bétail					88	52	88	55	86	86	6	86	6	21											86	172				
Bois																														
Chaux					8		8		8	8											8									
Résidus	nd		2	2	42		45				20				nd		20													
Total	1	3	2	3	193	76	196	81	223	175	26	43	22	43	22	81	47	124	4	14	378	487	662	897						
Différence	-2		-1		+117		+114		+48		-17		-59		-10		-77		-109		-235									
Carbone (t)																														
Récolte			1	18	8		18	10	44	27	7	27	7	6	9	25	11	31	2	5	73	75	98	150	19	69				
Bétail	0	1	0	0	36	19	36	20	32	32	2	32	2	6																
Bois																														
Chaux					3		3		3	3											3									
Résidus	nd		1	15	17		17				6				nd		6													
Total	0	1	1	73	27	74	29	74	79	62	9	13	9	13	9	25	18	38	2	5	146	177	171	255						
Différence	-1		0		+46		+45		+17		-5		-16		-4		-21		-31		-84									
Azote (kg)																														
Récolte			61	1193	289		1193	351	1704	1193	137	137	137	451	683	1730	861	2181	125	313	1193	3190	1193	3190						
Bétail	23	60	1	1	2762	1109	2786	1171	200	200	178	451	178	451																
Bois																														
Chaux					57		57		57	57																				
Total	23	60	1	63	4011	1399	4035	1521	1961	1450	178	587	683	1730	861	2317	861	2317	125	313	7685	8003	9583	12825						
Différence	-37		-62		+2613		+2514		+511		-409		-1047		-188		-1456		-317		-3243									
Phosphore (kg)																														
Récolte			7	99	57		99	64	198	99	29	29	29	27.9	55.3	107.0	69.7	134.8	10.3	19.9	454.5	281.9	610.3	583.5						
Bétail	1.8	3.5	0.0	0.1	222.9	66.7	224.8	70.2	138	99	14.4	27.9	14.4	27.9																
Bois					59		59		59	59																				
Chaux					6		6		6	6											6									
Total	2	3	0	7	386	124	388	134	262	163	14	57	14	57	55	107	70	164	10	20	617	652	773	959						
Différence	-2		-7		+262		+254		+99		-43		-52		-10		-95		-34		-186									
Surface (ha)	0		2		19		21		16		62		81		224		812													

b. Distribution selon la source.

	Auréole de savane				Auréole de brousse							
	Sav. arborée		Sav. arbutive		Sav. herbacée		Total		Jachère		Rente	
	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie
Matière sèche (%)												
Récolte	100	100	100	100	100	91	100	94	100	94	72	0
Bétail											28	45
Bois											70	68
Chaume	nd	nd	nd	nd	nd	9	6					
Résidus	nd	nd	nd	nd	nd				nd		12	55
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Carbone (%)												
Récolte	100	100	100	100	100	91	100	94	100	94	75	0
Bétail											28	48
Bois											72	69
Chaume	nd	nd	nd	nd	nd	9	6					
Résidus	nd	nd	nd	nd	nd				nd		25	52
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Azote (%)												
Récolte	100	100	100	100	100	97	100	98	100	98	73	21
Bétail											27	100
Bois											20	79
Chaume	100	100	100	100	100	3	2					3
Résidus	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Phosphore (%)												
Récolte	100	100	100	100	100	95	100	97	100	97	73	46
Bétail											27	54
Bois											55	100
Chaume	100	100	100	100	100	5	3					13
Résidus	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

c. Distribution géographique.

	Auréole de savane				Auréole de brousse							
	Sav. arborée		Sav. arbutive		Sav. herbacée		Total		Jachère		Rente	
	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie
Matière sèche (%)	2	5	0	1	3	10	5	16	2	14	3	16
Carbone (%)	3	6	0	1	5	12	9	19	3	18	5	22
Azote (%)	4	7	1	1	7	13	11	22	4	8	5	25
Phosphore (%)	4	6	1	1	7	11	12	19	4	11	5	21
											19	16
											28	48

b. Distribution selon la source (suite).

