

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES	v
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES FIGURES.....	xv
RESUME.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I. PRESENTATION GENERALE DU TCHAD et de la zone d'étude	6
1.1. Présentation du Tchad	6
1.2. Présentation de la zone des savanes	10
1.2.1. Situation géographique et physique	10
1.2.1.1. Climat	11
1.2.1.2. Contexte morpho pédologique	12
1.2.1.3. Végétation	13
1.2.2. Contexte humain et systèmes de culture dans les savanes.....	14
1.2.2.1. Diversité du peuplement et des conditions socio-économiques.....	14
1.2.2.2. Systèmes de culture	14
1.2.3. Sites d'étude	17
1.2.3.1. Station agronomique de Bébédjia	17
1.2.3.2. Site de Ndaba	20
1.2.3.3. Site de Nguetté1	21
1.2.3.4. Site de Tala1	22
CHAPITRE II. ETAT DE L'ART SUR LES PRATIQUES DE GESTION DE LA FERTILITE DES SOLS.....	24
2.1. Evolution de la définition de la notion de la fertilité.....	24
2.1.1. Fertilité physique des sols	24
2.1.2. Fertilité chimique des sols	25
2.1.3. Fertilité biologique.....	25
2.2. Pratiques de gestion de la fertilité des sols.....	26
2.2.1. Importance des apports organiques dans l'amélioration de la fertilité des sols.....	26

2.2.2. Principales causes de baisse des teneurs en matière organique et éléments minéraux des sols	29
2.2.2.1. Pratique de culture sur brûlis.....	29
2.2.2.2. Pratique de culture continue	30
2.2.2.3. Exportations des résidus des récoltes	31
2.2.3. Pratique d'amélioration de la fertilité des sols à partir du fumier.....	31
2.2.4. Pratique d'amélioration de la fertilité des sols à partir des résidus des récoltes	32
2.2.5. Pratique d'amélioration de la fertilité des sols à partir du compost.....	34
2.2.6. Pratique d'amélioration de la fertilité des sols à partir des engrais minéraux	35
2.3. Effets des pratiques de gestion de la fertilité des sols sur les rendements des cultures .	37
CHAPITRE III. MATERIEL ET METHODES D'ETUDE	39
3.1. Matériels.....	39
3.1.1. Matériel végétal	39
3.1.1.1. Arachide	39
3.1.1.2. Mil	39
3.1.1.3. Sorgho	39
3.1.2. Engrais minéraux	39
3.1.3. Amendement organique	40
3.1.4. Autres matériels scientifiques et techniques	40
3.2. Méthodes	40
3.2.1. Méthodologie d'élaboration des cartes d'occupation des sols.....	40
3.2.2. Enquête exploitation et expérimentation en milieu paysan	41
3.2.2.1. Enquête à l'échelle exploitation	41
3.2.2.2. Expérimentation en milieu paysan	41
3.2.3. Expérimentation sur la station de recherches agronomiques	43
3.2.4. Conduite des cultures	45
3.2.5. Méthodologie d'évaluation et d'échantillonnage des végétaux.....	45
3.2.6. Méthodologie d'échantillonnage des sols	46
3.3. Méthodes d'analyse des sols au laboratoire	46
3.3.1. Analyses physico-chimiques des sols	47
3.3.1.1. Granulométrie.....	47
3.3.1.2. Fractionnement granulométrique	47
3.3.1.3. Carbone organique	48
3.3.1.4. pH du sol	48

3.3.1.5. Azote (N) total.....	48
3.3.1.6. Dosage du phosphore (P) total et assimilable	48
3.3.1.7. Dosage du potassium (K)	49
3.3.1.8. Bases échangeables	49
3.3.1.9. Capacité d'Echange Cationique (CEC).....	49
3.3.1.10. Analyses biologiques des sols	49
3.4. Traitements statistiques des données.....	50
CHAPITRE IV. OCCUPATION DES SOLS, TYPOLOGIE DES EXPLOITATIONS AGRICOLAS ET ANALYSES DES SYSTEMES DE CULTURE.....	52
4.1. Résultats	52
4.1.1. Principales caractéristiques des sites étudiés	52
4.1.1.1. Site de Ndaba	52
4.1.1.2. Site de Nguetté1.	53
4.1.1.3. Site de Tala1	54
4.1.2. Typologie des exploitations agricoles.....	55
4.1.2.1. Exploitations propriétaires de traction animale.....	56
4.1.2.2. Exploitations manuelles	56
4.1.3. Analyses des systèmes de culture	57
4.1.3.1. Assolements des cultures	57
4.1.3.2. Successions et associations culturales.....	58
4.1.3.3. Pratiques de gestion de la fertilité des sols.....	58
4.1.3.4. Effets des fumures sur les rendements des cultures suivies	60
4.1.4. Caractéristiques chimiques des sols sous l'arachide, relations entre son rendement, la matière organique (MO), l'azote (N) et le phosphore (P) assimilable des sols.	61
4.1.4.1. Caractéristiques chimiques des sols	61
4.1.4.2. Relations entre le rendement de l'arachide, la MO, l'N et le P assimilable des sols.....	62
4.1.5. Caractéristiques chimiques des sols sous le mil, relations entre son rendement, la matière organique (MO), l'azote (N) et le phosphore (P) assimilable des sols.	64
4.1.5.1. Caractéristiques chimiques des sols	64
4.1.5.2. Relations entre rendement du mil, la MO, l'N et le P assimilable des sols.	64
4.1.6. Caractéristiques chimiques des sols sous le sorgho, relations entre son rendement, la matière organique (MO), l'azote (N) et le phosphore (P) assimilable des sols.	65
4.1.6.1. Caractéristiques chimiques des sols	65

4.1.6.2. Relations entre le rendement du sorgho, la MO, l’N et le P assimilable des sols.	65
4.1.7. Evaluation des effets des pratiques culturales dans les systèmes culturaux de Nguetté1	66
4.1.7.1. Evolution des caractéristiques chimiques des sols	67
4.1.7.2. Le fractionnement granulométrique de la matière organique du sol.....	68
4.1.7.3. Performances agronomiques des systèmes étudiés	69
4.2. Discussions.....	71
4.2.1. Principales caractéristiques des sites étudiés	71
4.2.2. Typologie des exploitations agricoles.....	71
4.2.3. Analyse des systèmes de culture	74
4.2.4. Caractéristiques chimiques des sols sous l’arachide, relations entre son rendement, la matière organique (MO), l’azote (N) et le phosphore (P) assimilable des sols.	77
4.2.5. Caractéristiques chimiques des sols sous le mil, relations entre son rendement, la matière organique (MO), l’azote (N) et le phosphore (P) assimilable des sols.	78
4.2.6. Caractéristiques chimiques des sols sous le sorgho, relations entre son rendement, la matière organique (MO), l’azote (N) et le phosphore (P) assimilable des sols	78
4.2.7. Evaluation des effets des pratiques culturales sur les sols et les rendements des cultures	79
4.2.7.1. Evolution des caractéristiques chimiques des sols	79
4.2.7.2. Le fractionnement granulométrique de la matière organique du sol.....	80
4.2.7.3. Performances agronomiques des systèmes étudiés	81
CHAPITRE V. EVALUATION DES EFFETS DES FUMURES ET DES MODES DE GESTION DES RESIDUS DES RECOLTES SUR LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DES SOLS	83
5.1. Résultats	83
5.1.1. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des récoltes sur les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols	83
5.1.1.1. Bilans minéraux.....	83
5.1.1.2. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des récoltes sur la matière organique (MO) et l’azote (N) des sols	87
5.1.1.3. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des récoltes sur le phosphore assimilable	89
5.1.1.4. Effets des fumures et des résidus des récoltes sur le complexe absorbant.....	90

5.1.1.5. Effets des fumures sur la répartition de la matière organique dans les fractions granulométriques des sols	92
5.1.1.6. Effets des fumures sur la minéralisation du carbone.....	93
5.1.1.7. Effets des fumures sur la biomasse microbienne des sols.....	96
5.2. Discussion	97
5.2.1. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des récoltes sur les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols	97
5.2.1.1. Bilans minéraux.....	97
5.2.1.2. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des récoltes sur la matière organique (MO) et l'azote (N) des sols.....	99
5.2.1.3. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des récoltes sur le phosphore assimilable	100
5.2.1.4. Effets des fumures et des résidus des récoltes sur le complexe absorbant.....	101
A l'opposé, lorsque les résidus des cultures sont exportés hors des parcelles, ils entraînent un appauvrissement des sols en bases échangeables. L'exportation des résidus des cultures hors des parcelles est pratique qui peut exacerber l'appauvrissement des sols en P.	101
5.2.1.5. Effets des fumures sur la répartition de la matière organique dans les fractions granulométriques des sols	101
5.2.1.6. Effets des fumures sur la minéralisation du carbone.....	103
5.2.1.7. Effets des fumures sur la biomasse microbienne des sols.....	104
CHAPITRE VI. EVALUATIONS DES EFFETS DES FUMURES ET DES MODES DE GESTION DES RESIDUS DES RECOLTES SUR LES RENDEMENTS DES CULTURES	106
6.1.1. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus sur le rendement du mil en 2008 et 2010.....	106
6.1.2. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des cultures sur les rendements de l'arachide.	109
6.1.3. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des cultures sur le rendement du sorgho.....	110
6.1.4. Evaluation agronomique des meilleures technologies dans les sites d'étude	112
6.1.4.1. Effets des fumures sur le rendement du mil à Tala1, Nguetté1, Ndaba et Bébédjia.....	112
6.1.4.2. Arrières effets des fumures sur le rendement de l'arachide sur sites	114

6.2. Discussion	118
6.2.1. Effets des fumures sur le rendement du mil en 2008 et 2010	118
6.2.2. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des cultures sur le rendement de l'arachide	120
6.2.3. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des cultures sur le rendement du sorgho	121
6.2.4. Evaluation agronomique des meilleures technologies dans les sites d'étude	122
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	125
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	129
LISTE DES ANNEXES	146
LISTE DES PUBLICATIONS TIREES DE LA THESE	171

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP : Analyse en Composantes Principales

AFNOR : Association Française de Normalisation

ARDESAC : Appui à la Recherche régionale pour le Développement durable des Savanes d'Afrique Centrale

ARS2T : Appui la Recherche Scientifique et Technique au Tchad

ATP : Adénosine Triphosphate

BaCl₂ : chlorure de Baryum

BUNASOL : Bureau National d'Analyses des Sols

CAH : Complexe Argilo-Humique

CBM : Carbone de la Biomasse Microbienne

CC : cellular content

CEC : Capacité d'échange cationique des sols

CIRAD-CA: Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement-Cultures Annuelles

CMO : compartiment matière organique

CNAR : Centre National d'Appui à la recherche

CNRST : Centre national de la recherche Scientifique et technologique

CNUCED : Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement

CO(NH₂)₂ : urée

CPCS : Commission de Pédologie et Cartographie des Sols.

CSAO-CILSS : Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest - Comité permanent inter Etats de lutte contre la sécheresse dans le Sahel.

CSRE: Conseil Scientifique Régional de l'Environnement

DAP: Di-Ammonium Phosphate [(NH₄)₂HPO₄]

DREM : Direction des Ressources en Eau et de la Météorologie

DSA : Division de la Statistique Agricole

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

FBN : Fixation Biologique de l'azote atmosphérique (N₂)

GPS : Global Positioning System

IDR : Institut de Développement Rural

IFDC : Centre international pour la Fertilité des sols et le Développement agricole

INERA : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles

INRA : Institut National de Recherche Agronomique

INSEED : Institut National de la Statistique des Etudes Economiques et Démographiques,

RGPH2 : 2^e Recensement Général de la Population et de l'Habitat

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

ITRAD : Institut Tchadien de Recherche Agronomique pour le Développement

$K_2Cr_2O_7$: Bichromate de potassium

LABOSEP : Laboratoire d'Analyses des Sols-Eaux et Plants

MDR : Ministère de Développement Rural

MO : Matière organique

$(NaPO_3)_6$: hexamétaphosphate de sodium.

$(NH_4)_2HPO_4$: DAP [Di-Ammonium Phosphate]

$(NH_4)_2SO_4$: sulfate d'ammonium

N: Azote

NaOH: soude

NDF: Neutral detergent fiber

NH_4F : Fluorure d'ammonium

ONDR: Office National de Développement Rural

ONG: Organisations non Gouvernementales

P: Phosphore

pH : Potentiel d'hydrogène

PIB: Produit Intérieur Brut

PRASAC : Pôle Régional de Recherche Appliquée au Développement des
Systèmes agricoles d'Afrique Centrale

SCAC: Service de la Coopération et d'Actions culturelles

SDA : Schéma Directeur Agricole

SNRP2 : Stratégie Nationale de Croissance et de Réduction de la Pauvreté n°2.

TSA : Taux de Saturation en Aluminium échangeable

UBT : Unité Bétail Tropical

UPB : Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso

UTM : Universal Transverse Mercator

WGS 84 : World Geodetic System 1984 (système géodésique mondial)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Quantités d'éléments minéraux exportés (en kg/ t ha ⁻¹ de sorgho, d'arachide de mil récoltés).	31
Tableau II. Caractéristiques chimiques du fumier utilisé	40
Tableau III. Principales caractéristiques des exploitations agricoles	56
Tableau IV. Dose des fumures organiques et minérales appliquées en kg ha ⁻¹ aux cultures..	60
Tableau V. Rendements des principales cultures en kg ha ⁻¹ par sites et par exploitants	61
Tableau VI. Caractéristiques chimiques des sols cultivés en arachide	62
Tableau VII. Matrice de corrélation (Pearson (n))	63
Tableau VIII. Matrice de corrélation (Pearson (n)).....	65
Tableau IX. Matrice de corrélation (Pearson (n)).....	66
Tableau X. Effets des successions culturales sur les teneurs des sols en carbone total et azote total exprimées en g kg ⁻¹ entre 2006 et 2007.	67
Tableau XI. Effets à court terme des successions culturales sur le pH du sol, et les teneurs des sols en phosphore (mg P kg ⁻¹) et potassium (mg K kg ⁻¹) entre 2006 et 2007.	68
Tableau XII. Comparaison des teneurs en carbone total (g C kg ⁻¹) et en azote total (g N kg ⁻¹) de chaque fraction granulométrique (µm) entre les systèmes étudiés.....	68
Tableau XIII. Comparaison des teneurs en carbone et azote total (g kg ⁻¹) entre les trois fractions granulométriques (µm) de chaque système étudié.	69
Tableau XIV. Rendements (kg ha ⁻¹) des spéculations mentionnées entre parenthèses dans les successions culturales.....	70
Tableau XV. Bilan théorique de l'N sur l'essai rotation mil/arachide/mil (2008-2010)	84
Tableau XVI. Evolution des quantités de l'N exportées (kg ha ⁻¹) par le mil.....	85
Tableau XVII. Bilan théorique de P sur l'essai rotation mil/arachide/mil (2008-2010)	86
Tableau XVIII. Evolution des quantités de P exporté par le mil en 2008 et 2010.....	87
Tableau XIX. Evolution de la matière organique (MO), de l'azote (N) total des sols entre 2008 et 2010.....	88
Tableau XX. Evolution du phosphore (P) assimilable sols entre 2008 et 2010.....	89
Tableau XXI. Evolution du complexe absorbant des sols entre 2008 et 2010.	91
Tableau XXII. Contribution des fractions granulométriques du C dans l'horizon 0–20 cm..	92
Tableau XXIII. Coefficients d'enrichissement en carbone (E _C) en fonction des traitements	93
Tableau XXIV. Les coefficients de minéralisation du carbone (C-CO ₂ /C).....	95
Tableau XXV. Le carbone de la biomasse microbienne (CBM) en 2009 et 2010 (Cmg kg ⁻¹)	96

Tableau XXVI. Effet des fumures sur les composantes des rendements du mil en 2010. ...	108
Tableau XXVII. Effet des fumures et des modes de gestion des résidus des cultures sur le rendement de l’arachide et la production des biomasses	109
Tableau XXVIII. Effet des fumures et des modes de gestion des résidus des cultures sur les composantes du rendement de sorgho et la production des biomasses.....	111
Tableau XXIX. Effet des fumures sur le rendement (kg ha ⁻¹) du mil dans chaque site d’étude	112
Tableau XXX. Arrières effets des fumures sur le rendement (kg ha ⁻¹) de l’arachide dans les sites.....	114

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte climatique du Tchad avec les formations végétales associées	7
Figure 2. Aptitude des terres agricoles au Tchad en 2001.	8
Figure 3. Découpage de la zone soudanienne et localisation de la zone d'étude (2; 3 et 5) ...	10
Figure 4. Les grandes formations géologiques de surface dans les savanes tchadienne.....	13
Figure 5. Superficies et productions moyennes des principales cultures des savanes.	15
Figure 6. Evolution des productions céréalières et besoins de la population.....	16
Figure 7. Evolution de la pluviométrie annuelle de 1970 à 2010 à la Station de Bébédjia....	18
Figure 8. Evolution des températures à la Station de Bébédjia de 1980 à 2010.	19
Figure 9. Evolution de la pluviosité annuelle (données de Doba à 25 km de Ndaba).	20
Figure 10. Evolution de la pluviométrie annuelle (données de Pala, située à 40 km).	21
Figure 11. Evolution de la pluviométrie annuelle (données de Bénoye à 11 km de Tala1)....	22
Figure 12. Evolution des besoins et disponibilité de NPKSB et de l'urée pour la production cotonnière de 1997 à 2007 au Tchad.....	36
Figure 13. Rendements moyens des principales cultures au Tchad de 1996 à 2010.	37
Figure 14. Dispositif du test à la Station de Bébédjia et en milieu paysan	42
Figure 15. Plan de masse de l'essai à la Station de Bébédjia.....	44
Figure 16. Carte d'occupation de sol de Ndaba	52
Figure 17. Carte d'occupation de sol de Nguetté1	53
Figure 18. Carte d'occupation de sol de Tala1	55
Figure 19. Corrélation entre la MO, l'N et le P assimilable et le rendement de l'arachide ...	63
Figure 20. Corrélation entre la MO, l'N et le P assimilable et le rendement du mil.....	64
Figure 21. Corrélation entre la MO, l'N et le P assimilable et le rendement du sorgho.	66
Figure 22. Quantités de CO ₂ dégagées par jour (sol prélevé après récolte en 2010)	94
Figure 23. Quantités cumulées de C/CO ₂ dégagées par le sol prélevé après récolte	95
Figure 24. Effets des fumures sur le rendement du mil en 2008.....	106
Figure 25. Effets des fumures sur le rendement du mil en 2010.....	107
Figure 26. Comparaison des effets de chaque type de fumure sur le rendement du mil.....	113
Figure 27. Arrières effets de chaque type de fumure sur le rendement de l'arachide.....	116

RESUME

La problématique de gestion de la fertilité des sols se pose sur l'ensemble du Tchad tout entier. Elle se résume à la question de savoir "comment assurer durablement les productions agricoles afin de satisfaire la demande alimentaire croissante de la population dans un contexte d'appauvrissement généralisé des sols? Pour répondre à cette question, les sites de Tala¹, Nguetté¹ et Ndaba ont servi de cadre à l'étude. L'objectif de ce travail est d'étudier les effets des pratiques culturales et les incidences des modes de gestion des fumures et des résidus de culture sur la productivité des sols. Des diagnostics des exploitations agricoles et agronomiques des cultures ont été menés, puis, complétés par des essais agronomiques et des analyses bio-physico-chimiques des sols au laboratoire.

L'étude a montré que 37 pc des exploitations possèdent la traction animale. La matière organique (MO) et l'azote (N) constituent les éléments essentiels dans l'élaboration des rendements du sorgho et du mil, tandis que le phosphore (P) détermine celui de l'arachide. Les pratiques culturales se caractérisent par de faibles apports de fumures (100 à 280 kg ha⁻¹ tous les 3 à 4 ans, de fumier, et de 25 à 75 kg ha⁻¹ d'engrais minéraux) conduisant à des faibles teneurs des sols en MO (5,2 et 7,8 g kg⁻¹) et à des faibles rendements des cultures (700 kg ha⁻¹ de mil ou sorgho). Il a aussi été noté que l'application du fumier favorise l'exportation de l'N et du P des sols par les cultures. Il est donc indispensable de les restituer au sol à travers les apports organiques et minéraux. Après trois années d'exploitation des terres, le pH, la MO, le P, la capacité d'échange cationique, les bases échangeables et l'activité microbienne des sols ont sensiblement diminué. Cependant, on a noté que ces caractéristiques des sols ont été moins affectées si les fumures organiques et minérales sont appliquées conjointement aux cultures. Cette pratique culturale induit des augmentations des rendements d'arachide, du mil et du sorgho de +15 ; +29 et +55 pc respectivement. Le Di-ammonium phosphate permet d'augmenter les rendements respectifs du mil et de l'arachide de +21 et +30 pc si la teneur en MO du sol est supérieure à 6 g kg⁻¹. L'amélioration des teneurs des sols en MO est donc indispensable dans toute la zone des savanes tchadiennes. Pour ce faire, l'étude recommande une gestion intégrée du fumier, des résidus de culture et des jachères de courtes durées et à haut potentiel de production de biomasse dans les systèmes de production. L'application conjointe du fumier de bonne qualité et des engrais minéraux aux cultures est aussi un gage pour une production durable.

Mots clés : pratiques culturales, matière organique, engrais minéraux, jachères, résidus des cultures, fertilité des sols, rendements, savanes tchadiennes.

ABSTRACT

The problem of management soil fertility arises throughout the whole of Chad. It amounts to the question "how to insure sustainable agricultural productions to satisfy the increasing food demand of the population in a context of widespread impoverishment of the soil? To answer this question, the sites of Tala¹, Nguetté¹ and Ndaba have served as framework for the study. The objective of this work is to study the effects of cultural practices and the impact of manure management methods and crop residue on soil productivity. Diagnoses of farms and agricultural crops were conducted in farmers, then, completed with agronomic trials and bio-physico-chemical analyses made in laboratory.

The study showed that only 37 percent of farms have animals drive. The organic matter (OM) and nitrogen (N) are essential elements in the development of yields of sorghum and millet, while phosphorus (P) determines that of groundnut. Cultural practices are characterized by low inputs of fertilizers (100 to 280 kg ha⁻¹ every 3 to 4 years, manure, and 25 to 75 kg ha⁻¹ mineral fertilizers) leading to low levels of soil OM (5.2 and 7.8 g kg⁻¹) and low crop yields (700 kg ha⁻¹ of millet or sorghum). It was also noted that the application of manure promotes the export of N and P from soil by crops. It is therefore essential to return to the soil through organic and mineral inputs. After three years of land use, pH, OM, P, the cation exchange capacity, exchangeable bases and soil microbial activity decreased appreciably.

However, it was noted that soil characteristics have been less affected if the organic and mineral fertilizers are applied together to the cultures. This cultural practice induced increases in yields of groundnuts, millet and sorghum 15, 29 and 55 pc respectively. Di-ammonium phosphate can increase the respective yields of millet and groundnuts 21 and 30 pc if the OM content of soil is greater than 6 g kg⁻¹. An improved soil level of MO is essential throughout the savannah zone of Chad. To do this, the study recommends an integrated management of manure, crop residues and fallow of short duration and high production potential of biomass in production systems. Joint implementation of good quality manure and mineral fertilizers to crops is also a guarantee for sustainable production.

Keywords: farming practices, organic matter, mineral fertilizers, crop residues, follow, soil fertility, yields, Chadian savannas.

INTRODUCTION

L'agriculture des pays d'Afrique subsaharienne est caractérisée par sa faible productivité. Les rendements céréaliers ne sont que 1 101 kg ha⁻¹ contre 3 467 kg ha⁻¹ en Asie et 3 314 kg ha⁻¹ en Amérique du Sud (CNUCED, 2010). En conséquence, la plupart des pays souffrent d'une insuffisance chronique de la production vivrière totale, de difficulté d'accès à l'alimentation ou d'insécurité alimentaire localisée. La Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement (CNUCED) indique que depuis la fin des années 70, la production céréalière n'a jamais pu croître au même rythme que la population en Afrique subsaharienne. Au cours des deux prochaines décennies, elle ne devrait couvrir que 86 pc de la demande. Bationo *et al.* (2004) mentionnent que la dégradation des sols en Afrique sub-saharienne a entraîné une baisse de production céréalière au cours des 35 dernières années exposant ainsi 200 millions de personnes dans une situation d'insécurité alimentaire chronique.

Sanchez *et al.* (1997) et Bationo *et al.* (2004) expliquent la faible productivité des cultures par les effets conjugués de la mauvaise gestion des terres agricoles, les variations temporelles et spatiales des conditions climatiques et la croissance démographique, entraînant un appauvrissement rapide des sols en élément nutritifs. Jones (2009) indique que les pertes d'éléments nutritifs de sols entraînent des pertes économiques directes d'environ 3 pc du PIB agricole. Ces contraintes sont parfois exacerbées par la pratique de l'agriculture minière (culture continue, faibles applications des engrais minéraux) et l'état de pauvreté des producteurs (Vander der Pol, 1992 ; Mokwunye *et al.*, 1996 ; Gray, 2005). Selon IFDC (2008), les producteurs africains n'ont utilisé que 25,4 kg ha⁻¹ d'engrais durant la campagne agricole 2005/2006. A titre de comparaison, les doses moyennes d'application des engrais dans le monde à la même période étaient de 118,8 kg ha⁻¹. Les producteurs d'Asie et d'Amérique Latine utilisaient 202,3 et 100,7 kg ha⁻¹ respectivement. La même source indique que l'agriculture des pays d'Afrique Subsaharienne n'a utilisé qu'à peine en moyenne 7,1 kg d'engrais par hectare sur l'ensemble des terres agricoles.

Au Tchad, les activités agricoles occupent plus de 80 pc de la population active, pour une contribution de 22,6 pc au PIB avant l'exploitation du pétrole en 2003. En 2009, elles représentent 22,3 pc du PIB. Le seul secteur pétrolier a représenté 34,3 pc du PIB (Cellule Economique de la République du Tchad, <http://www.cellule-economique-tchad.org/>, consulté le 12/02/12). Les systèmes de production se caractérisent par un faible niveau d'équipement des exploitations (Djondang et Havard 2010, et Naitormbaide *et al.*, 2010) et la pratique de cultures continues. Les faibles rendements des cultures observés s'expliquent par les

conditions pluviométriques défavorables, la pauvreté naturelle des sols en éléments nutritifs et la faible utilisation des fumures organiques et minérales. Les engrais minéraux sont très peu utilisés surtout à cause de leurs coûts relativement élevés aux faibles revenus des producteurs. Même lorsque les engrais sont utilisés, ils sont surtout réservés à la culture du coton (Naitormbaide, 2007). En 2000, la consommation des engrais minéraux (N, K₂O et P₂O₅) au Tchad n'était que de 17 500 t soit 1,4 pc de la consommation de l'Afrique Sub-saharienne (IFDC, 2008). En rapport avec la superficie des terres cultivables, la dose moyenne d'engrais estimée n'est que de 5 kg ha⁻¹ (IFDC, 2008). Les cultures, telles que le maïs, le sorgho, et le riz ne reçoivent qu'entre 35 à 75 kg ha⁻¹ de NPK et 42 kg ha⁻¹ d'urée (Mbétid-Bessane *et al.*, 2006 ; Naitormbaide, 2007). L'utilisation de la fumure organique est aussi peu répandue chez les producteurs. Pourtant, plusieurs travaux ont montré l'importance de l'apport de l'amendement organique dans le maintien de la qualité agronomique des sols (INERA, 2000 ; Hibra-Samgue, 2004 ; FAO, 2007 ; Masto *et al.*, 2008). L'agriculture n'étant pas systématiquement intégrée à l'élevage, après les récoltes, les résidus sont généralement prélevés par les exploitants pour des usages domestiques ou consommés par les animaux d'élevage durant la saison sèche. Ce qui correspond à une exportation d'éléments nutritifs des champs, mais aussi à une baisse généralisée de la matière organique du sol. Lompo (2009) indique que la faible restitution des résidus des cultures dans les champs entraîne une baisse de la matière organique du sol, et en conséquence la baisse des teneurs en phosphore du sol. Plusieurs auteurs (Stoorvogel, 1990 ; Van der Pol, 1992 ; Sedogo, 1993 ; Bado *et al.*, 1997 ; Bationo *et al.*, 1998 ; Mando *et al.*, 2005 ; Ouattara, 2009) ont par ailleurs montré que l'absence ou la faible utilisation des engrais minéraux et des substrats organiques (fumier, compost) conduit de nos jours, à une baisse importante de la fertilité originelle des sols et des rendements agricoles. De plus, Abdoulaye *et al.* (2006) ont aussi montré que les itinéraires techniques pratiqués dans la zone cotonnière sont à l'origine de la dégradation de la fertilité des sols à travers leur érosion et la minéralisation accélérée de leur matière organique.

La forte croissance démographique des dernières années a entraîné également une forte pression sur les ressources en terres cultivables. Avec un taux de croissance de 3,6 pc (INSEED, 2009), l'augmentation de la population est accompagnée de celle du cheptel entraînant du même coup une augmentation de la demande en produits végétaux utiles à l'homme et à l'animal. La jachère qui était jadis le moyen traditionnel de restauration de la fertilité des sols est moins pratiquée à cause de la forte demande en terres cultivables. La pression sur les terres exploitables affecte leur fertilité, ce qui se traduit par une baisse des rendements agricoles (Traoré et Toé, 2008).

Les pluies erratiques se traduisent par de fortes variations spatio-temporelles des productions céréalières. Pendant la campagne agricole 2003/2004, la production céréalière a été estimée à 1 620 000 t contre 1 040 000 t en 2004/2005 (Ministère de l'Agriculture, 2005). Les rendements des céréales telles que le sorgho, le mil et le maïs n'étaient que 730 ; 520 et 820 kg ha⁻¹ respectivement en 2009 (DSA, 2011).

La nécessité de renverser cette tendance au déclin devient alors plus pressante. La conservation, la recapitalisation et l'entretien de la fertilité du sol sont des conditions préalables à l'amélioration de l'efficacité des intrants et à l'augmentation de la productivité (FAO, 2003).

Dans le contexte actuel marqué par l'augmentation du prix des engrais minéraux, comment accompagner les producteurs pour l'entretien, voire l'amélioration de la fertilité des sols ?

Pour répondre à cette préoccupation, il est indispensable de caractériser les exploitations agricoles afin de comprendre leurs pratiques culturales et de mettre au point des technologies appropriées. Il s'agira d'étudier et de mesurer les conséquences de certaines pratiques culturales paysannes en matière de gestion de la fertilité des sols afin de proposer des alternatives en vue d'une production soutenue et durable. En conséquence, développer des techniques qui assurent le maintien ou l'amélioration de la fertilité des sols à long terme et accessibles aux producteurs, et qui leur permet d'augmenter les rendements des cultures et leurs revenus. L'utilisation des ressources propres au système de production est devenue une nécessité. Malheureusement, les ressources organiques, les seules envisageables, étant actuellement très faibles, il est impératif d'intensifier le système de cultures afin d'accroître lesdites ressources destinées à être investies dans le sol (Pichot *et al.*, 1981). Cette intensification implique l'augmentation des entrées (inputs) dans le sol par la valorisation maximale des résidus de récolte par le compostage direct ou via l'élevage, l'apport régulier des éléments minéraux à partir des engrais minéraux, l'utilisation des plantes fixatrices d'azote atmosphérique, etc. De nombreuses expérimentations de longue durée ont montré qu'une gestion rationnelle des engrais minéraux et des amendements organiques permettait d'augmenter les rendements des cultures et de maintenir durablement la fertilité des sols (Sedogo, 1993 ; Ouattara, 1994; Mando *et al.*, 2005; Malhi *et al.*, 2006 ; Ouattara *et al.*, 2006 ; Koulibaly *et al.*, 2010). L'efficacité des engrais organiques et minéraux a été bien démontrée sur les sols pauvres en éléments nutritifs du Burkina Faso (Pichot *et al.*, 1981 ; Bado *et al.*, 1997). Plusieurs auteurs (Sedogo, 1981 ; Hien, 1990 et Bado *et al.*, 1997, Ouattara, 2009) indiquent que les teneurs en matière organiques et en azote influencent fortement la fertilité

des sols et la productivité des cultures. La présence des légumineuses fixatrices d'azote telles que le niébé et l'arachide dans les systèmes de culture est une opportunité pour améliorer la fertilité des sols et les rendements des cultures. Par leur capacité à fixer l'azote atmosphérique grâce au processus de la fixation symbiotique, les légumineuses peuvent améliorer le bilan de l'azote dans les systèmes de cultures (Bado, 2006). Selon Foth (1990), nous vivons dans «une mer» d'azote alors que cet élément demeure le principal facteur limitant la croissance des plantes. La biosphère est en contact avec deux grands réservoirs d'azote. Le premier est l'atmosphère, où N_2 est la principale forme (78%) conjointement à des composés mineurs tels que les oxydes d'azote et le gaz ammoniac (http://www.numilog.com/package/extraits_pdf). Eu égard à ces éléments on peut formuler l'hypothèse selon laquelle un système de cultures basé sur les céréales dans lequel sont cultivées les légumineuses fixatrices d'azote et où les résidus de culture et le fumier de qualité sont utilisés, améliorera les qualités physico-chimiques et biologiques des sols et, par conséquent, la productivité des cultures dans les savanes du Tchad.

Dans les savanes tchadiennes, les précédentes études qui ont abouti à la mise au point des référentiels techniques ne se sont pas préoccupées de la gestion et de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques et biologiques du capital sol soumis à des pratiques culturales qui dégradent les sols. C'est pourquoi, le développement n'a pas assez d'arguments pour convaincre les paysans des méfaits de celles-ci. C'est pour contribuer à combler cette lacune, que cette étude intitulée « *incidence des modes de gestion des fumures et des résidus de récolte sur la productivité des sols dans les savanes du Tchad* » a été conduite. Elle se situe dans le contexte où la gestion de la fertilité des sols est un défi à relever pour l'amélioration des productions vivrières et la durabilité des systèmes de production, répondra nécessairement à deux questions principales :

- quels sont les effets de certaines pratiques culturales paysannes actuelles sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols dans les savanes tchadiennes ?
- quelle est l'incidence d'un système de culture qui intègre les légumineuses, l'utilisation des fumures organiques, minérales et les résidus des récoltes sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols et sur les rendements des cultures ?

L'objectif global de ce travail est d'inverser la tendance de la dégradation des sols, en proposant des modes de gestion de la fertilité impactant positivement la productivité des sols et les rendements des cultures. Plus spécifiquement, il s'agit :

- de répertorier et d'évaluer les modes de gestion de la fertilité des sols sur le sol et les rendements des cultures ;
- de rechercher et mettre au point des technologies pouvant rendre plus durable la productivité des sols en zone de savanes du Tchad.

L'approche envisagée s'appuie sur les hypothèses suivantes :

i) le diagnostic des exploitations agricoles permet de mettre en exergue les contraintes de production agricole et les facteurs d'amélioration des rendements des cultures ;

ii) les pratiques culturelles paysannes dans les savanes du Tchad ont des effets mitigés sur les fertilités physiques, chimiques et biologiques des sols ;

iii) l'apport conjoint des fumures organiques et minérales permet de réduire la baisse des fertilités physique, chimique et biologique des sols, d'améliorer les rendements des cultures dans les savanes tchadiennes.

La restitution des résultats de l'étude est structurée en 8 chapitres, regroupés en trois parties agencées de la manière suivante :

- la première partie qui présente les généralités sur le cadre de l'étude comporte trois chapitres dont le 1^{er} et le 2^e, présentent respectivement les généralités sur le Tchad et la zone d'étude. Le 3^e chapitre fait l'état de l'art sur les pratiques de gestion de la fertilité des sols.
- la deuxième partie, composé de deux chapitres présente le matériel et les méthodes utilisées pour réaliser l'étude ;
- la troisième partie regroupe trois chapitres sur les résultats obtenus et leur discussion ;

une conclusion générale, assortie de perspectives de valorisation des résultats de ce travail, aussi bien en matière de développement que de recherche. Les références bibliographiques et les annexes complètent le document.

PREMIERE PARTIE

GENERALITES SUR LE CADRE DE L'ETUDE

CHAPITRE I. PRESENTATION GENERALE DU TCHAD ET DE LA ZONE D'ETUDE

1.1. Présentation du Tchad

D'une superficie de 1 284 000 km², le Tchad est situé entre le 7 ° et 24° de latitude nord, le 13° et le 24° de longitude. C'est un pays enclavé situé à 2 000 km du port le plus proche (Douala/Cameroun). Constitué de paysages variés, le Tchad s'étale sur une longueur de 1 700 km du Nord au Sud et sur 1 000 km d'Est à l'Ouest. Il est une cuvette au relief accidenté (succession de plaines et de montagnes). Le Nord est dominé par le massif du Tibesti dont le point le plus culminant, l'Emi Koussi, est à 3 414 m. Vers l'Ouest, la dépression abrite le point le plus bas du Tchad à 175 m.

Le climat tchadien varie d'une zone à climat tropical semi-humide à l'extrême Sud à un climat désertique au nord du pays (Figure 1). On distingue 3 zones agro climatiques dont :

- la zone saharienne qui occupe 63 pc du pays dans le nord désertique, avec moins de 200 mm de pluies ;
- la zone sahélienne occupe 27 pc du territoire. Elle située entre les isohyètes 200 et 800 mm ;
- et la zone soudanienne (10 pc du pays) comprise entre l'isohyète 800 mm à plus de 1200 mm. C'est la zone assimilée à la zone des savanes où l'étude a été effectuée.

Le régime thermique est marqué de variations importantes de températures dans l'année. Le maximum des températures est atteint en mars (35°-38 °C) au sud, en avril (40°-41°C) au centre et au Nord (42°- 43° C) au mois de mai et juin. Le minimum des températures varie selon de 24° à 35° C du sud au Nord.

En dehors des espaces cultivés, la végétation se compose de pâturages naturels (84 millions ha), de forêts et de terres boisées (32,4 millions d'ha).

Dans la zone soudanienne prédominent les combrétacées densément garnies de hautes Andropogon. Cette savane arborée se développe sur des sols très évolués (beiges ferrugineux lessivés) de couleur rouge (7,5 R-10 R), de texture uniformément argilo-sableuse à argileuse sur de grande profondeur (5 à 10 m). Le pH de ces sols est légèrement acide en surface (pH=6 - 6,5), très acide en profondeur (pH= 4- 5). Le complexe fortement désaturé (V souvent inférieur à 40 pc), à fraction colloïdale riche en kaolinite et hydroxydes de fer (10 à 12 pc) parfois avec de légères quantités d'illite.