Matière sèche (%)	Auréole de case				Femme				Rizière				Autre			
	Jachère		Rente		Vivrier		Total		Village		Hors village		Total		Total	
	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie
Récolte	100	100	98	28	31	28	33	58	46	51	100	100	58	82	18	
Bétail			1	2	46	69	45	67		22	49	100	100	100	100	100
Bois					4		4	4	5							
Chaume	nd		99	22	23		23		78		nd		42		nd	
Résidus			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Carbone (%)																
Récolte	100	100	98	25	31	25	33	56	44	52	100	100	64	82	18	
Bétail			1	2	49	69	49	67		27	48	100	100	100	100	100
Bois					4		4	4	4							
Chaume	nd		99	21	22		22		73		nd		36		nd	
Résidus			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Azote (%)																
Récolte	100	100	98	30	21	30	23	87	82	23				6		
Bétail			100	2	69	79	69	77		100	77	100	100	100	94	100
Bois								10	14							
Chaume				1			1	3	4							
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Phosphore (%)																
Récolte	100	100	99	26	46	25	48	76	61	51				18		
Bétail			100	1	58	54	58	52		100	49	100	100	100	82	100
Bois				15		15		22	36							
Chaume				1		1		2	3							
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

c. Distribution géographique (suite).

Matière sèche (%)	Auréole de case				Femme				Rizière				Autre			
	Jachère		Rente		Vivrier		Total		Village		Hors village		Total		Total	
	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie
Récolte	0	0	0	0	29	8	30	9	4	5	3	9	7	14	1	2
Bétail			0	1	1	43	11	43	12	5	5	10	10	15	1	2
Bois	0	0	0	0	42	11	42	12	2	5	7	13	9	18	1	2
Chaume			0	0	1	50	13	50	14	2	6	7	11	9	17	1
Total	0	0	0	1	50	13	50	14								

Annexe 42 Poids des troupeaux possédés par les concessions.

Propriétaire (code ABT)	96					97						
	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil
Poids vif (kg)												
Diou (MOS)	19193	19543	19968	20270	20318	20324	20241	19943	19702	19206	19022	22051
Mama (BALA)	7466	7832	7916	8014	8162	8429	8662	8705	8778	8786	8598	6917
Mama (MAMA)	9390	9491	9507	9514	9607	9594	9199	8914	8848	8693	8475	10696
Mamo (MAO)	25546	25642	25477	25611	25585	25406	25085	24620	24389	24528	24655	21320
SaDi (DIAO)	5412	5299	5185	5348	5432	5385	5391	5354	5239	5104	5008	3480
Sali (SALI)	11752	11853	11925	12119	12328	12404	12279	12129	12291	12377	12176	10107
SaWA (ALIW)	4682	4840	4958	4963	4984	4933	4883	4968	5052	4967	4210	5357
Seko (SEKO)	8090	8060	8160	8310	8342	8209	7967	7849	7514	7298	7405	8244
Soul (SOUL)	9190	9272	9129	8965	8909	8845	8890	9007	9049	9113	9157	9172
Tidi (LADE)	1903	1973	2165	2334	2498	2438	2260	2181	2193	2206	2206	5770
Poids vif (UBT[†])												
Diou (DIOUB)	77	78	80	81	81	81	81	80	79	77	76	88
Mama (BALA)	30	31	32	32	33	34	35	35	35	35	34	28
Mama (MAMA)	38	38	38	38	38	38	37	36	35	35	34	43
Mamo (MAMO)	102	103	102	102	102	102	100	98	98	98	99	85
SaDi (DIAO)	22	21	21	21	22	22	22	21	21	20	20	14
Sali (SALI)	47	47	48	48	49	50	49	49	49	50	49	40
SaWA (ALIW)	19	19	20	20	20	20	20	20	20	20	17	21
Seko (SEKO)	32	32	33	33	33	33	32	31	30	29	30	33
Soul (SOUL)	37	37	37	36	36	35	36	36	36	36	37	37
Tidi (LADE)	8	8	9	9	10	10	9	9	9	9	9	23
Poids métabolique (kg)												
Diou (DIOUB)	5295	5402	5538	5638	5656	5661	5638	5559	5495	5364	5311	6089
Mama (BALA)	2059	2163	2189	2221	2263	2332	2395	2407	2430	2434	2377	1908
Mama (MAMA)	2559	2591	2605	2615	2643	2640	2533	2456	2439	2399	2339	2962
Mamo (MAMO)	7070	7106	7063	7097	7091	7048	6961	6831	6767	6802	6848	5909
SaDi (DIAO)	1495	1464	1433	1481	1508	1501	1507	1495	1461	1424	1400	973
Sali (SALI)	3210	3237	3257	3317	3382	3412	3383	3342	3384	3407	3360	2781
SaWA (ALIW)	1283	1330	1363	1369	1381	1365	1349	1375	1400	1376	1162	1474
Seko (SEKO)	2216	2222	2260	2304	2314	2279	2210	2177	2089	2034	2064	2273
Soul (SOUL)	2509	2530	2489	2449	2441	2423	2434	2466	2476	2494	2509	2515
Tidi (LADE)	533	550	601	647	691	676	628	606	609	613	613	1577