La zone sahélienne est le domaine de la savane arbustive formée d'une végétation basse de petits arbres ou arbustes dominés par les Acacia et d'un tapis graminéen d'andropogon. Cette végétation se développe sur des sols hydromorphes, ferrugineux tropicaux peu lessivés, et des sols bruns ou brun rouges subarides.

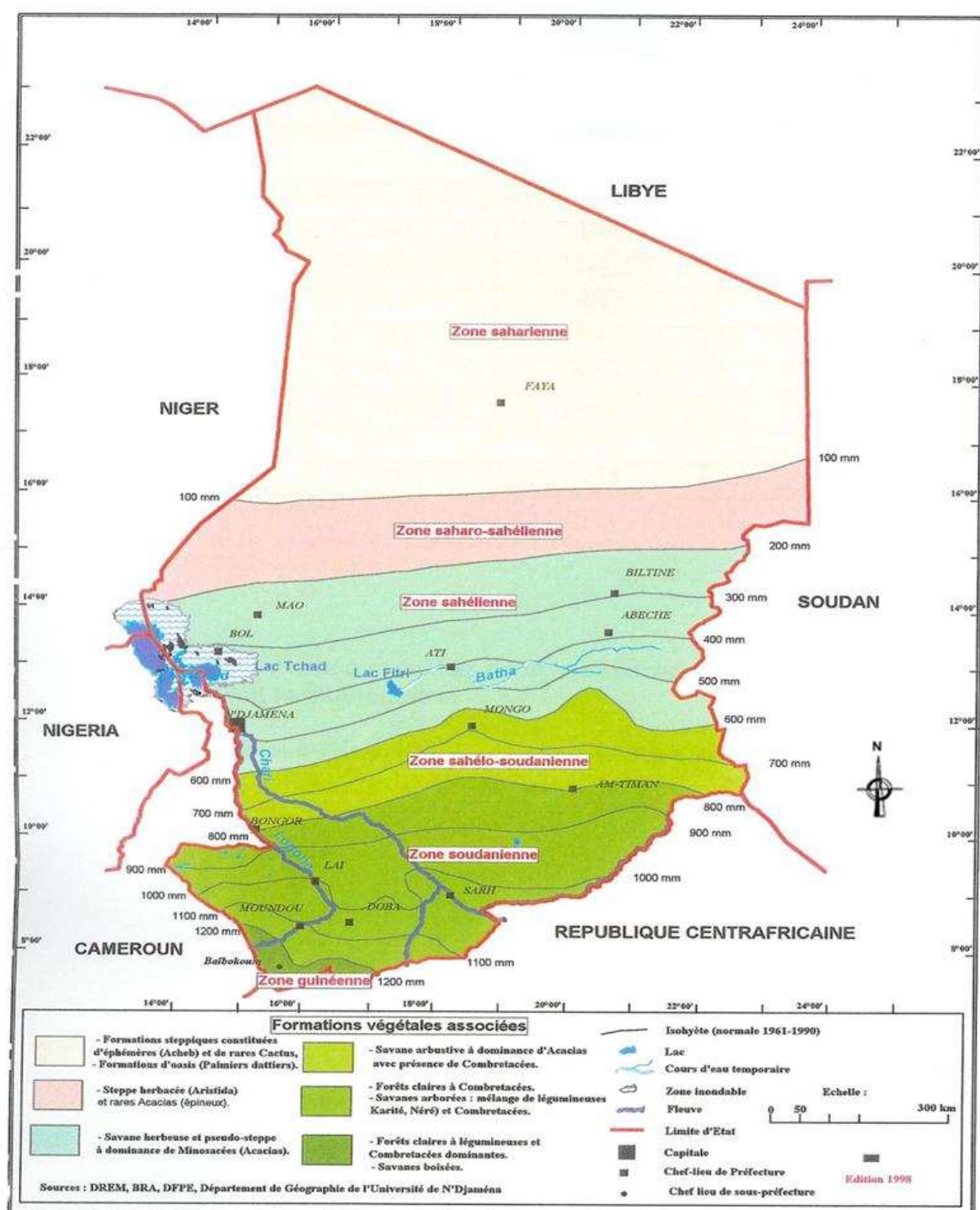
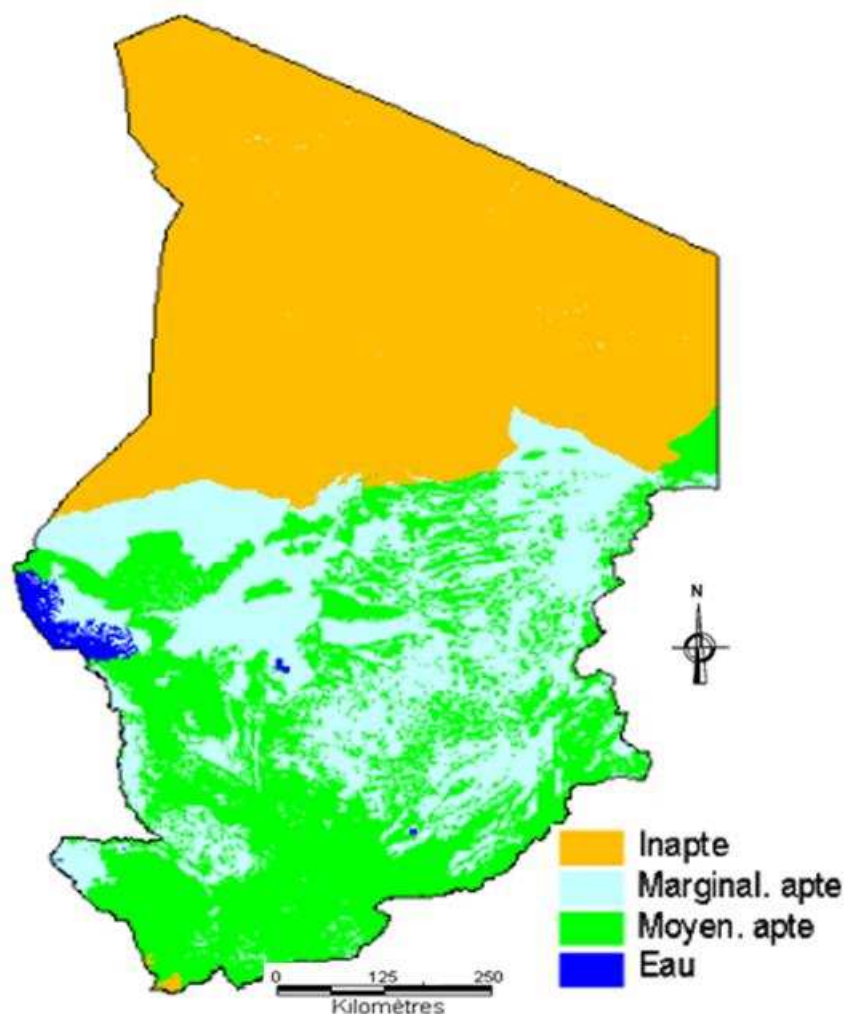


Figure 1. Carte climatique du Tchad avec les formations végétales associées

La zone saharienne est dominée par le désert. Les seuls arbres qu'on y trouve sont des épineux rabougris ou de palmeraies accompagnés d'un tapis de *Cenchrus biflorus*, *Eragrostis tremula*, etc. Cette végétation se développe sur des sols bruns ou brun-rouge subarides.

Les terres agricoles représentent 48 millions d'hectares, soit 38% du territoire national (Figure 2). Les terres arables représentent seulement 8% des terres agricoles, le reste étant des pâturages (temporaires et permanents), indiquant le poids de l'élevage dans l'occupation de l'espace. La superficie des terres irrigables est de 5,6 millions d'hectares dont 6% sont considérés comme facilement irrigables.



Source : Aghrymet, 2001 (www.oecd.org/dataoecd/39/12/41643244.pdf)

Figure 2. Aptitude des terres agricoles au Tchad en 2001.

Cinquante cinq pourcent des terres ont un potentiel élevé, permettant une saison agricole de plus de 50 jours (CSAO-CILSS, 2008). Avec une population active actuellement estimée à 4 847 866 habitants, la surface arable est inférieure à 0,8 ha par actif.

Les ressources en eaux souterraines et de surface ont un volume annuel de 263 à 455 milliards de m³ provenant des cours d'eau dont les plus importants sont le Chari et le Logone de longueurs respectives 1200 et 1 000 km. Ces fleuves traversent toute la zone des savanes pour déverser 40 milliards de m³ d'eau dans le Lac Tchad (République du Tchad, 2008). En 2008, la superficie du Lac Tchad n'était que de 2 500 km², soit moins de 10 pc de la surface qu'il occupait dans les années 1960. D'autres lacs tchadiens comme le Fitri (420 km²), l'Iro (200 km²), le Léré (42 km²), le Fianga (30 km²) et le Tikem (15 km²) complètent le réseau hydrographique tchadienne, surtout tributaire du régime des pluies. Aux caprices pluviométriques, s'ajoute l'évaporation des eaux qui peut atteindre 3 000 mm an⁻¹.

Le deuxième Recensement Général de la Population (RGPH2) en 2009 a donné le chiffre de 11 274 106 habitants. La tranche d'âge de 18 ans et plus représente près de 43 pc de la population totale. La proportion des femmes dans la population totale est de 51 pc (Dokalyo, 2009, <http://www.cefod.org/spip.php>, consulté le 23 mars 2011). Avec une densité moyenne de 8,7 habitant/ km² et un taux d'accroissement intercensitaire de 3,5 an⁻¹ (doublement de la population en moins de 20 ans), la population est inégalement répartie dans le pays. Les régions du sud ont les plus fortes densités de la population qui varie entre 15 et 120 habitants au km² contre une moyenne nationale de 9 habitants au km². Les régions du Centre et du Nord accueillent respectivement près de 48 pc et de 3 pc de la population.

Avant l'exploitation pétrolière en 2003, l'économie était peu diversifiée. En effet, 80 pc des exportations relevaient du secteur rural. Le secteur agricole contribue pour 21 pc du Produit Intérieur Brut (PIB) et occupe 2,3 millions de personnes soit 80 pc de la population (Ministère de l'Agriculture, 2005). Au début des années 2000, l'agriculture représentait 50 pc de la production du secteur primaire et 16 pc du PIB. Le coton fibre était la seule culture de rente et contribue pour 45 pc aux recettes d'exportation hors pétrole (Ministère de l'Agriculture, 2005). L'élevage représente 18 pc du PIB et 26 pc des recettes d'exportation hors pétrole. Il joue un rôle social et économique importante pour 40 pc de la population tchadienne. Il se caractérise par la transhumance de ses 80 pc du cheptel estimé à 19,2 millions de têtes, dont 10 millions de bovins, 3 millions d'ovins, 5 millions de caprins et 1,2 millions de camelins.

La pêche souffre du rétrécissement du réseau hydrographique provoqué par les sécheresses et l'ensablement. Elle est de type artisanal avec une production annuelle estimée à 80 000 tonnes de poissons et apporte 3 pc des recettes d'exportation.

Les productions ligneuses sont mal connues même si l'*Accacia senegal* ou gommier, qui occupe une superficie d'environ 380.000 km², place le Tchad parmi les premiers producteurs de gomme arabique. Sa production apporte 7 pc des recettes d'exportation.

La production pétrolière en 2003 avec une capacité maximale de 22 000 barils par jour provenant de plus 500 forages, a atteint 147.000 barils par jour en 2007 (ESSO, 2007) plaçant ainsi le Tchad au 10^e rang de producteur du continent africain (Merle *et al.*, 2007). Ce pétrole est transporté dans un oléoduc souterrain sur 1070 km entre le bassin de production Doba (Tchad) et Kribi (Cameroun) sur l'océan atlantique.

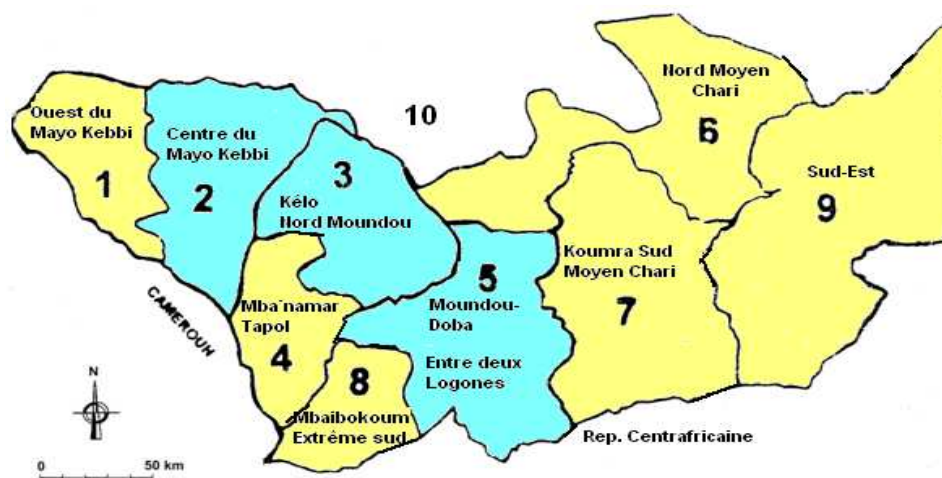
1.2. Présentation de la zone des savanes

1.2.1. Situation géographique et physique

La zone des savanes du Tchad est comprise entre le 8^e et le 15^e parallèle. L'étude a été concentrée précisément dans la zone soudanienne qui se situe entre 8^e et 10^e parallèle. La zone couvre 130 060 km² soit 10 pc du territoire national. Les terres cultivables sont estimées à 200 000 ha. La pluviosité varie entre 800 et 1200 mm. Quatre critères ont été utilisés pour caractériser la zone en 10 unités agro écologiques (Annexe 1) :

- la pression démographique ;
- les dynamiques de peuplement (mouvements migratoires) ;
- le niveau d'association agriculture-élevage et les relations entre agriculteurs et éleveurs ;
- l'influence historique du coton dans les transformations des systèmes agraires.

Chaque unité est considérée comme ayant la même problématique de recherche et de développement. L'étude a été effectuée dans les unités 2, 3 et 5 (Figure 3).



Source : Ministère de Développement Rural et CIRAD, 1996

Figure 3. Découpage de la zone soudanienne et localisation de la zone d'étude (2; 3 et 5)

Les zones dans les quelles l'étude a été effectuées présentent des caractéristiques suivantes :

- Zone 2 (Centre de Mayo Kebbi, Pays Toupouri et Moussey)

La densité de la population est moyenne à forte (60 habitants/km², M.D.R et CIRAD, 1996). La culture du sorgho de décrue appelé « Berbéré » est fortement développée et met en valeur de très grands espaces de terres argileuses entre Pala et Fianga. Les relations entre les sédentaires et les transhumants ne sont généralement pas conflictuelles. Il existe un contrôle de l'accès aux pâturages exondés par les autorités locales (chefs de canton). Le site de Nguetté¹ est dans cette zone.

- Zone 3 (Kélo-Nord de Moundou)

Avec une densité de population de plus 100 habitants/km², la pression foncière est forte au niveau de ces espaces. La population migre de plus en plus vers la Zone 4. Dans ce contexte, les jachères de longue durée et la savane typique ont laissé la place à une végétation anthropique en parcs à karité et à néré. La saturation foncière a conduit à l'épuisement des sols et à des rendements faibles. L'élevage transhumant est relativement peu présent dans cette zone pauvre en ressources fourragères. L'arachide est considérée comme une alternative possible pour se substituer au coton sur ces terres relativement pauvres. Le site de Tala¹ est dans cette zone.

- Zone 5 (Moundou-Doba, entre les 2 Logones)

C'est une zone de densité de population moyenne à forte, variant de 30 à 60 habitants/km². Cet espace est traversé par deux grands axes routiers bitumés qui lui donnent des avantages comparatifs certains par rapport à d'autres zones pour le développement économique et le développement des marchés. Environ 50 pc des terres agricoles sont cultivés chaque année en céréales, coton, oléagineux, etc. On observe de plus en plus une sédentarisation des éleveurs transhumants. L'exploitation pétrolière a fait évoluer de manière remarquable l'environnement socioéconomique et les systèmes agraires. Le site de Ndaba et la Station de recherches agronomiques de Bébédjia sont localisés dans cette zone.

1.2.1.1. Climat

Le climat est du type soudanien avec des précipitations qui varient du nord au sud de 500 à plus de 1500 mm par an selon les années. A l'instar des savanes de l'Afrique centrale, l'aléa climatique interannuel et intra annuel de la zone apparaît extrêmement important, tant en quantité qu'en répartition des pluies pendant la saison pluvieuse. Celle-ci est notamment marquée par un démarrage des saisons des pluies au caractère très imprévisible, qui se traduit souvent par des poches de sécheresse dont la plus persistante et dramatique se situe chaque

saison des pluies entre la 2^e décade de juin à la 1^{re} décade de juillet. Le climat est aussi caractérisé par deux saisons dont une saison sèche (novembre à mars) et une saison de pluies (avril à octobre).

Les températures moyennes annuelles de la zone varient de 24°C à l'extrême Sud à 28°C à sa limite Nord, avec des maxima de 34°C en moyenne et des minima de 20°C en moyenne.

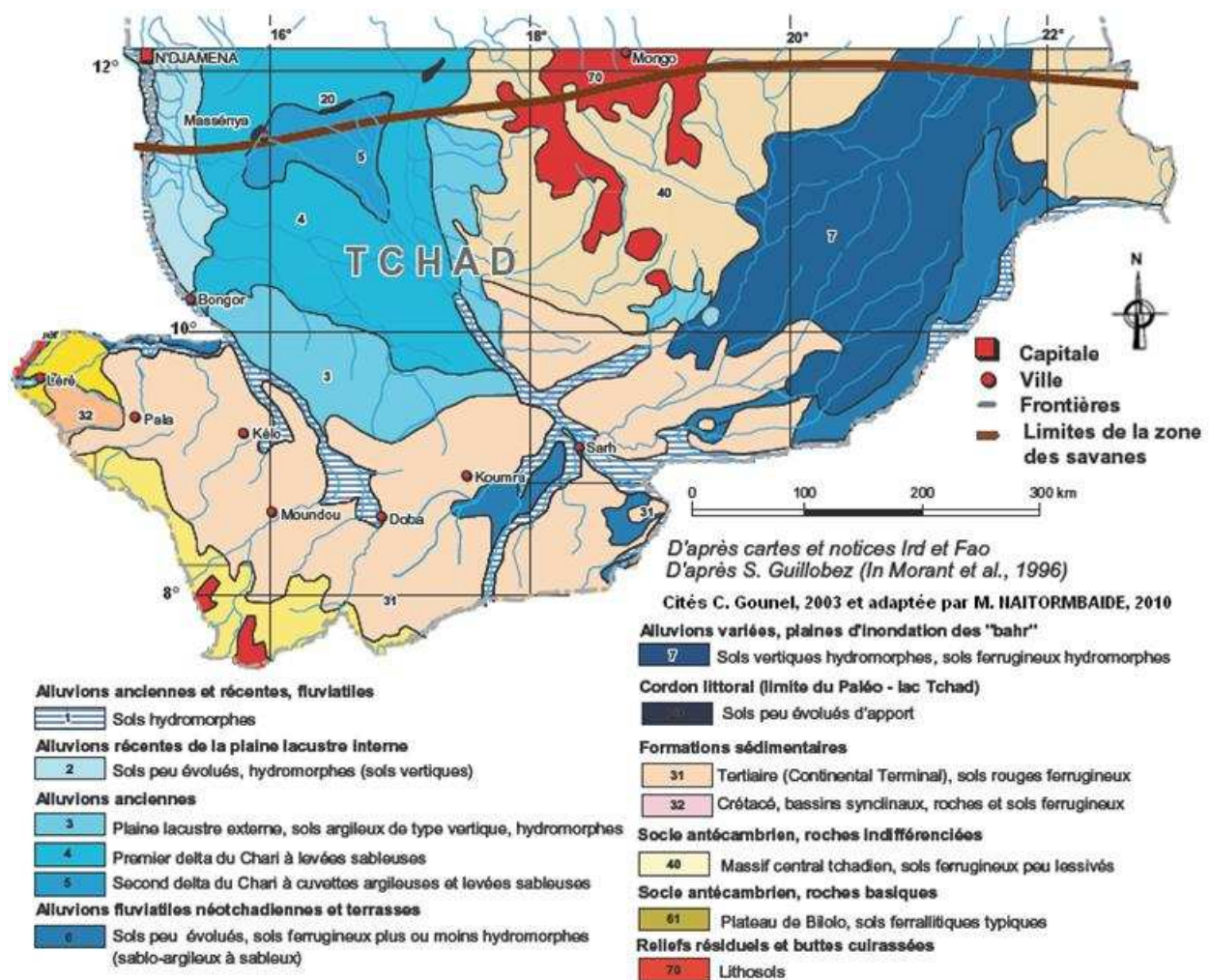
1.2.1.2. Contexte morpho pédologique

Les savanes tchadiennes se situent pour l'essentiel sur le substratum panafricain. Deux principales grandes formations sédimentaires anciennes datant du tertiaire et du crétacé ont été reconnues dans les savanes (Pias, 1970). Les formations tertiaires du continental terminal portent des sols rouges ferrugineux (modaux, lessivés, indurés) qui constituent la quasi-totalité du bassin cotonnier et les formations du crétacé des bassins synclinaux à roches et sols variés dans la partie ouest (Pala) de la zone.

La nature et la répartition des sols sont liées au climat, au modelé, à la végétation, et surtout aux formations géologiques mères. Les alluvions fluviales actuelles et récentes, qu'on rencontre particulièrement dans les vallées du Chari et du Logone ont donné des sols hydromorphes argilo-sableux ou argileux, à engorgement temporaire. Parmi les alluvions anciennes, on distingue trois types de sols (Pias, 1970) :

- les sols argileux vertiques hydromorphes de la plaine lacustre, zone du sorgho de décrue ;
- les sols ferrugineux du premier delta du Chari à levées sableuses, cultivés en céréales (mil-sorgho) ;
- les cuvettes argileuses et les levées sableuses du second delta du Chari avec des sols hydromorphes, vertiques et ferrugineux, où les céréales sont prédominantes.

La figure 4 montre les grandes formations géologiques de surface.



Source : Morant *et al.* (1996).

Figure 4. Les grandes formations géologiques de surface dans les savanes tchadienne.

1.2.1.3. Végétation

Les savanes tchadiennes se caractérisent par trois domaines de végétation marqués par une strate herbacée supérieure continue, composée essentiellement de graminées vivaces, et parsemée plus ou moins densément d'arbres ou d'arbustes à port fréquemment tortueux (Jamin *et al.*, 2003).

- un domaine soudanien ou de savanes boisées et de forêts claires sèches médio-soudaniennes caractérisé par la présence des combrétacées et d'un tapis graminéen est composé surtout d'*andropogon* sp.

- un domaine de savanes soudano-sahéliennes où les activités agricoles ont transformé le paysage végétal en savanes arbustives dominées par des combrétacées. Le tapis graminéen est marqué entre autres par la présence d'*Andropogon* sp.

- et un domaine de savanes sahélo-soudaniennes très marquées par les activités agricoles et pastorales. Ces savanes sont caractérisées par la présence d'épineux (Acacia, Balanites, etc.), notamment sur sols grisâtres.

Sous les effets conjugués de l'augmentation de la population et donc de l'extension des cultures et de la pression des éleveurs transhumants qui descendent du Nord du pays et qui se sédentarisent de plus en plus dans les savanes, les formations végétales sont perpétuellement modifiées. On constate un net recul de la savane arborée vers l'extrême sud au profit de formations herbacées.

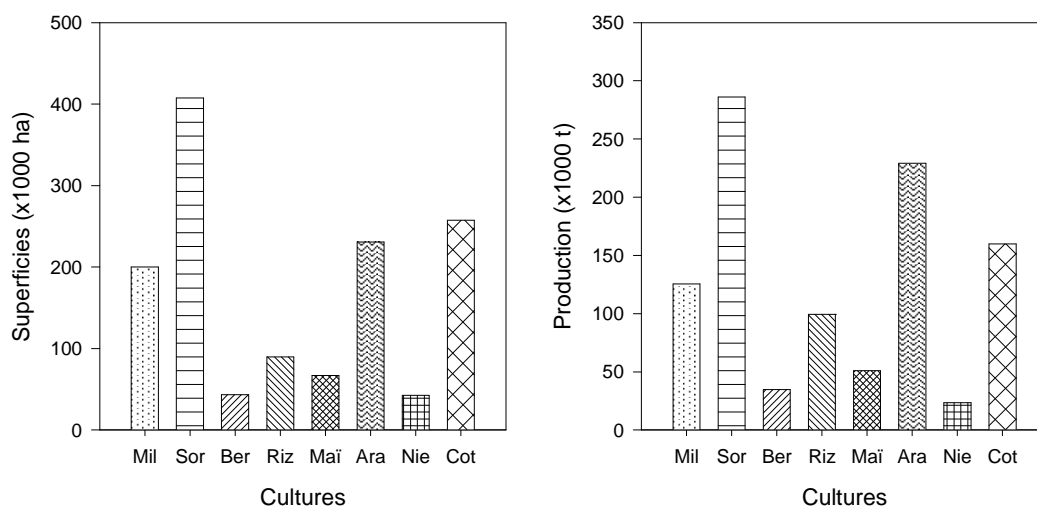
1.2.2. Contexte humain et systèmes de culture dans les savanes

1.2.2.1. Diversité du peuplement et des conditions socio-économiques

En 2009, la population était de 4 676 218 habitants (Dokalyo, 2009, <http://www.cefod.org/spip.php>, consulté le 21 novembre 2009). Des mouvements migratoires plus ou moins importants des régions à forte pression démographique (plus de 100 habitants/km²) vers les régions moins peuplées (moins de 15 habitants/km²) s'observent actuellement. Le fort peuplement qui caractérise la zone des savanes tchadiennes par rapport au reste du territoire national lui confère une grande diversité socioculturelle et linguistique, impliquant également une diversité des systèmes de culture.

1.2.2.2. Systèmes de culture

Le système de culture extensif, basé sur la jachère, qui permettait jadis de régénérer la fertilité des sols connaît ses limites ces dernières années à cause de la réduction de sa durée. La culture continue est une pratique courante dans les terroirs où la pression anthropique est très forte (plus de 100 habitants/km²). Cette agriculture itinérante qui ne peut être pratiquée que dans des zones faiblement peuplées n'est plus à même de répondre aux défis posés par la pression démographique. Les principales cultures vivrières pratiquées en termes de superficies sont : le sorgho, l'arachide, le mil, le riz, le maïs, le sorgho de décru et le niébé. Ces dix dernières années, l'arachide est en passe de devenir une culture de rente comme le coton. De 1996 à 2010, le coton a occupé en moyenne 18 pc des superficies cultivées dans les savanes tchadiennes. La Figure 5 montre que l'augmentation des productions agricoles est quasiment proportionnelle à l'augmentation des superficies cultivées (Annexes 2 et 4). Les rendements des cultures (Annexe 3) sont donc stagnants dans la zone ces dernières années (1996- 2010).



Légende : sor : sorgho ; Ber : berebéré (sorgho de décru) ; Maï : maïs ; Ara : arachide ; Nie : niébé, Cot : coton.

Source : DSA, 2011.

Figure 5. Superficies et productions moyennes des principales cultures des savanes.

En plus des principales cultures vivrières, s'ajoutent le sésame, le voandzou, le manioc, l'igname, le taro, la patate douce, etc. Ces cultures sont pour la plupart intégrées dans le système cotonnier qui bénéficie des appuis techniques des structures d'encadrement.

Les rotations se caractérisent par la réduction des durées des jachères et le temps de mise en culture d'un même bloc plusieurs années de suite qui augmente. L'assolement classique observé est de type céréale / arachide / coton. Les produits vivriers sont pour la plupart autoconsommés dans les ménages et vendus sur les marchés locaux alors que le coton est un moyen d'obtenir le capital nécessaire à la réalisation d'un projet tel que la traction animale.

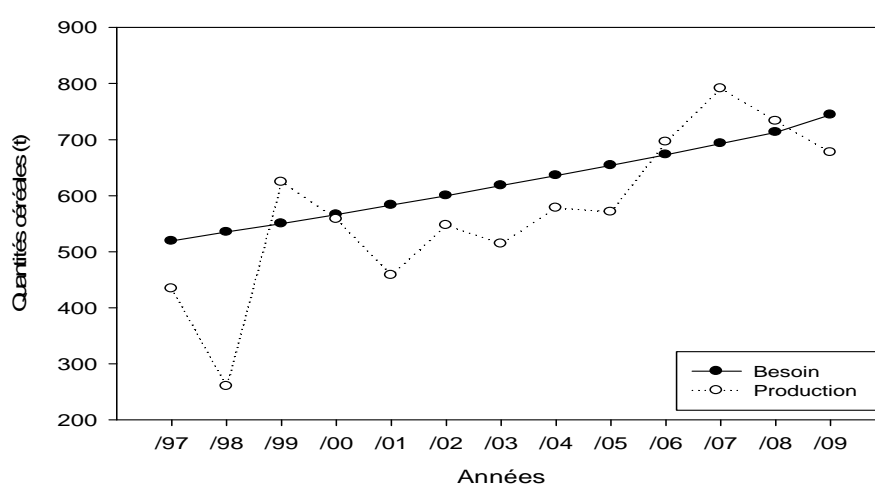
La problématique de gestion du foncier varie d'une zone à l'autre. Dans les localités à forte pression démographique (>100 habitants/km²) comme la zone 5, les sols sont relativement dégradés. Pour pallier à cela, les producteurs pratiquent des apports organiques, abandonnent les résidus des cultures dans les parcelles et les surveillent afin d'éviter les feux accidentels. Dans la zone cotonnière, près 67 pc des cotonculteurs laissent sur place les résidus de la précédente culture pendant la saison sèche et effectuent un brûlis juste avant le labour (Hauswirth et Djinodji, 2006). L'enfouissement au labour des résidus du précédent cultural sans brûlis est rarement pratiqué.

Les mesures de restauration et d'amélioration de la fertilité des sols préconisées par la recherche, et actuellement vulgarisées par les services de développement rural et les ONG souffrent du manque de moyens d'équipements agricoles pour l'exécution des travaux. Le

niveau d'équipement en matériel de transport, notamment en charrette, est très faible. En effet, seulement entre 27 et 37 pc des exploitants possèdent des équipements de traction animale (Piéri, 1989 ; Naitormbaide *et al.*, 2010 ; Djondang et Havard, 2010). Outre l'amélioration de la fertilité des sols par l'apport de fumure organique qui n'est pratiquée que par quelques exploitants pour les raisons suscitées, l'apport des engrais minéraux est à prendre en compte. Seuls, les agriculteurs qui pratiquent la culture du coton ont accès aux engrais à travers les crédits intrants qui leur sont accordés en début de campagne. Cependant, selon Hauswirth et Djinodji (2006), 25 pc des cotonculteurs ont vendu leurs engrais à travers leurs associations en 2006. Cela engendre souvent la dilution des doses des engrais recommandées par la recherche et la vulgarisation.

Les sols étant pauvres en matière organique, en azote et en phosphore, les productivités des cultures sont relativement faibles. En zone exondée, les teneurs en carbone du sol varient entre 3,3 et 8,1 g kg⁻¹ selon la pression anthropique. Celles du phosphore, varient entre 90 et 360 mg kg⁻¹ de sol (Naitormbaide *et al.*, 2010).

A la pauvreté des sols, s'ajoutent les environnements technique et économique peu favorables pour de bonnes productions végétales. En effet, les productions végétales étaient faites dans des conditions naturelles sans maîtrise d'eau et parfois par l'utilisation des variétés des espèces cultivées moins performantes. L'importance des productions végétale est donc étroitement liée aux conditions bioclimatiques de l'année. Les productions céréalières, aliments de base de la population de la zone, connaissent des fluctuations dans le temps et dans l'espace (Figure 6).



Source : Nuttens, 2001 ; Dokalyo, 2009 et DSA, 2011.

Figure 6. Evolution des productions céréalières et besoins de la population.

La situation alimentaire de la zone soudanienne se caractérise, ces dernières années, par de réguliers déficits céréaliers. La production régionale qui varie de 260 à 791 t selon les bonnes ou mauvaises années ne permet pas de couvrir les besoins en céréales de la population. Pendant les 12 dernières années (1997- 2009), seules les années 1999 et 2007 ont été excédentaires en productions céréalières par rapport aux besoins de la population. L'année 1998 était la plus mauvaise car seulement 50 pc des besoins céréaliers de la population ont été couverts. Ces déficits ne sont estimés qu'en tenant compte des productions réelles et la population de la zone. Or, des exportations massives sont faites vers le centre et le nord du pays. Cela peut considérablement augmenter les déficits observés sur la figure ci-dessus.

1.2.3. Sites d'étude

Tout travail de recherche n'est possible qu'à partir du moment où il est situé dans un contexte donné (Dubois, 2005). La recherche a été menée sur quatre sites, correspondant à trois zones agro-écologiques. Les expérimentations agronomiques ont été réalisées sur la station de Bébédjia. Les enquêtes et les tests agronomiques ont été menés avec les producteurs de Nguettél, Ndaba et Tala1, trois sites situés dans des zones agro écologiques spécifiques. Bébédjia et Ndaba étant dans la même zone agro écologique, la recherche en milieu paysan n'a concerné que Ndaba car les résultats obtenus dans un de ces sites sont extrapolables dans l'autre site et vice-versa.

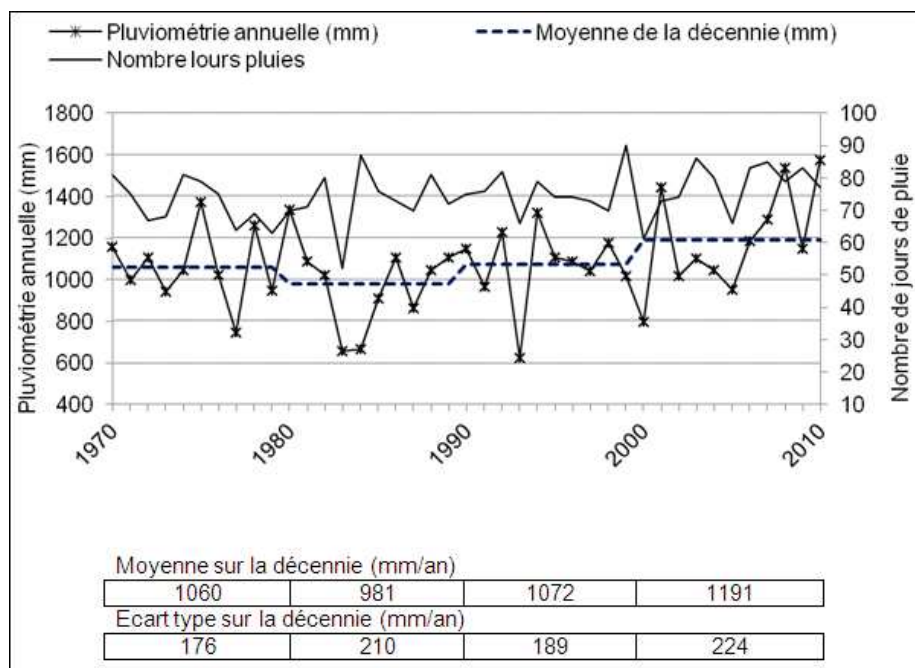
1.2.3.1. Station agronomique de Bébédjia

La Station de Bébédjia (entre 16° 30' et 16° 35' de longitude Est et entre 8° 38' et 8° 44' de latitude Nord) couvre une superficie de 400 ha. Elle a été créée en 1940 comme poste agricole, prise en charge par l'Institut de Recherche sur le Coton et Textiles Exotiques en 1946, puis par le Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement/Cultures Annuelles (CIRAD-CA) en 1982. En 1998, la Station de Bébédjia a été rétrocédée à l'Institut Tchadien de Recherche Agronomique pour le Développement (ITRAD) qui a fait d'elle la base du Centre Régional de Recherche Agronomique pour la Zone soudanienne.

- **Pluviométrie**

Pendant les 40 dernières années (1970 – 2010), la pluviosité annuelle a varié entre 623,1 mm (1993) et 1577 (2010) mm. La décennie la moins pluvieuse a été celle des années 1980 à 1989 avec une moyenne de 981 mm de pluie (Figure 7). La dernière décennie a été la plus pluvieuse avec une moyenne de 1191 mm. Cependant, celle-ci a été marquée par sept

années déficitaires sur les dix par rapport à la moyenne décennale (Annexe 5a). Sur l'ensemble des 40 années, une année sur deux a été déficitaire par rapport aux moyennes décennales.



Source : Station de Bébédjia (2011)

Figure 7. Evolution de la pluviométrie annuelle de 1970 à 2010 à la Station de Bébédjia.

Pendant les années d'étude (2008, 2009, 2010), les quantités des pluies enregistrées à la Station de Bébédjia ont été abondantes mais souvent mal réparties dans le temps.

En 2008, il a été enregistré 1538 mm de pluies en 79 j. La pluie utile (>20 mm) qui a permis certains semis n'a été enregistrée qu'à la 3^e décade du mois d'avril. La 1^{re} décade de juin, période pendant laquelle la plupart des semis se font dans la zone a connu une sécheresse.

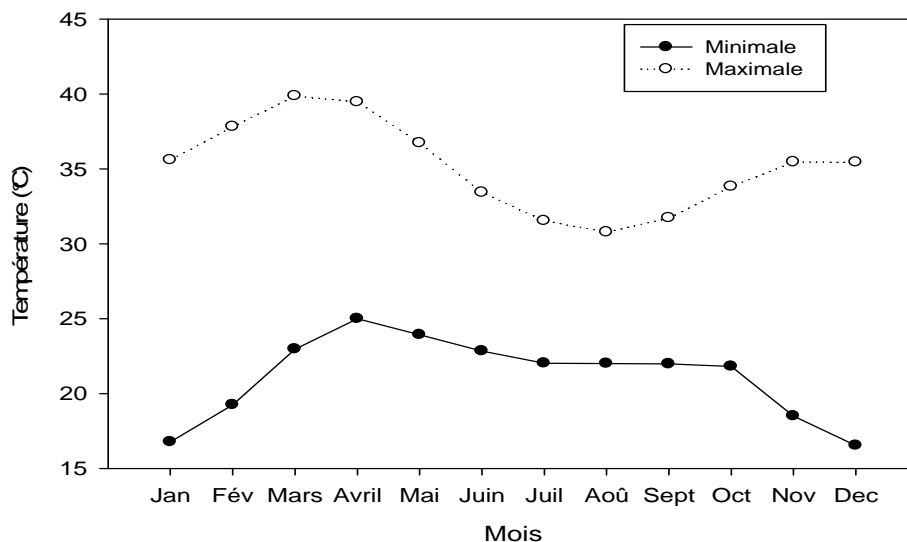
La pluviosité de l'année 2009 a été la plus irrégulière très mal répartie dans le temps. En 82 jours, 1149,8 mm de pluies ont été enregistrées. Trois période sèche dont la 1^{re} période s'est étendue durant les deux dernières décades de mai. La 2^e entre la 3^e décade de juin et la 1^{re} décade de juillet et enfin la 3^e à la 2^e décade de septembre.