Source : ISRA/CIRAD-EMVT, Programme ABT.

† UBT = unité de bétail tropical (1 UBT = 250 kg de poids vif)

Annexe 43 Teneur moyenne mensuelle en carbone, en azote et en phosphore (g 100 g⁻¹MS) des déjections bovines à Sare Yorobana.

Mois	C	N [†]	P
Janvier	42,4	1,62	0,27
Février	40,7	1,41	0,24
Mars	38,9	1,44	0,25
Avril	40,2	1,56	0,27
Mai	41,5	1,50	0,24
Juin	42,2	1,62	0,27
Juillet		1,88	
Août		1,91	
Septembre		1,87	
Octobre		1,82	
Novembre	41,5	1,75	0,26
Décembre	41,5	1,53	0,26

† Source : ISRA/CIRAD-EMVT, Programme ABT.

Annexe 44 Temps ($j\ ha^{-1}$) passé par trois troupeaux sur les parcelles du village, selon le propriétaire des terres.

Propriétaire de la parcelle	Propriétaire du troupeau			
	Diao	Mama	Mamo	Total
Amad	3,91	0,18	0,77	4,86
Awa	1,63	0,05	2,10	3,78
Diou	0,19	0,69	0,91	1,79
Doud	1,09	0,08	0,17	1,33
Fode	0,00	0,43	0,35	0,79
Isa	0,28	0,48	0,87	1,63
Mama	0,37	1,28	0,91	2,55
Mamo	0,14	0,44	0,76	1,35
SaBA	0,75	1,02	0,29	2,07
SaDI	2,58	0,14	0,73	3,45
Said	0,00	2,93	2,07	5,00
Sali	0,84	0,04	0,59	1,46
SaWA	0,00	0,80	0,85	1,65
Seko	1,99	0,00	0,11	2,10
Soul	0,01	0,43	0,31	0,75
Tidi	0,71	0,67	0,24	1,61
Yaoou	2,13	0,04	0,15	2,33
None	0,14	0,11	0,17	0,43
Total	0,52	0,40	0,45	1,37

Les valeur supérieures au temps passé par un troupeau sur les parcelles de son propriétaire sont en caractères gras.

Annexe 45 Apport de matière sèche ($t\ ha^{-1}$) aux champs par la fumure pendant le parcage de nuit et en relation avec l'espèce qui sera mise en culture.

Propriétaire	Mil x maïs	Maïs	Mil	Sorgho	Coton	Arachide	Jachère	Toutes parcelles
Amad	10,26		2,62	1,33				2,28
Awa								
Diou		6,21	3,56	0,81	1,73			1,67
Doud			0,44					0,24
Fode								
Isa								
Keba								
Mama	11,13	1,44	2,21	2,19		0,13		1,49
Mamo		6,47	5,55	6,04				2,78
SaBA								
SaDI	8,55		1,75	4,98		0,11		1,41
Said								
Sali	6,29		1,54					1,13
SaWA			3,33		0,61			1,43
Seko	7,02		1,37		0,35			1,66
Soul	2,86		5,55					3,15
Tidi	0,94	1,26	0,49					0,34
Yaou								
None							0,01	0,01

Annexe 46 Entrées et sorties de matière organique dues aux prélèvements et aux déjections animales de trois troupeaux pendant la saison sèche 1995-1996.

Utilisation de l'espace	Biomasse par unité de surface ($tMS.ha^{-1}$)	
	entrées	sorties
Territoire approprié par le village (rizières non comprises)		
Case	0,22	-0,95
Mil	0,18	-0,82
Maïs	0,16	-0,72
Mil (x maïs)	0,13	-0,56
Arachide	0,08	-0,36
Sorgho	0,07	-0,30
Jachère	0,03	-0,12
Total	0,07	-0,32
Espace prospecté par les animaux		
Savane arborée	0,02	-0,09
Savane arbustive	0,00	-0,01
Savane herbacée	0,06	-0,27
Auréole de brousse	0,06	-0,26
Auréole de case	0,19	-0,84
Rizièr	0,10	-0,45
Champ cultivé extérieur	0,01	-0,06
Mare	0,11	-0,49
Total	0,04	-0,19

Annexe 47 Rendement en mil en fonction des pratiques de fumure dans les auréoles de case et de brousse.

Code parcelle		Intensité de fumure (tMO ha ⁻¹)	Rendement grain du mil (tMS ha ⁻¹)
Case			
11	a	0,00	0,50
17	b	6,69	0,84
18	a	2,14	0,27
23	a	3,46	0,82
28	c	0,00	0,62
72	b	2,18	0,57
73	a	0,00	0,58
79	a	2,60	0,69
80	c	0,98	0,27
81	c	0,00	0,27
89	b	4,80	0,52
90	a	10,40	0,98
90	e	5,13	0,98
91	a	1,83	1,22
Brousse			
19	a	0,83	0,35
20	a	0,34	0,49
22	e	0,39	0,82
24	d	1,93	0,31
33	a	1,38	0,21
41	b	0,12	0,60
48	a	1,30	0,66
53	a	3,23	0,99
87	a	5,64	1,26
88	c	3,53	1,83
88	g	2,81	0,43

Annexe 48 Evolution des sorties de carbone anthropogénique (tC) et rapport entre sortie et stock de C dans la biomasse aérienne végétale du terroir de Sare Yorobana pour la période 1997-2047 selon les prévisions de la modélisation (voir la description du modèle dans le Chapitre 4).

Les sorties considérées sont : la biomasse des cultures récoltées, les prélèvements du bétail pendant la saison sèche et la collecte du bois.

Année	1997	1998	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021
Flux anthropogénique (tC)														
R=0, N=0	258	263	270	283	298	313	329	345	363	381	400	421	442	464
R=30, N=0	258	259	265	278	292	307	322	339	356	374	392	412	433	455
R=100, N=0	258	255	260	272	286	300	315	331	347	365	383	402	423	444
R=30, N=30	258	326	333	350	367	386	405	426	447	470	494	518	545	572
R=100, N=30	258	319	326	341	358	376	395	415	436	458	481	505	530	557
Flux anthropogénique / stock														
R=0, N=0	0,16	0,16	0,17	0,19	0,21	0,24	0,29	0,34	0,41	0,47	0,52	0,59	0,67	0,77
R=30, N=0	0,16	0,14	0,14	0,16	0,17	0,20	0,22	0,25	0,29	0,34	0,40	0,49	0,54	0,60
R=100, N=0	0,16	0,12	0,12	0,13	0,14	0,16	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26	0,30	0,34	0,40
R=30, N=30	0,16	0,25	0,26	0,29	0,34	0,41	0,49	0,54	0,61	0,69	0,78	0,91	1,06	1,27
R=100, N=30	0,16	0,19	0,19	0,21	0,24	0,27	0,30	0,35	0,41	0,48	0,58	0,65	0,72	0,81

Année	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045	2047
Flux anthropogénique (tC)													
R=0, N=0	488	513	539	557	572	588	606	624	642	662	683	705	721
R=30, N=0	478	502	527	554	582	611	633	653	673	695	718	742	767
R=100, N=0	466	490	514	540	567	596	626	657	690	725	758	784	811
R=30, N=30	600	618	637	657	678	700	723	747	772	799	827	856	887
R=100, N=30	585	615	646	678	712	741	766	792	820	849	880	912	946
Flux anthropogénique / stock													
R=0, N=0	0,90	1,07	1,30	1,39	1,41	1,43	1,45	1,47	1,50	1,52	1,54	1,57	1,55
R=30, N=0	0,68	0,78	0,89	1,04	1,24	1,51	1,63	1,66	1,69	1,72	1,76	1,79	1,83
R=100, N=0	0,47	0,57	0,64	0,72	0,81	0,92	1,06	1,23	1,45	1,76	2,06	2,12	2,17
R=30, N=30	1,55	1,58	1,61	1,64	1,67	1,71	1,74	1,77	1,81	1,84	1,88	1,91	1,95
R=100, N=30	0,93	1,07	1,25	1,49	1,82	2,01	2,06	2,11	2,17	2,22	2,28	2,34	2,40