L'année 2010 a été la plus pluvieuse depuis plus de 40 ans (1577 mm). Comme les deux années précédentes, celle-ci est également marquée par deux période sèches qui se situent aux 2^e décade de juin et septembre.

Les trois années d'étude ont pour caractéristiques communes deux à trois périodes sèches pendant l'hivernage. Ces poches de sécheresse ont soit occasionné le retard des semis, soit affecté la croissance et le développement végétatif des cultures. En conséquence, les résultats agronomiques sont à relativiser.

- **Températures**

Les températures moyennes minimales durant les 30 dernières années (1980 à 2010) se sont situées entre décembre et janvier avec respectivement 16,5 et 16,8 °C (Figure 8). Durant la même période, les mois les plus chauds ont été mars et avril avec des températures respectives de 39,8 et 39, 5° C (Annexe 5a).



Source : Station de Bébédjia (2011)

Figure 8. Evolution des températures à la Station de Bébédjia de 1980 à 2010.

L'analyse des moyennes décennales des températures a révélé qu'entre la décennie des années 1980 à 1989 et la décennie des années 2000 à 2010, les températures maximales des mois de mars et avril ont augmenté respectivement de +1,3 et +1,1 °C. Entre la moyenne de la décennie des années 1990 à 2000 et la décennie des années 2000 à 2010, l'augmentation respectives de la température observée pendant les mois de mars et avril ont été de +0,5 et +1,9 °C. La zone connaît un réchauffement climatique relatif.

- **Les sols**

Les principaux types de sols identifiés à Bébédjia sont, selon la classification des Sols proposé par CPCS (1967).

- les sols ferrugineux tropicaux hydromorphes ;
- les sols ferrugineux tropicaux lessivés généralement peu fertiles ;
- les sols faiblement ferralitiques.

La végétation se compose d'une strate arborée formée principalement de *Parkia biglobosa* (Jacq.) R.Br., *Daniella oliveri* (Rolfe) Hutch. & Dalz., *Terminalia avicennoides* Guill. & Perr., *Vitellaria paradoxa* C.F.Gaertn. A celles-ci s'ajoutent quelques espèces

fruitières telles que *Mangifera indica* L. et *Citrus limon* (L.) Burm. f. La strate herbacée est dominée par *Digitaria horizontalis* Willd., *Pennisetum pedicellatum* Trin.

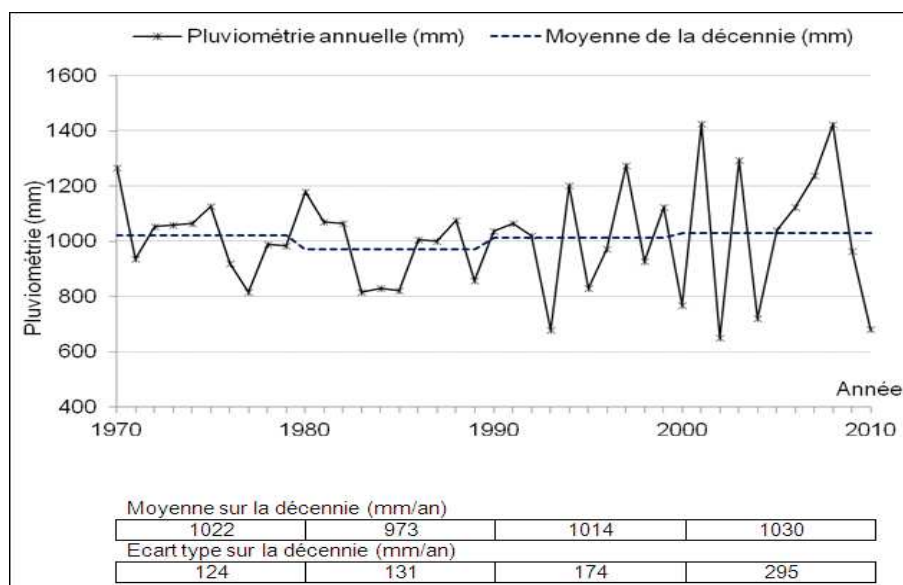
La population actuelle de Bébédjia est estimée à 21 475 habitants.

Les principales cultures vivrières cultivées par ordre d'importance en terme de superficie sont le mil, le riz, l'arachide, le sorgho, le maïs. Le coton est la seule culture de rente mais peu cultivé ces dernières années.

1.2.3.2. Site de Ndaba

Ndaba est localisé dans la même zone agro écologique que Bébédjia. Il est situé entre 16°45'39 et 16°52'27 de longitude Est et entre 8°26'51 et 8°31'41 de latitude nord. Le site couvre une superficie de 90 km² et comptait 1 066 habitants en 2011. Ndaba est le site à plus faible densité de population qui n'est que de 21 habitants/km².

La moyenne générale des pluviométries au cours des 30 dernières années est de 1006 mm. Treize années ont été déficitaires par rapport à la moyenne générale annuelle. La 1^{re} décennie est marquée par les années 1983 ; 1984 et 1985 déficitaires. Pendant la 2^e décennie, une année sur deux a été déficitaire (Annexe 5c). Enfin, durant la 3^e décennie pendant laquelle l'étude a été effectuée 4 années sur 10 ont été déficitaires dont les années 2009 et 2010 pendant lesquelles l'étude a été effectuée (Figure 9).



Source : DREM (2011)

Figure 9. Evolution de la pluviosité annuelle (données de Doba à 25 km de Ndaba).

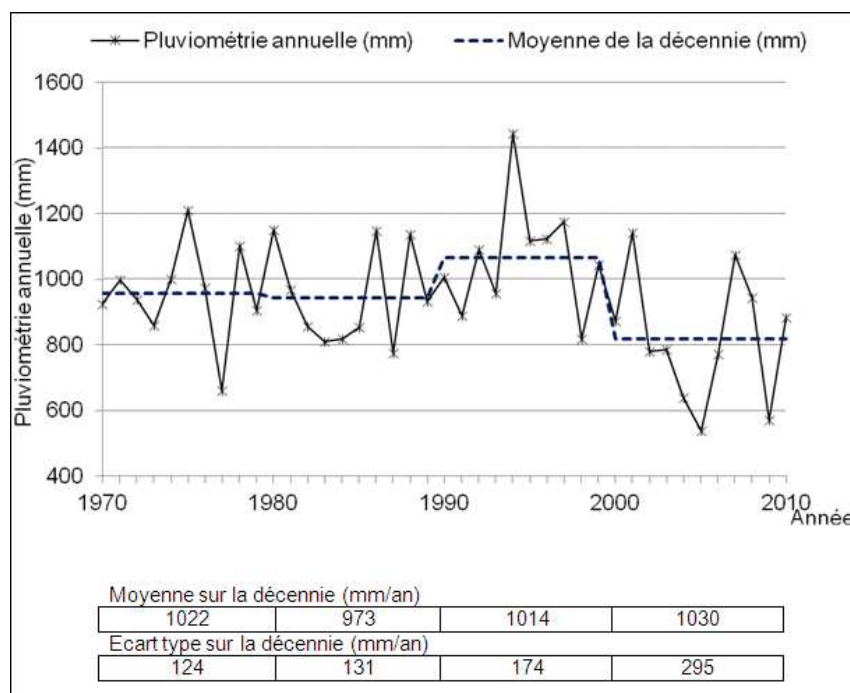
On distingue à Ndaba deux principaux types de sols dont les sols hydromorphes de bas-fonds et les sols ferrugineux tropicaux beiges en surface.

La végétation naturelle est de type arboré, dominée par les combrétacées et andropogons.

1.2.3.3. Site de Nguetté1

Situé dans une zone à moyenne pression anthropique (<60 habitants/km²), Nguetté1 couvre une superficie de 5 280 ha. Ce site comptait environ 2 600 habitants en 2005 (Djinodji, 2008).

Avec une saison des pluies qui s'étale d'avril à octobre, les mois de juillet et août sont les mois les plus pluvieux (200 à 250 mm). Pendant ces 30 dernières années (1980 – 2010), la moyenne des pluviométries est de 939 mm (DREM, 2011). La dernière décennie est particulièrement sèche car seules les pluviométries des années 2001 ; 2007 et 2008 ont atteint ou dépassé légèrement la moyenne générale (Figure 10).



Source : DREM (2011)

Figure 10. Evolution de la pluviométrie annuelle (données de Pala, située à 40 km).

Durant la période d'expérimentation (2007-2010), les pluviosités des années 2009 et 2010 ont été déficitaires avec respectivement 571 et 884 mm contre une moyenne générale de 939 mm (Annexe 5b).

On distingue à Nguetté 1 trois types de sols dont les lithosols, les sols colluviaux et les sols ferralitiques.

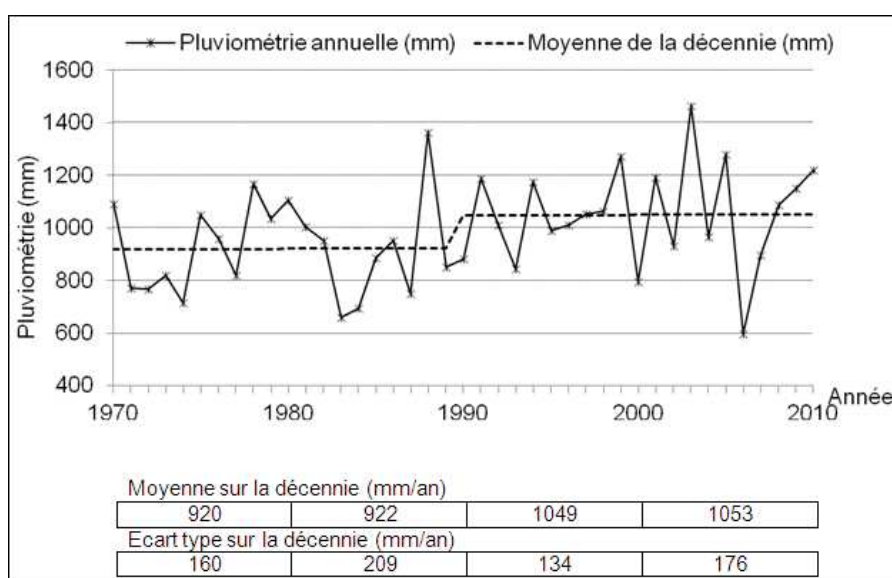
La végétation naturelle est de type arboré dominée par *Prosopis africana*, *Anogeissus leiocarpus* et *Vitellaria paradoxa*. Les champs et les jachères de 5 ans et plus occupent

respectivement 52 et 31 pc des terres cultivables. Les terres agricoles occupent 85 pc de la superficie de Nguetté1.

1.2.3.4. Site de Tala1

Avec une population estimée 700 habitants sur 8 km², soit une densité de 88 habitants/km², Tala est localisé dans la zone à forte pression anthropique.

Avec une saison de pluies qui s'étend d'avril à octobre, les de juillet et août sont les plus pluvieux (230-255 mm). La moyenne des pluviosités les 30 dernières années est de 993,5 mm. Des déficits pluviométriques ont été observés une année sur deux. Les années 1983 ; 1984 ; 2006 et 2008 ont été les plus critiques avec moins de 700 mm (Figure 11).



Source : DREM (2011)

Figure 11. Evolution de la pluviométrie annuelle (données de Bénoye à 11 km de Tala1).

Les années 2007 et 2008 ont été déficitaires par rapport à la moyenne générale des 30 années.

Les sols sont de type ferralitiques, constitués des « koros » rouge en surface.

La végétation naturelle est surtout caractérisée par quelques rares pieds de *Vitellaria paradoxa* et *Parkia biglobosa* épargnées par la population à cause de leur utilité alimentaire. La strate herbacée est dominée par *Pennisetum pedicellatum* et *Eragrostis tremula*.

Conclusion partielle

En dépit d'importantes potentialités en ressources naturelles dont regorge le Tchad, sa population est en situation d'insécurité alimentaire chronique. Deux années sur trois, la production vivrière du pays est déficitaire. On considère que les deux tiers des ménages tchadiens sont en situation d'insécurité alimentaire structurelle, dont 11 pc en situation d'insécurité sévère. Les causes sont principalement les aléas climatiques, l'enclavement saisonnier de plusieurs régions productrices et l'insuffisance d'infrastructures sociales en milieu rural. Un problème majeur pour le développement à long terme du secteur agricole est la baisse de la fertilité des sols et la dégradation continue des ressources naturelles. Cela est dû à l'effet conjugué de la sécheresse, des pratiques agricoles peu adaptées, de l'érosion éolienne et hydrique et de la pression foncière. La mise au point des innovations qui participent à l'accroissement et à la diversification des productions agricoles par la gestion intégrée des ressources naturelles contribuera à assurer la sécurité alimentaire de la population qui doublera en moins de 20 ans.

La zone des savanes du Tchad compte plus 350 000 cotonculteurs, soit 71 pc des exploitants agricoles. C'est le principal bassin de production agricole du Tchad. Cependant, sous l'action conjuguée des aléas climatiques et de la pression anthropique, les productions agricoles sont stagnantes depuis les deux dernières décennies alors que la population augmente. La population de la zone est très inégalement répartie. En conséquence, les effets de la pression anthropique sur les ressources naturelles (terre, végétaux, etc.) ne sont pas les mêmes. C'est ainsi que dans la zone à faible pression anthropique comme Ndaba, les sols sont relativement riches. En revanche à Tala1 où on compte plus de 80 habitant/km², les sols sont assez dégradés à cause des pratiques agricoles peu adaptées. En conséquence, les productivités des cultures sont relativement faibles. Le choix a été porté sur Tala1, Nguetté1 et Ndaba qui sont contrastés (sols, végétation, population) pour nous permettre de mettre en exergue les pratiques de gestion de la fertilité des sols et les contraintes liées aux productions végétales. Cela permettra de faire des propositions d'amélioration des productions agricoles qui prennent en compte les conditions socio-économiques des producteurs dans leurs milieux.

CHAPITRE II. ETAT DE L'ART SUR LES PRATIQUES DE GESTION DE LA FERTILITE DES SOLS

2.1. Evolution de la définition de la notion de la fertilité

La définition de la fertilité a évolué avec le temps. Au XIX^e siècle, avec l'essor de la chimie, les agronomes se sont penchés sur les constituants du sol. Le concept de fertilité a alors pris le sens d'une mesure quantitative, liée à la richesse du sol en éléments minéraux (Lavigne-Delville, 1996). Selon cette approche, le sol contient un stock initial d'éléments minéraux qui peut augmenter ou décroître en fonction des pratiques culturales. La richesse d'un sol est alors perçue comme une sorte de capital, qui peut être appauvri ou enrichi en fonction des pratiques mises en œuvre par les agriculteurs sur leurs terres (amendements, jachère, etc.).

Le concept de la fertilité s'applique à différentes échelles de complexité. L'école française (Tourte, 1977) tend à l'appliquer à un niveau plus général : celui du milieu rural considéré comme un système dont les productions résultent des interactions entre ses trois constituants fondamentaux : le milieu humain, naturel (climats, sols, plantes, animaux) et le milieu technique (défini comme étant le mode de gestion des espaces ruraux).

Soltner (1986) définit la fertilité d'un sol comme étant la résultante de ses propriétés physiques, chimiques, et biologiques. Ces propriétés résultent elles-mêmes des interactions entre les milieux humains, naturels et techniques. Cette définition est la plus opérationnelle et s'adapte le mieux à notre thème d'étude.

2.1.1. Fertilité physique des sols

La fertilité physique d'un sol correspond au potentiel de production lié à l'ensemble de ses propriétés physiques (aération, cohésion, humidité, etc.). Elle dépend de sa topographie, de sa structure et de sa texture.

Soltner (1990) définit la structure d'un sol comme le mode d'assemblage des différents constituants minéraux et organiques qui influencent directement les propriétés du sol et le développement des êtres vivants qui s'y trouvent. La structure dépend donc en partie de sa texture. La texture d'un sol étant définie par ce même auteur comme sa teneur centésimale en sables grossiers et fins, en limons, en argiles.

La pratique culturale qui consiste à labourer le sol avant sa mise en culture peut dans certaines conditions affecter sa fertilité physique. Ouattara (2009) a montré que le labour conduit à terme à un effondrement de l'architecture (porosité structurale) du sol et ce, consécutivement à

une baisse de la stabilité structurale. Cela se traduit, *in situ*, par une diminution du pouvoir de conduction hydraulique, une réduction du diamètre des pores hydrauliquement fonctionnels et un temps plus court d'apparition du ruissellement.

2.1.2. Fertilité chimique des sols

Les éléments majeurs dont les plantes ont besoin pour leur croissance sont : l'azote, le phosphore, le potassium, le soufre. Les oligoéléments ou éléments traces reconnus indispensables au développement des végétaux sont : le bore, le fer, le cuivre, le zinc, le molybdène, le manganèse et le chlore. Le calcium, souvent présent en quantité suffisante dans un sol riche, est également indispensable. L'importance de ces éléments minéraux et de leur passage sous forme assimilable détermine la capacité d'un sol à se maintenir chimiquement fertile ou au contraire à s'épuiser rapidement. La concentration de l'ion hydrogène H^+ du sol détermine son degré d'acidité et sa toxicité aluminique. La pratique d'agriculture minière à faibles intrants, sans recyclage des résidus de récolte entraîne à la longue une exportation des éléments nutritifs et un appauvrissement continu des sols (Bationo *et al.*, 1998 ; Bado, 2002).

2.1.3. Fertilité biologique

La fertilité biologique d'un sol résulte surtout de l'activité biologique des micro-organismes, des vers de terre (lombrics), des termites et des racines des plantes. Les termites et les lombrics, abondants dans les savanes tropicales contribuent à la fertilité des sols en dégradant les végétaux et en ameublissant les sols. Les micro-organismes se nourrissent de la matière organique. Ce faisant, ils libèrent des éléments minéraux (nitrate, phosphate...) absorbables par les plantes et participent à la synthèse des acides humiques. Sans micro-organismes telluriques, il n'y aurait ni décomposition organique, ni assimilation optimale par les racines, ni restauration naturelle des fonctions disparues sous l'action d'une pollution et d'une contamination (CSRE, 2003). L'ensemble des interactions issues des organismes vivants constitue un réseau complexe qui conditionne la fertilité d'un sol (CSRE, 2003). La dégradation des fertilités physique et chimique des sols entraîne la réduction ou le changement de la composition spécifique de la flore ou de la faune du sol qui se manifeste par la perte de certaines espèces. Cela entraîne une rupture de l'équilibre dynamique qui serait maintenu par la diversité biologique. En conséquence, la fertilité biologique se dégrade aussi. Les restitutions organiques par des apports de fumier ou de compost, contribuent à améliorer les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol (Ciesielski *et al.*, 2008).

Dans le cadre de ce mémoire, les fertilités physiques, chimiques et biologiques des sols ont été abordées à travers des enquêtes et des essais agronomiques complétés par des analyses physiques, chimiques et biologiques des sols.

2.2. Pratiques de gestion de la fertilité des sols

Les pratiques de gestion de la fertilité des sols dans les savanes du Tchad reposent essentiellement sur les applications des fumures organiques (fumier, compost, résidus des cultures) et minérales (NPKSB et urée) sur les cultures ou la pratique des jachères de courtes (moins de 5 ans) ou de longues durées (plus de 10 ans).

2.2.1. Importance des apports organiques dans l'amélioration de la fertilité des sols

L'objectif premier des apports organiques est d'améliorer les teneurs des sols en matière organique. De nombreux travaux ont montré le rôle multiple de la MO dans l'aptitude du sol à produire durablement des récoltes en quantité et en qualité, dans la diminution du risque.

- **Conservation de l'humus des sols**

Quand la structure devient vraiment trop instable, les rendements s'effondrent. Piéri (1989) a proposé l'indice de déstructuration (st) :

$St (pc) = (MO \times 100) / (A+L)$, avec

MO : teneur en matière organique du sol (pc)

A : teneur en argile (pc)

L : teneur en limon (pc)

La structure est dégradée si $St < 5$ pc et bonne si $st > 9$ pc.

Un indice a été proposé également pour évaluer le seuil de MO au dessous duquel l'activité biologique ne peut plus être maintenue, surtout dans les sols très sableux. Il est essentiel de maintenir le taux de MO au dessus de certains seuils, qu'on peut fixer autour de 1 pc, au minimum 0,6 pc pour les sols sableux (Lavigne-Delville, 1996). En dessous de ce seuil, les réponses aux engrais minéraux deviennent très limitées voire nulles (Berger, 1990).

La qualité de la MO apportée - ou de la couverture végétale - est un facteur essentiel du stockage du carbone (C) dans le sol et le rapport C/N de cette MO est un indicateur nécessaire mais pas suffisant pour caractériser cette MO. Piéri (1989) a montré que des matériaux à C/N élevé peuvent enrichir sensiblement le sol en C pour autant que le rapport taux de fibres/contenu cellulaire ($NDF = \text{Neutral detergent fiber} / CC = \text{cellular content}$) est

suffisamment élevé (par exemple la coque d'arachide compostée pour laquelle NDF/CC est égal à 28). Par contre, la paille de sorgho, à C/N identique mais relativement moins riche en fibres (NDF/CC = 0.8), va induire, une fois incorporée au sol, une « sur minéralisation » de la matière organique des sols et de sa fraction organo-minérale. Cela conduit à un bilan de C total largement négatif.

- **Nutrition azotée des plantes**

L'engrais azoté seul ne peut pallier la baisse des réserves azotées, la fumure organique doit lui être associée (Ganry et Feller, 1977). On observe une synergie d'action entre l'engrais N et le compost au bout de plusieurs années. Ces auteurs ont montré qu'en fumure azotée optimale, l'alimentation des céréales s'effectue aux 3/4 à partir de la matière organique des sols. La matière organique constitue donc une réserve d'éléments fertilisants dont l'azote pour les plantes. Dans les conditions agro-écologiques de sols sableux tropicaux, l'effet de l'engrais azoté sur le rendement est important. L'accroissement du rendement de mil dû à la fumure azotée augmente avec le nombre d'années : +90 pc, +180 pc et +314 pc respectivement en 1^{re}, 2^e et 3^e année de culture (Ganry et Feller, 1977). L'engrais azoté favorise l'utilisation de l'azote du sol et sa réorganisation dans le sol est importante. La fourniture d'azote à la plante est tributaire de l'entretien organique du sol.

- **Fixation biologique de N₂ (FBN) par les légumineuses**

Les apports de fumier et de compost au sol stimulent la fixation biologique de l'azote atmosphérique par les légumineuses à graines telles que l'arachide et le soja (Ganry et Thuriès, 2010). Cette stimulation est d'autant plus faible que la pluviosité est faible. En effet, le stress hydrique est le premier facteur limitant de fixation de l'azote atmosphérique chez une légumineuse. L'accroissement de la FBN peut être spectaculaire. Sur une arachide cultivée au nord du Sénégal, on trouve dans les parties aériennes des valeurs variant de 11 à 63 kg ha⁻¹an⁻¹ d'azote atmosphérique fixées sous l'action des apports de fumier (Ganry et Thuriès, 2010).

- **Suppression des effets phytotoxiques**

Après enfouissement des pailles, apparaissent généralement des problèmes de carence en N et/ou de phytotoxicité liés à la libération d'acides et des phénols. Par ailleurs, certains précédents culturaux, en particulier le sorgho, peuvent engendrer dans certaines conditions un effet dépressif sur la culture suivante (allélopathie). Le compostage des pailles pour abaisser le C/N et biodégrader les acides phénoliques dans le 1^{er} cas, et l'apport de fumier pour stimuler

l'activité biologique du sol dans le 2^e cas, permettent de lever cette contrainte (Ganry et Thuriès, 2010).

La sécheresse selon sa nature va entraîner une baisse de l'activité biologique (faible humidité sur un temps assez long) ou une stimulation de celle-ci (alternances humectation-dessiccation rapprochées), et par voie de conséquence favoriser ou réduire la phytotoxicité. La fumure organique du sol est une assurance contre le préjudice potentiel de phytotoxicité.

- **Capacité d'échange cationique des sols (CEC)**

Les études de Suzor (1991) effectuées au nord Cameroun ont permis de montrer que le rendement en coton graine augmente avec la somme des bases (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), la CEC et le pH des sols. En effet, un sol à pH de 4,9 et une CEC de $1,7 \text{ cmol kg}^{-1}$ permettrait d'obtenir un rendement moyen de 1299 kg ha^{-1} de coton graine. Avec un pH de 5,6 et une CEC de 4 cmol kg^{-1} , ce sol permettrait d'améliorer ce rendement de +43 pc. D'autres travaux portant sur un ensemble de sols tropicaux de l'Afrique ont également montré des relations étroites qui existent entre la CEC et la matière organique du sol. Plus le taux de carbone et le pH du sol sont élevés, plus la CEC est élevée (Crétenet, 2005). Ben Hassane *et al.* (2008) ont aussi montré que la corrélation entre la matière organique et la CEC est hautement significative.

- **Structuration du sol et développement racinaire**

La matière organique (MO) du sol augmente la porosité du sol et favorise de ce fait l'enracinement (action physique). Un autre effet de la MO sur le développement racinaire est de nature biochimique, par une double action : d'une part de libération de facteurs de croissance, et d'autre part d'augmentation de l'absorption et de la perméabilité cellulaire. Cependant, lorsqu'elle est enfouie en grande quantité superficiellement, elle peut avoir une action inhibitrice plus ou moins prononcée selon sa nature sur le développement des plantes ou les exposer au stress hydrique en cas de sécheresse.

- **Résistance à la sécheresse des plantes**

La matière organique apportée au sol favorise la résistance à la sécheresse des plantes par :

- la stabilisation de la structure, la rétention d'eau (Chenu *et al.*, 2000 ; Ouattara *et al.*, 2006 ; Alletto *et al.*, 2010), l'amélioration des activités biologiques, la correction du pH du sol, etc. L'application de la matière organique aux sols peut également augmenter la rétention d'eau (Ouattara *et al.*, 2006, Ganry et Thuriès, 2010).

- l'absorption de substances nutritives. Selon Ganry et Thuriès (2010), lorsqu'une plante absorbe des substances phénoliques, son métabolisme est modifié surtout si ce phénol est oxydé en hydroquinone. Cette absorption induit la formation de sucres réducteurs dans la plante. En conséquence, la pression osmotique s'accroît, entraînant ainsi une grande résistance de la plante à la sécheresse. Celle-ci résiste également aux attaques des maladies et parasites. Davet (1996) a montré que le sorgho affecté par un stress hydrique est rapidement envahi par *Macrophomina phaseolina* (une espèce de champignon ascomycète phytopathogène qui provoque des symptômes de pourriture charbonneuse sur les racines ou les tiges chez de nombreuses espèces de plantes dont le sorgho et le maïs).

Malgré l'importance de la matière organique des sols démontrée à travers ces nombreux travaux de recherche, les pratiques agricoles observées dans les savanes tchadiennes contribuent peu à sa préservation. Les résidus des cultures sont généralement brûlés ou exportés hors des parcelles. Les restitutions des résidus des cultures sous forme d'amendements organiques se font très peu. Dans les zones à forte pression anthropique, la pratique de jachère n'est plus possible et donc, la pratique des cultures continues est courante. Toutes ces pratiques réduisent considérablement les teneurs en matière organique du sol (Piéri, 1989 ; Bationo et Mokuwanye, 1991 ; Bado *et al.*, 1997 ; Lavigne-Delville, 1996 ; Bado, 2002).

2.2.2. Principales causes de baisse des teneurs en matière organique et éléments minéraux des sols

2.2.2.1. Pratique de culture sur brûlis.

Plusieurs causes expliquent les brûlis. Ce sont surtout les brûlis des anciens champs pour faciliter le labour ou des champs mis en jachère et nouvellement défrichés. Les brûlis peuvent provenir aussi des feux accidentels ou volontaires des chasseurs. Cette pratique a des effets souvent dévastateurs autrefois mais, remis en cause ces dernières années par certains auteurs.

L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) accuse la culture sur brûlis de contribuer à la déforestation et au réchauffement climatique en favorisant le dégagement du CO₂ dans l'atmosphère. La FAO voudrait bien la voir disparaître au profit de cultures pérennes, censées être moins génératrices de gaz à effet de serre. Au contrario, une étude de l'Institut de Recherche pour le Développement a montré que la culture sur brûlis limite l'effet de serre (CIRAD, 2009). En effet, l'abandon de la culture sur brûlis à l'échelle mondiale ferait grimper de 60 à 140 pc les émissions de carbone dans l'atmosphère. Pour le CIRAD (2009), le feu a des vertus directes de stockage à long terme du carbone dans les sols

ou les paysages via la formation puis l'érosion du charbon qu'il génère. L'abandon d'un tel mode de culture entraînerait la libération de quelques 26 millions de tonnes de carbone dans l'atmosphère. La même étude, a aussi souligné l'importance de la technique de brûlage. A la République démocratique populaire du Laos où les agriculteurs n'arrachent pas les souches des arbres des parcelles brûlées, leurs racines limitent l'érosion et retiendraient les matières organiques, fertilisant ainsi les terres.

Les systèmes traditionnels à défrichement manuel et brûlis de la végétation maintiennent les stocks organiques du sol à 75 pc du niveau d'équilibre sous forêt avec un rapport «durée de culture/durée de jachère» d'environ 0.3 (Autfray, 2002). Pour Piéri (1989), la pratique de la culture sur brûlis entraîne la chute du taux de matière organique du sol dans la couche superficielle (baisse de 30 pc pendant les 12 premières années, de 66 pc en 46 ans). Il précise qu'outre une diminution du taux en éléments fins en surface, on constate la baisse de la plupart des indices de richesse chimique du sol. Après une douzaine d'années de cultures, les propriétés chimiques se stabilisent, mais l'appauvrissement en calcium, en MO et en azote se poursuit. L'évolution régressive des teneurs en éléments chimiques s'accompagne d'un compactage de la structure du sol, qui réduit l'infiltration et gêne l'enracinement. Sur le long terme, la dégradation des conditions des cultures est donc globale.

2.2.2.2. Pratique de culture continue

En Afrique de l'Ouest, la mise en culture des terres diminue systématiquement la matière organique du sol (Sedogo, 1981; Berger *et al.*, 1987; Bationo et Mokwunye, 1991; Bado *et al.* (1997) et des rendements (Bado, 2002). Aweto *et al.* (1992) ont aussi montré la diminution rapide des teneurs en carbone (C) en surface (0-10 cm), qui passent de 4.94 pc sous forêt, à 2.34 pc dans des systèmes vivriers avec jachère, à 1.47 pc dans des systèmes à culture continue. Pour Berger (1990), la baisse annuelle du stock de matière organique d'un sol après sa mise en culture est de l'ordre de 1,5 à 2,5 pc. Au cours des 1^{res} années de culture sur sol limoneux-sableux, la minéralisation est rapide, puis elle se ralentit, et les teneurs se situent entre 1,0 et 1,5 pc. On est alors en présence d'une vitesse de minéralisation de l'ordre de 2 à 4 pc par an selon la texture du sol. Les rendements passent de 1 t ha⁻¹ à 300 kg ha⁻¹ en absence de fumure organique, et de 2 t ha⁻¹ à 1,2 t ha⁻¹ avec fumure. Cette baisse de rendement potentiel est la mesure de la profonde détérioration physique de ces sols.

La baisse des teneurs en matière organique des sols cultivés à cause de la pratique des cultures continues a été aussi observée dans les savanes tchadiennes par Richard et Djoulet (1986) et Naitormbaide *et al.* (2010).

2.2.2.3. Exportations des résidus des récoltes

Les végétaux cultivés contiennent une certaine quantité d'éléments minéraux, qu'ils prélèvent du sol. L'agriculteur emporte la partie de la production qui l'intéresse, ce qui correspond à une perte pour le milieu. Les exportations des éléments minéraux par les récoltes sont les principales causes de la dégradation des sols cultivés. Les quantités et la nature d'éléments exportés par le sorgho et l'arachide sur les sols ferrugineux tropicaux au Tchad et celles du mil sur le même type de sol au Sénégal sont très variables (Tableau I).

Tableau I. Quantités d'éléments minéraux exportés (en kg/ t ha⁻¹ de sorgho, d'arachide de mil récoltés).

Eléments exportés	Sorgho*		Arachide*		Mil**	
	Avec tige	Sans tige	Avec fane	Sans fane	Avec tige	Sans tige
N	50	26	85	50	29,7	18
P ₂ O ₅	10	7	14	9	9,9	6,6
K ₂ O	74	12	53	11	56,1	5,6
S	28	7	16	6	2,4	1

Légende : *Megie (1974) au Tchad; **Traoré (1974) au Sénégal.

Dans un système de monoculture, les mêmes éléments minéraux sont exportés chaque année entraînant ainsi une dégradation chimique des sols.

Par les pratiques culturales moins adaptées, les sols sont exposés à des dégradations biophysiques et chimiques. Pour maintenir ou améliorer leur fertilité au sein d'un agrosystème donné, un éventail de pratiques est envisageable. Il s'agit, entre autres, de la pratique de l'agroforesterie et de la jachère, l'apport de fumure organique à partir des résidus de récolte, du fumier, du compost et de l'application des engrais minéraux.

2.2.3. Pratique d'amélioration de la fertilité des sols à partir du fumier

Le fumier utilisé dans les savanes tchadiennes provient des crottes des moutons, chèvres et des bouses des bovins à des doses variables souvent mal maîtrisées par les producteurs. Les valeurs moyennes en N, P₂O₅, K₂O obtenues dans ce fumier a été respectivement de 5,5 ; 4,5 ; 7,0 kg pour 1 t de fumier (Megie, 1974). Le fumier qui a été

utilisé dans le cadre de cette étude contenait 124 g kg⁻¹ de matière organique (MO), 712,6 mg kg⁻¹ de phosphore total (P) et 911,7 mg kg⁻¹ de potassium total (K).

Selon Dugué et Gigou (2006), un bovin de 250 kg (unité de bétail tropical : UBT) consomme chaque année 2,5 t de matière sèche de fourrage dont un peu moins de la moitié est rejeté sous formes de bouses, parmi lesquelles 200 à 300 kg arrivent dans le parc de nuit. La production de poudrette est de 500 à 600 kg par UBT et par an. Sa richesse en éléments minéraux est tributaire de la qualité des fourrages. Naitormbaide (2007) a montré que dans la zone des savanes tchadiennes, une exploitation a la capacité de produire en moyenne 7 t an⁻¹ de fumier à partir des résidus des récoltes. Cependant, il est très peu produit. Même s'il est produit à partir des parcs d'hivernage, il n'est pas de bonne qualité pour contribuer de manière efficiente à l'amélioration de la fertilité des sols cultivés.

L'application de fumier dans les champs peut contribuer efficacement à l'amélioration de la fertilité des sols, et en conséquence l'augmentation des rendements des cultures. Hien (2004) a montré que lorsque le fumier est apporté simultanément avec de l'azote à raison de 60 kg ha⁻¹ an⁻¹, il favorise un stockage préférentiel de C dans les fractions fines. C'est dans cette fraction où le carbone se dégrade le moins, donc constituant ainsi un stock important en cet élément indispensable pour l'amélioration de la qualité physique chimique et biologique des sols.

Avec une application des doses qui varient entre 1,5 et 10 t ha⁻¹ an⁻¹ pour le mil et 2,5 à 20 t ha⁻¹ an⁻¹ pour le sorgho, le rendement en grain du mil a augmenté jusqu'à 439 pc sur une parcelle fumée (Michels et Biolders, 2005) par rapport à celle qui n'a pas été fumée. Pour le sorgho, des augmentations de 1035 pc ont observées par Asako (2010) à Saria. Ces augmentations des rendements sont principalement liées à l'apport en éléments nutritifs et l'amélioration du sol en carbone (De Ridder et Van Keulen, 1990 ; Gandah *et al.*, 2003 ; Mando *et al.*, 2005), et en azote dans le sol (Agbenin et Goladi, 1997), et d'autres éléments tels que K, Mg et Ca (de Ridder et Van Keulen, 1990).

La capacité d'échange cationique et le pH du sol pourraient également être augmentés par l'épandage de fumier (Pichot *et al.*, 1981; De Ridder et Van Keulen, 1990).

2.2.4. Pratique d'amélioration de la fertilité des sols à partir des résidus des récoltes

Dans la plupart des exploitations agricoles des savanes du Tchad, hormis les fanes d'arachide et de niébé qui sont collectées pour l'alimentation animale, les résidus des récoltes sont pour la plupart abandonnées dans les parcelles. Ils sont consommés soit par les animaux,

soit brûlés par les feux de brousse ou détruits par les termites. Ces derniers jouent un grand rôle dans la décomposition du paillis constitué *in situ* dans les champs (Mando *et al.*, 1999). L'enfouissement du paillis déjà attaqué par les termites après un piétinement des bœufs lors de la vaine pâture, facilite sa décomposition.

L'application des résidus de récolte en surface comme « mulch » ou paillage peut contribuer à la réduction de l'érosion éolienne et hydriques des sols en maîtrisant le ruissellement de surface (Bationo et Mokwunye, 1991; Bationo et Buerkert, 2001), à améliorer l'état des nutriments du sol par piégeage de la poussière éolienne pendant la saison sèche (Geiger *et al.*, 1992; Buerkert *et al.*, 2000), à augmenter particulièrement l'efficacité de l'utilisation du phosphore en réduisant l'immobilisation de cet élément par l'aluminium et le fer dans les sols acides (Schlecht et Buerkert, 2004; Bationo *et al.*, 2007). L'incorporation des résidus de récolte est également propice à l'augmentation de la matière sèche globale de rendement du mil par l'amélioration de la croissance des racines (Rebafka *et al.*, 1994). Sissoko *et al.* (2007) ont également montré qu'en couvrant le sol à 86 pc avec de la paille, on limite l'évaporation de l'eau tout en favorisant son infiltration dans le sol en début de la saison des pluies. Le gain correspondant au stock d'eau dans le sol est de 13 mm (celle n'ayant pas été évaporée) dans une parcelle paillée. Dans une parcelle non paillée, la quantité d'eau ayant ruisselé est de 4 mm pour 34,5 mm de pluie.