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1	Localisation des parcelles échantillonnées et typologie locale des champs à Sare Yorobana.	249
Annexe 2	Caractéristiques des parcelles du village de Sare Yorobana (rizière non comprise) en 1997.	250 - 252
Annexe 3	Statistiques élémentaires des précipitations, de l'évapotranspiration potentielle et de la température de la station de Kolda, 1978-1997.	253
Annexe 4	Description de quatre profils pédologiques typiques le long d'une toposéquence dans le village de Sare Yorobana.	254 - 256
Annexe 5	Biomasse moyenne des racines de 9 parcelles de jachère utilisées pour comparer les techniques par excavation complète et par tarière.	257
Annexe 6	Teneur en carbone, en azote et en phosphore de quelques composantes végétales aériennes et souterraines des champs cultivés et des jachères (données détaillées).	257
Annexe 7	Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore, dans la biomasse végétale pendant une succession culture-jachère.	258 - 259
Annexe 8	Evolution de la matière sèche, du carbone, de l'azote et du phosphore de la biomasse aérienne ligneuse après la défriche d'une jachère jeune et après celle d'une jachère âgée.	259
Annexe 9	Corrélation de Spearman entre les propriétés physiques et chimiques des sols de 11 parcelles de jachère et six parcelles de culture d'arachide de l'auréole de brousse pour les horizons a. 0-10 cm, b. 10-20 cm, c. 20-30 cm, d. 30-40 cm, e. 0-40 cm.	261 - 265
Annexe 10	Analyse en Composantes Principales des propriétés du sol d'une chronoséquence de 6 parcelles d'arachide de l'auréole de brousse et 11 parcelles de jachère.	266 - 270
Annexe 11	Propriétés des sols dans une chronoséquence de six parcelles d'arachide de l'auréole de brousse et de 11 parcelles de jachère.	271 - 272

Annexe 12	Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore dans le système plante-sol à trois étapes principales de la succession culture-jachère.	273
Annexe 13	Stockage dans le sol du carbone, de l'azote et du phosphore assimilable (POD) dans une chronoséquence de six parcelles de culture d'arachide de l'auréole de brousse et de 11 parcelles de jachère (JA).....	274
Annexe 14	Stockage du carbone dans deux fractions du sol dans une chronoséquence de six parcelles d'arachide de l'auréole de brousse et de 11 parcelles de jachère.	275
Annexe 15	Dynamique de décomposition des racines de <i>Combretum glutinosum</i> Perr. après la défriche d'une jachère de 15 ans selon des mesures réalisées pendant une expérience avec des sachets de décomposition.	275
Annexe 16	Stocks restants de matière sèche, carbone, azote et phosphore issus du compartiment racinaire en décomposition après la défriche d'une jachère jeune et d'une jachère âgée.	276
Annexe 17	Teneur en carbone, en azote et en phosphore des composantes de la biomasse d'arachide, de mil, de maïs et de riz.	277
Annexe 18	Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore dans la biomasse végétale des principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique de Sare Yorobana, au sud du Sénégal.	278
Annexe 19	Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore dans le sol des principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique de Sare Yorobana (exprimé en profondeur équivalente de sol).	279
Annexe 20	Corrélation de Spearman entre les propriétés physiques et chimiques des sols des principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique de Sare Yorobana pour les horizons a. 0-10 cm, b. 10-20 cm, c. 20-30 cm, d. 30-40 cm, e. 0-40 cm.	280 - 284
Annexe 21	Analyse en composantes principales des propriétés des sols de 12 parcelles cultivées.....	285 - 289