L'apport de la matière organique à C/N élevé (>40) comme les pailles a tendance à accroître la minéralisation de l'humus. La paille sert de substrat nutritif aux micro-organismes du sol qui ont alors besoin d'azote dans les mêmes proportions pour se développer. L'azote contenu dans les pailles n'étant pas suffisant, les micro-organismes vont le puiser à d'autres sources (effet dépressif). C'est pourquoi, un apport de paille doit être accompagné d'un apport d'azote minéral pour ne pas induire un effet dépressif sur les cultures.

Les pailles de sorgho et de mil ont un C/N élevé et sont donc peu adaptées à fabriquer de l'humus dans le sol. Leur coefficient isohumique est inférieur à 0,1. Il paraît toujours préférable de les composter ou les transformer en fumier (Lavigne-Delville, 1996). Pour Piéri (1989), la paille de sorgho, avec C/N égal à 53 et moins riche en fibre (NDF, Taux de fibre/CC, Conteneur Cellulaire = 0,8), va induire, une fois incorporée au sol, une « sur minéralisation » de la matière organique du sol et de sa fraction organo-minérale. Cela conduit à un bilan de carbone total et celui de la fraction organo-minérale négatif. Par contre, la coque d'arachide non transformée, qui est peu biodégradable (NDF/CC = 28,1 et C/N = 52) améliore le bilan de carbone total du sol, sans que cela se répercute sur le bilan de la fraction organo-minérale. Selon Lavigne-Delville (1996), cette amélioration apparente du taux de la matière

organique du sol n'a en fait aucune conséquence sur l'enrichissement de sa fraction organo-minérale.

Des études menées par Sedogo (1981) et Feller *et al.* (1983) ont permis de conclure que l'incorporation au sol de résidus organiques de C/N variés tend à augmenter le taux de carbone du sol en enrichissant la fraction grossière du carbone du sol alors que la fraction organo-minérale tend à diminuer. L'apport complémentaire d'engrais azoté limite cet accroissement global du taux de carbone uniquement lorsque les résidus incorporés ont un C/N de 53. Par contre avec un fumier ou un compost à C/N de 15, la fumure azotée complémentaire favorise l'élévation du taux de matière organique du sol. Le carbone s'accumule alors dans la fraction grossière sans que l'on ait de « fonte » de la fraction organo-minérale. La fumure minérale azotée associée à l'apport des résidus organiques à C/N de 15 préserverait la fraction de la matière organique originelle des sols qui influence de plus leur stabilité structurale.

Malgré l'importance des résidus de récolte, leur disponibilité est réduite, car ils sont brûlés par les feux de brousse accidentels ou lors des défriches (Bationo et Mokuwunye, 1991), et utilisés pour les matériaux de construction pour les clôtures ou de toit, les combustibles, etc. (Enyong *et al.*, 1999; Bationo et Buerkert, 2001; Quansah *et al.*, 2001; Aune et Bationo, 2008). Ils peuvent être transformés sous forme de fumier ou compost et restitués dans les champs pour améliorer la fertilité des sols mais compte tenu de l'éloignement des champs et les résidences des exploitants et surtout du manque des moyens de transport, ils sont souvent laissés sur place dans les champs. Ils sont ainsi exposés aux feux de brousse et au pâturage des animaux transhumants entraînant un transfert horizontal de la fertilité des sols.

2.2.5. Pratique d'amélioration de la fertilité des sols à partir du compost

Le compost a un effet favorable sur la fertilité des sols, provoquant ainsi une augmentation de la productivité agricole, une meilleure biodiversité du sol, une réduction des risques écologiques et un environnement plus favorable. Cependant, il est coûteux en transport et en manipulations. Pour lever cette contrainte au sud Mali, les producteurs fabriquent leur compost aux bords des champs sous pluies (Blanchard, 2010).

Dans le cadre de cette étude, les résidus des cultures ont été exportés, puis compostés et restitués dans les mêmes parcelles où ils ont été prélevés. Guibert (1993) a obtenu dans la zone des teneurs de N, P₂O₅ et K₂O respectivement de 8 ; 5 et 12 kg pour 1 t de compost. Le

compostage constitue donc une bonne alternative quant à la valorisation des résidus de récolte et la restitution aux sols cultivés des éléments minéraux exportés par les cultures.

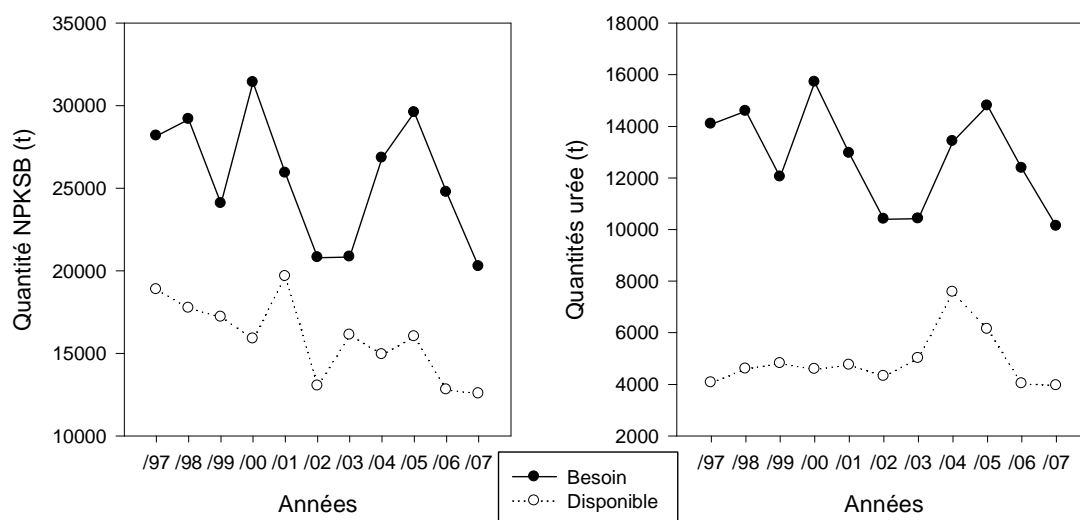
2.2.6. Pratique d'amélioration de la fertilité des sols à partir des engrais minéraux

Si la fumure organique est généralement une nécessité absolue pour la reconstruction de la fertilité des sols tropicaux après la mise en culture, l'application d'engrais minéraux selon les formules judicieusement choisies constitue un des moyens de choix pour obtenir des accroissements substantiels des rendements des cultures. De plus, la fumure minérale, en accroissant les rendements, augmente également la masse des résidus de récolte et permet ainsi de maintenir le taux d'humus du sol.

En Afrique au sud du Sahara, l'indisponibilité des engrais et leurs coûts relativement élevés, contraignent les producteurs à exploiter leurs terres au delà de leur capacité de régénération, lessivant les substances nutritives. Dans cette zone, la dose moyenne des engrais utilisés pendant la campagne agricole 2005/2006 n'a été que de 25,4 kg ha⁻¹, alors que dans les pays asiatiques et de l'Amérique Latine, les doses respectives utilisées ont été de 202,3 et 100,7 kg ha⁻¹ (IFDC, 2008).

A Saria (Burkina Faso), Sedogo (1993) a montré que 56 p.c. des exploitants n'utilisent pas les engrais minéraux (NPKS : 14-23-14-6 et de l'urée) car ils ne sont généralement pas disponibles. Quand ils le sont, leurs coûts élevés ne permettent pas aux producteurs de les acquérir. Les doses recommandées sont de 100 kg de complexe NPKS et 50 kg d'urée pour le sorgho. Cependant, les études ont montré que ces doses ne sont jamais appliquées (5-20 kg/ha) et même, il y a une tendance à la baisse tant au niveau des doses que du nombre d'exploitants qui utilisent ces engrais. Cette situation est surtout due à la suppression de la subvention sur les engrais intervenue en 1987.

Au Tchad, compte tenu des difficultés que connaît la filière cotonnière ces dernières années, la CotonTchad qui a pratiquement le monopole de l'importation des engrais minéraux appliqués aux cotonniers ne satisfait guère les besoins des cotonculteurs (Figure 12).



Source : Anonyme (2010) et Nuttens (2001)

Figure 12. Evolution des besoins et disponibilité de NPKSB et de l'urée pour la production cotonnière de 1997 à 2007 au Tchad.

Qu'il s'agisse du NPKSB ou de l'urée, les offres des années 2000 et 2005 ont été relativement faibles. Cela peut s'expliquer par les difficultés qu'a connues cette filière pendant ces dernières années et à l'enclavement du pays. En effet, entre la commande des achats et la mise en place des engrais, il se passe une période minimum de huit mois. Les besoins en NPKSB des cotonculteurs varient annuellement entre 19 000 et 33 200 t (Nuttens, 2001 ; Anonyme, 2010). Ils ne sont satisfaits qu'à hauteur de 58 à 74 pc. Ceux de l'urée suivent également la même tendance. En conséquence, seuls 26 à 42 pc des superficies ne bénéficient d'aucun apport minéral, donc cultivées en traditionnel. Cela contribue à la dégradation chimique des sols car la fibre et les tiges de coton exportent du sol sans qu'une compensation conséquente ne soit faite sous forme d'engrais minéral et/ou organique

Dans le cadre de cette étude, les engrais minéraux utilisés sont le complexe NPKSB (19.12.19.5.1,2) ; l'urée $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ à 46 pc de N et le DAP [Di-Ammonium Phosphate : $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$] à 46 pc de P_2O_5 et 18 pc de N.

Les engrais minéraux sont généralement utilisés sans être associés à la fumure organique (fumier et compost). Or, l'usage d'engrais azoté sans apport organique entraîne l'acidification des sols (Sedogo, 1993). Cette acidité entraîne par lixiviation des pertes importantes des bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) et par conséquent, une diminution globale de la capacité d'échange cationique (CEC). Elle entraîne en outre la baisse du taux de saturation, le pH et une augmentation de concentration des ions aluminium (Al^{3+}) qui sont toxiques s'ils dépassent 30 pc (Lavigne-Delville, 1996). On définit pour cela un taux de

saturation en aluminium échangeable (TSA) qui représente le pc de sites de la CEC occupés par l'ion aluminium :

$$\text{TSA (pc)} = \frac{\text{Al}^{3+} \text{échangeables}}{\text{Somme des bases échangeables (Al}^{3+} + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+} + \text{Na}^{+})} \times 100.$$

Au-delà d'un TSA de 30 pc, le sol est peu propice à la majorité des cultures pluviales à l'exception du mil (*Pennisetum typhoides*), de certaines variétés de niébé (*Vigna sinensis*) et de riz pluvial (Lavigne-Delville, 1996).

Les études de Piéri (1989) et Sedogo (1993) ont montré également que l'emploi d'engrais azoté favorise la minéralisation des matières organiques et fait chuter rapidement la teneur du sol en matière organique si aucun apport organique n'est fait. Lorsque cette teneur est inférieure à 0,6 pc, l'activité biologique du sol est réduite. En conséquence, la parcelle est exposée au ruissellement et à l'érosion et à la lixiviation des éléments minéraux.

2.3. Effets des pratiques de gestion de la fertilité des sols sur les rendements des cultures

Les rendements des principales cultures vivrières ou du coton grain produit obtenus au Tchad ont été relativement faibles ces 15 dernières années (1996-2010) (Figure 13). Les rendements du mil, de sorgho, du maïs et du riz n'ont été respectivement que de 631 ; 705 ; 768 ; 1125 kg ha⁻¹. Ceux du niébé, de l'arachide et du coton n'ont été que de 537 ; 970 et 591 kg ha⁻¹ respectivement. Les faibles rendements obtenus sur les céréales peuvent s'expliquer par le manque ou les faibles quantités des engrais minéraux appliquées aux cultures.

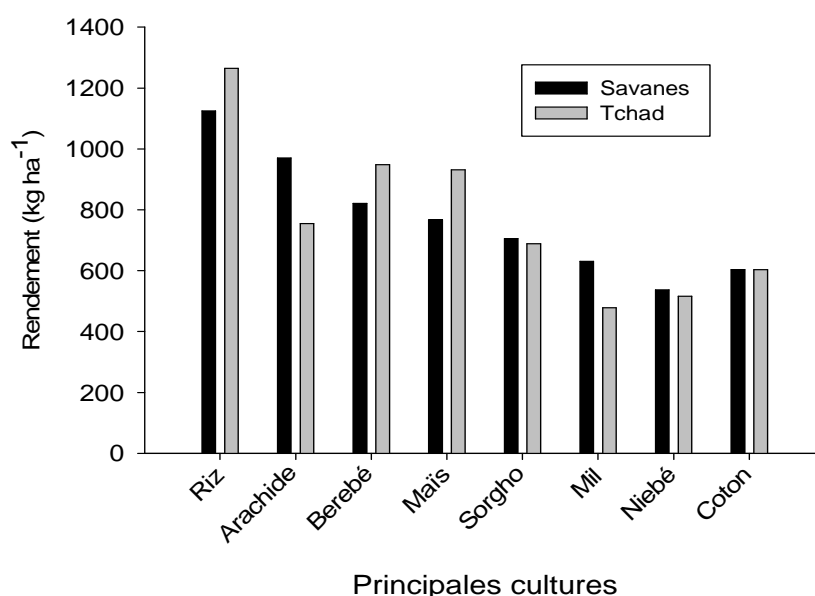


Figure 13. Rendements moyens des principales cultures au Tchad de 1996 à 2010.

Le riz, le sorgho et le maïs ne reçoivent qu'en moyenne qu'entre 35 et 75 kg ha⁻¹ de NPKSB et 25 et 42 kg ha⁻¹ d'urée (Naitormbaide *et al.*, 2010). Les doses de fumier appliquées sur le riz, le maïs et le sorgho cultivés à Nguetté1 ne sont respectivement que de 100 ; 140 ; et 400 kg ha⁻¹ (Naitormbaide, 2007).

En milieu contrôlé, les rendements du coton varient entre 1500 et 2000 kg ha⁻¹, alors que le rendement moyen obtenu par les producteurs ces 15 dernières années n'est que 591 kg ha⁻¹. Ce faible rendement est lié au non respect, par les producteurs, des itinéraires techniques (date de semis, mauvais traitements phytosanitaires, etc.) diffusés par le service de la vulgarisation. Le rendement du coton grain ainsi obtenu est le plus faible de la région. En effet en 2000, il a été obtenu dans la savane camerounaise 1000 kg ha⁻¹ (Olina *et al.*, 2008) alors que dans la savane tchadienne, c'est seulement en moyenne 602 kg ha⁻¹ (Anonyme, 2010) de coton grain qui ont été obtenus.

Conclusion partielle

Cette revue bibliographique a relevé l'importance des fumures organiques et minérales dans les activités agricoles et leurs effets sur l'environnement. Ces acquis de la recherche montrent que l'Homme par ses pratiques culturales peut influencer l'état des fertilités physiques, chimiques et biologiques des sols. Aux pratiques culturales de l'Homme s'ajoutent les conditions climatiques qui sont d'ordre naturel et donc difficilement maîtrisable dans un contexte d'une agriculture extensive.

En ce qui concerne les pratiques culturales, il paraît indispensable de chercher à comprendre leurs effets sur la productivité des sols et les cultures. Cela permettra de rechercher les alternatives de solutions afin de rendre les sols plus productifs dans le temps.

DEUXIEME PARTIE

MATERIEL ET METHODES D'ETUDES

CHAPITRE III. MATERIEL ET METHODES D'ETUDE

La conduite de nos travaux a nécessité l'utilisation de divers matériels (matériel végétal, sol, engrais, produits chimiques, matériel de mesure) et d'une méthodologie d'études appropriée (enquête, expérimentation, analyse des sols). Des logiciels spécifiques ont aussi permis de traiter les données collectées.

3.1. Matériels

3.1.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé en station de recherche composé de *Arachis hypogaea*, *Sorghum bicolor* et *Pennisetum glaucum*, est bien identifié alors que celui retrouvé dans les parcelles des exploitations paysannes, (*Arachis hypogaea*, *Sorghum bicolor*, *Pennisetum glaucum*, *Gossypium hirsutum*, *Zea mays*) ne l'est pas à cause des noms des variétés attribués par les paysans qui changent en fonction des sites. Toutefois, leurs cycles ont été les mêmes dans tous les sites.

3.1.1.1. Arachide

En Station de recherche, la variété améliorée de l'arachide *Arachis hypogaea* L. var. 57-313 à port rampant et d'un cycle de 125 j, a été utilisée. Son potentiel de rendement est de 2 t ha⁻¹.

3.1.1.2. Mil

La variété améliorée de mil *Pennisetum glaucum* var. S35 de taille moyenne de 2,5 m et d'un cycle de 90 j a été utilisée. Son potentiel de rendement est de 1,5 t ha⁻¹.

3.1.1.3. Sorgho

Avec un potentiel de rendement de 1,5 t ha⁻¹, la variété améliorée de sorgho *Sorghum bicolor* (L.) Moench var. K3R de taille moyenne de 1,75 m et d'un cycle de 110 j a été utilisée.

3.1.2. Engrais minéraux

Le complexe minéral NPKSB (19.12.19.5.1,2) et l'urée (46 pc azote) généralement appliqués à la culture cotonnière ont été les engrais minéraux utilisés. Nous avons également utilisé le DAP [Di-Ammonium Phosphate (NH₄)₂HPO₄] contenant 47 pc de phosphore et 18 pc d'azote à cause des caractéristiques chimiques des sols des savanes tchadiennes qui ont montré une pauvreté accentuée en phosphore et azote et sans difficulté majeure pour le Potassium.

3.1.3. Amendement organique

Le fumier collecté dans un parc de bœufs de trait chez un agropasteur de Bébédjia a été utilisé dans les essais et tests mais aussi comme substrat pour la fabrication du compost. Les caractéristiques de ces fumures sont présentées dans le Tableau (II).

Tableau II. Caractéristiques chimiques du fumier utilisé

Paramètres	Fumier	Compost
pH	7,4	7,6
Matière organique (g kg ⁻¹)	124	202
Azote total (g kg ⁻¹)	2,9	8,7
Phosphore total (mg P kg ⁻¹)	713	3833
Phosphore assimilable (mg P kg ⁻¹)	134	493
Potassium total (mg K kg ⁻¹)	912	11594
Potassium disponible (mg K kg ⁻¹)	153	2475

3.1.4. Autres matériels scientifiques et techniques

Ils se composent de divers matériels dont :

- le Global Positioning System (GPS) , de marque GARMIN 72 a servi à la détermination des coordonnées géographiques des sites d'études ;
- le tableur Excel utilisé pour la saisie des données numériques et du logiciel Word pour le traitement des textes ;
- les logiciels XLSTAT2007 et SPSS.16.1 utilisés pour les analyses des données.
- le logiciel MapInfo utilisé pour l'élaboration des cartes des sites d'étude.
- la carte topographique, feuille de Moundou à l'échelle de 1/50.000^e de 1951 et l'image satellitale Landsat (2010) de résolution de 30m.
- les fonds de carte en vecteur élaborés par le Centre National d'Appui à la recherche (CNAR).