Annexe 22	Propriétés des sols des principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique de Sare Yorobana.	290 - 291
Annexe 23	Stockage du carbone, de l'azote et du phosphore dans le sol des principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique de Sare Yorobana, sud Sénégal.	292
Annexe 24	Stockage du carbone (t ha ⁻¹) dans deux fractions de sol des principales cultures de rente et vivrières le long d'une toposéquence typique de Sare Yorobana, au sud du Sénégal.	293
Annexe 25	Effet de la gestion des intrants organiques sur les propriétés physiques et le statut organique du sol.	294
Annexe 26	Apports organiques de carbone, d'azote et de phosphore dans les champs de case selon trois schémas différents de gestion organique de la fertilité.	295
Annexe 27	Evaluation de la qualité du sol de 23 parcelles de culture et de jachère selon les critères de Feller (1995b) basés sur la teneur en carbone et la teneur en éléments fins.	296
Annexe 28	Précipitations annuelles moyennes durant les 60 dernières années	297
Annexe 29	Distribution spatiale de l'utilisation des terres illustrée par la distance des cultures à la concession.	297
Annexe 30	Surfaces bénéficiant de la mise en jachère et de la fumure animale (durant la saison sèche 1996-97 et pendant le parcage de nuit seulement) dans le système agropastoral du village de Sare Yorobana.	298
Annexe 31	Structure de la population et moyens de production de 16 ménages du village de Sare Yorobana.	299
Annexe 32	Corrélation de Spearman entre les variables descriptives de la structure de 16 des 18 ménages de Sare Yorobana.	300
Annexe 33	Données utilisées pour l'analyse en composantes principales de la structure de 16 des 18 ménages de Sare Yorobana.	301

Annexe 34	Analyse en composantes principales de la structure de 16 des 18 ménages de Sare Yorobana.	302
Annexe 35	Rendement (tMS ha-1) des composantes de la biomasse récoltable des cultures de : a. arachide; b. mil ; c. maïs ; d. sorgho ; e.riz.	303 - 305
Annexe 36	Quantités totales et distribution spatiale et verticale de la matière sèche, du carbone, de l'azote et du phosphore dans la biomasse des systèmes d'utilisation de l'espace du village.	306 - 308
Annexe 37	Autosuffisance en fumier et en fourrage des concessions de Sare Yorobana selon un bilan agropastoral simplifié.	308
Annexe 38	Analyse de la sensibilité du stockage de carbone à la valeur seuil de l'intensité de culture (IC) déterminant la biomasse adventice ligneuse dans les parcelles cultivées.	308
Annexe 39	Evolution de l'utilisation de l'espace dans le village de Sare Yorobana pour la période 1997-2047 selon les prévisions d'un modèle statique.....	309
Annexe 40	Evolution du stockage de carbone dans le système plante-sol du territoire du village de Sare Yorobana pour la période 1997-2047 selon les estimations obtenues après modélisation (voir la description dans 4.2.4.).....	310
Annexe 41	Flux anthropogéniques de carbone, d'azote et de phosphore établis entre novembre 1996 et novembre 1997 à Sare Yorobana : a. valeurs absolues ; b. répartition selon la source ; c. répartition selon le site.	311 - 314
Annexe 42	Poids des troupeaux possédés par les concessions.	315
Annexe 43	Teneur moyenne mensuelle en carbone, en azote et en phosphore des déjections bovines à Sare Yorobana.....	315
Annexe 44	Temps passé par trois troupeaux sur les parcelles du village, selon le propriétaire des terres.	316
Annexe 45	Apport de matière sèche aux champs par la fumure pendant le parage de nuit et en relation avec l'espèce qui sera mise en culture.	317

Annexe 46	Entrées et sorties de matière organique dues aux prélèvements et aux déjections animales de trois troupeaux pendant la saison sèche 1995-1996.	317
Annexe 47	Rendement en mil en fonction des pratiques de fumure dans les auréoles de case et de brousse.	318
Annexe 48	Evolution des sorties de carbone anthropogénique et rapport entre sortie et stock de C dans la biomasse aérienne végétale du terroir de Sare Yorobana pour la période 1997-2047 selon les prévisions de la modélisation	319

*Imprimé en France
ENGREF - Reprographie
19, avenue du Maine
75732 PARIS CEDEX 15*

*Couverture :
conception : Bénédicte BERCOVICI (ENGREF)
réalisation : Imprimerie Le Révérend*

*Intérieur :
PAO : Martial GUISET (ENGREF)*

Copyright ENGREF

En application de la loi du 11 mars 1957 (art 41) et du code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992, toute reproduction partielle ou totale à usage collectif de la présente publication est strictement interdite sans autorisation expresse de l'éditeur.