3.2. Méthodes

3.2.1. Méthodologie d'élaboration des cartes d'occupation des sols

Avant la mission terrain, le tirage papier au format A3 des images centrées sur les terroirs d'étude et les interprétations préliminaires ont permis d'identifier et de localiser les principales unités à relever. Ce sont notamment les unités de végétation, la topographie, les

habitations et l'état des surfaces des sols. Les différentes unités géographiques identifiées ont été localisées.

Au terrain avec l'aide des producteurs, les différentes unités ont été délimitées à l'aide du GPS configuré (WGS 84 pour le Tchad et unité en degrés décimaux). Les données sont ensuite transférées dans l'ordinateur à travers Mapsource, puis importées sous Excel et traitées sous MapInfo 8.5 pour l'élaboration des cartes d'occupation du sol de chaque terroir. Préalablement, l'image satellitale et la carte topographique ont été calées (UTM zone 33 hémisphère nord), puis leurs couches et les données collectées avec le GPS ont été superposées. La nouvelle couche ainsi créée avec des codes ont permis de digitaliser les différents types d'occupation du sol des terroirs de Nguetté1 et Ndaba de superficies importantes. Pour l'élaboration de la carte d'occupation de sols de Tala1 de petite superficie, ses limites et unités identifiées ont été systématiquement délimitées.

3.2.2. Enquête exploitation et expérimentation en milieu paysan

Une fiche d'enquête élaborée à cet effet a permis de collecter les données à deux niveaux d'échelles (Annexe 6).

3.2.2.1. Enquête à l'échelle exploitation

L'analyse a porté sur des exploitations agricoles de Nguetté1, Tala1 et Ndaba. L'échantillonnage des exploitations a été fait sur la base des listes obtenues à travers des recensements systématiques des ménages. Sur chaque liste et à partir d'un numéro d'ordre choisi aléatoirement, on a retenu le 5^e ménage. Le nombre des exploitations de chaque site étant connu, un quota de 40 exploitants par site a été fixé. Au total, 120 chefs d'exploitation ont été concernés par l'enquête. Les données ont été collectées à l'aide d'un questionnaire comprenant des questions fermées sur les équipements agricoles, les superficies des principales cultures et leurs rendements, les pratiques de gestion de la fertilité des sols.

3.2.2.2. Expérimentation en milieu paysan

Le test a été conduit à Tala1, Ndaba et Nguetté1. Il a pour objectif d'impliquer d'avantage les paysans à la mise point des technologies. Le dispositif est un bloc dispersé où dans chaque site, 4 paysans ont été impliqués à l'étude, soit au total 12 personnes (Figure 14 b). Un dispositif en bloc randomisé comprenant les mêmes traitements a été aussi installé à la Station de Bébédjia (Figure 14 a) de comparer les performances des mêmes technologies testées en milieu paysan.

Les traitements étudiés ont été les suivants :

1. Fom : 5 t ha^{-1} de fumier/2 ans + 50 kg ha^{-1} NPKSB + 50 kg ha^{-1} d'urée.
2. DAP (Di-ammonium phosphate) : 13 kg ha^{-1} DAP + 66 kg ha^{-1} d'urée.
3. T : témoin

Les traitements Fom et T sont ceux issus du dispositif en Station après une année de recherche. Les sols des savanes étant pauvres en phosphore, le DAP a été ajouté à ces derniers pour évaluer ses effets sur les sols et les cultures dans les sites d'étude.

Les arrières effets de ces apports organiques et minéraux sur le mil seulement 2009 ont été évalués sur l'arachide semée dans la même parcelle en 2010. Pour ce faire, les limites des parcelles ont été marquées à l'aide des bornes.

Dimensions et superficies du dispositif du test

Superficie de la parcelle élémentaire pour chaque traitement étudié = $15 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ (15 lignes de semis) = 180 m^2 . Un pourtour de 3m de large est mis autour du dispositif du test pour le séparer des parcelles paysannes.

Superficie par parcelle utile dans chaque parcelle élémentaire : $11 \text{ m} \times 6 \text{ m} = 66 \text{ m}^2$.

Sur les 12 m de largeur de la parcelle élémentaire, on décale de 3 m de chaque côté vers l'intérieur pour éviter les effets des bordures. La largeur de la parcelle utile est de : $12 \text{ m} - (3 \times 2) = 6 \text{ m}$. Pour la même raison, on décale sur la longueur de la parcelle élémentaire de 2 m de chaque côté vers l'intérieur. La longueur de la parcelle utiles est de $15 \text{ m} - (2 \times 2 \text{ m}) = 11 \text{ m}$.

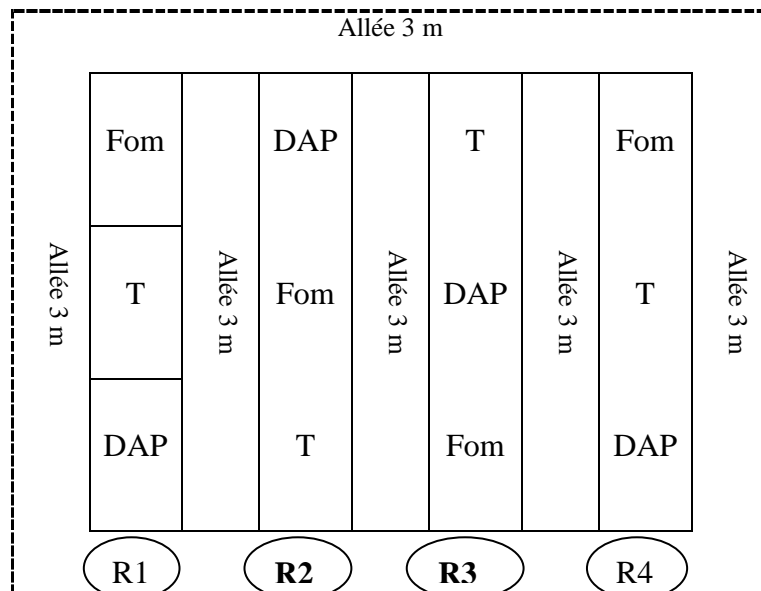


Figure 14a. A la Station de Bébédjia

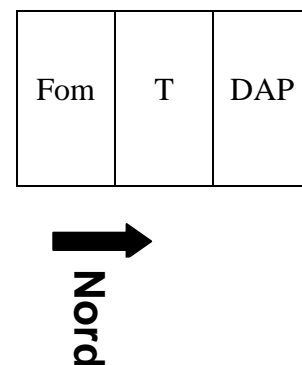


Figure 14b. Chez chaque producteur

Figure 14. Dispositif du test à la Station de Bébédjia et en milieu paysan

3.2.3. Expérimentation sur la station de recherches agronomiques

Le protocole des essais de 2008 installé à la Station de Bébédjia avait pour objectif de contribuer à une meilleure gestion des sols en vue d'une production durable dans les savanes tchadienne.

Le dispositif est un split plot factoriel avec 5 répétitions. Cinq traitements (types de pratiques de gestion de la fertilité des sols) ont été comparés comme premier facteur dans les parcelles principales. Le second facteur a concerné les modes de gestion des résidus des cultures.

Facteur principal: modes de fertilisation des cultures

1. T : témoin (aucun apport)
2. Fo : 5 t ha⁻¹ tous les 2 ans de fumier de parc
3. Fm_{NPKSB+urée} : 50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée
4. Fm_{NPKSB} : 50 kg ha⁻¹ NPKSB
5. Fom_{NPKSB+urée+Fo} : Fo + Fm.

Facteur secondaire : gestion des résidus de récolte

1. Résidus laissés sur place : a
2. Résidus brûlés : b
3. Résidus compostés et ramenés à la parcelle : c
4. Résidus exportés : e

Le système de culture adopté sur trois années est la succession culturale Mil (2008/2009)/sorgho+arachide (2009/2010)/mil (2010/2011).

Le dispositif de la campagne agricole 2008/2009 et 2010/2011 est le suivant :

Superficie parcelle principale : 17,60 m x 14,4 m = 253,44 m² ;

Superficie parcelle secondaire : 6,4 m x 8 m = 51,2 m² ;

Superficie totale de l'essai : 106 m x 123 m = 13038 m².

Le système de culture de la campagne agricole 2009/2010 est une association arachide + sorgho. Cette étude visait à étudier les effets des pratiques de gestion des résidus des cultures et de l'application de fumier sur les parcelles de mil cultivées pendant la campagne agricole 2008/2009 dans le même dispositif expérimental (Figure 15).

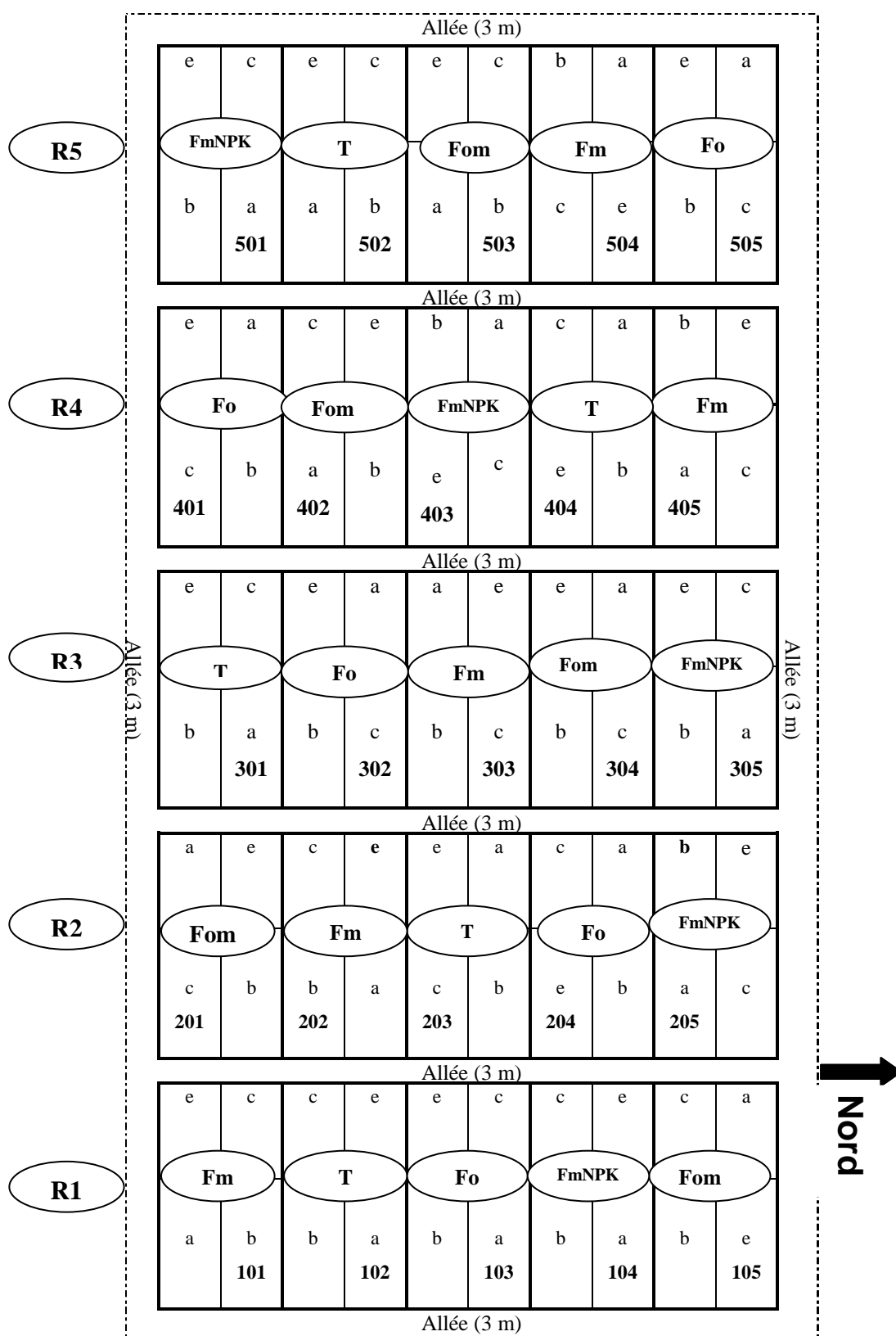


Figure 15. Plan de masse de l'essai à la Station de Bébédjia

3.2.4. Conduite des cultures

Sur la station, le labour a été effectué au tracteur à une profondeur d'environ 30 cm alors qu'en milieu paysan le labour a été fait à l'aide de la traction bovine à une profondeur d'environ 25 cm. Après le labour, le fumier et le compost ont été épandus, puis enfouis manuellement à la houe.

A la 1^{re} (2008) et la 3^e année (2010) d'études, les écartements adoptés pour le mil ont été de : 0,8 m x 0,8 m.

Le démariage a été effectué à 2 plants par poquet après le 1^{er} sarclage qui s'est déroulé 15 jours après levée.

Les engrais minéraux (NPKSB, DAP) sont enfouis à 10 cm du plant après le 1^{er} sarclage et le démariage. L'apport de l'urée (46 pc) a été fractionné. La moitié de la dose a été appliquée en même temps que le NPKSB ou le DAP alors que l'autre moitié a été appliquée 45 jours après la levée. Les autres entretiens culturaux sont ceux conseillés par le service de vulgarisation.

A la 2^e année d'étude (2009), ce sont l'arachide et le sorgho qui ont été cultivés en association et en rotation avec le mil de l'année 2008 sur les mêmes parcelles.

Les écartements du sorgho ont été de 0,3 m x 1,2 m. Le sorgho a été semé en lignes alternées avec 2 lignes d'arachide. L'arachide étant particulièrement sensible à la compétition de début de cycle, le sorgho a été semé 10 jours après l'arachide. Les apports minéraux et autres entretiens culturaux sont les mêmes que ceux appliqués au mil. Cependant, les apports minéraux ont été effectués uniquement sur les lignes de sorgho.

L'arachide a été semée à une graine par poquet aux écartements de 0,3 m x 0,40 m. En dehors des arrières effets des apports organiques et minéraux des précédents culturaux, cette culture n'a reçu aucun apport. Le 1^{er} sarclage a été effectué 15 jours après la levée. Les autres entretiens culturaux sont ceux conseillés par le service de vulgarisation.

3.2.5. Méthodologie d'évaluation et d'échantillonnage des végétaux

Les paramètres permettant d'évaluer les effets des apports des fumures et modes de gestion des résidus des cultures sur la productivité des cultures ont été collectés de 2008 à 2010.

Le nombre de poquets levés, le nombre des plants à la levée et à la récolte, ainsi que la taille (mil, sorgho) des plants ont été collectés pour évaluer l'effet des apports sur le sol et le développement végétatif des cultures dans les différents traitements étudiés.

Le nombre et le poids des épis (mil, sorgho) récoltés mesurés ont permis d'évaluer la production totale en biomasse et l'indice de récolte (rapport de la partie utile (graines) sur l'ensemble du poids de la paille et des graines) de la culture dans chaque traitement. La quantification de la biomasse totale de la plante a permis d'élaborer un bilan partiel des exportations des éléments minéraux par les cultures.

Les gousses d'arachide ont été récoltées à la main ainsi que les épis du mil, de maïs et de sorgho. Les épis sont ensuite soumis au battage manuel. Le coton est également récolté par traitement manuellement. Pour ces cinq cultures, les productions parcellaires ont servi à l'évaluation des rendements par cycle de culture.

3.2.6. Méthodologie d'échantillonnage des sols

Les échantillons de sol ont été prélevés sur les parcelles cultivées de toutes les cultures en station et en milieu paysan. Dans chaque parcelle utile des sondages ont été faits, à l'aide d'une tarière six sondages sur 0-20 cm pour constituer un échantillon composite.

En milieu paysan, on a effectué 5 sondages dans chaque traitement à l'aide de la tarière pour obtenir un échantillon composite. Dans les parcelles de suivi agronomique, les échantillons des sols ont été prélevés avant le labour en 2006 et après les récoltes de l'année 2007. Sur les parcelles des tests, les échantillons de sols ont été prélevés en 2009 avant le labour en 2010 après les récoltes.

Sur la station de recherche agronomique, l'échantillonnage des sols a porté sur tous les traitements secondaires. Pour chaque traitement secondaire, on a effectué à l'aide de la tarière 4 sondages sur l'horizon 0-20 cm pour constituer un échantillon composite. Les prélèvements ont été effectués en 2008 avant le labour et en 2010 après les récoltes.

Les échantillons ainsi prélevés sont séchés à l'air, puis tamisés à 2 mm, puis conditionnés dans les sachets pour les laboratoires d'analyse que sont le Bureau National d'Analyses des Sols (BUNASOL) et le Laboratoire d'Analyses des Sols-Eaux et Plants (LABOSEP) au Burkina Faso. Les paramètres analysés sont le carbone, l'azote, le phosphore (total et assimilable), le potassium (total et disponible), les bases échangeables, la CEC et le pH eau, le dégagement du CO₂ des sols (respiration des sols), le fractionnement granulométrique, la biomasse microbienne.

3.3. Méthodes d'analyse des sols au laboratoire

Les analyses ont porté sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques des échantillons des sols prélevés à la Station de Bébédjia et dans les parcelles paysannes de

Nguetté¹, Tala¹ et Ndaba. Toutes les analyses ont été effectuées sur des échantillons des sols prélevés dans l'horizon 0-20 cm.

3.3.1. Analyses physico-chimiques des sols

3.3.1.1. Granulométrie

La méthode de prélèvement à la pipette Robinson-Köln a été utilisée. Elle s'est effectuée sur la terre fine (tamisat de 2 mm) après destruction de la matière organique à l'eau oxygénée (H₂O₂) et une dispersion des argiles à l'aide de l'hexamétaphosphate de sodium (NaPO₃)₆ (Van Reeuwijk, 1993).

3.3.1.2. Fractionnement granulométrique

La méthodologie employée s'inspire de celle élaborée par Feller (1979), largement appliquée dans l'étude de la matière organique des sols tropicaux (Sedogo, 1993 ; Bacyé, 1993 ; Nacro, 1997 et Pallo *et al.*, 2000).

A 50 g de sol séché à l'air tamisé à 2 mm sont ajoutés 200 ml d'eau distillée mis à agiter sur un agitateur va-et-vient en présence de 5 billes de verre pendant 1 h 30 mn. La suspension ainsi obtenue est ensuite tamisée à l'aide d'un tamiseur à jet d'eau ayant deux tamis à mailles carrées de 200 et 50 µm (tamis de 200 µm au dessus de celui de 50 µm). En présence de l'eau distillée, le tamisage permet d'obtenir trois fractions :

La 1^{re} fraction rassemble les particules ayant une taille comprise entre 200 µm et 2000 µm. Celles de la 2^e fraction sont comprises entre 50 µm et 200 µm. La 3^e fraction regroupe les éléments inférieurs à 50 µm. Leurs tailles correspondent, respectivement, à celles des sables grossiers, des sables fins et des argiles plus les limons fins et grossiers. Les fractions relatives aux sables grossiers et aux sables fins sont, respectivement, désignées par F (200-2000) et par F (50-200). La fraction argilo-limoneuse ou organo-minérale est symbolisée par F (0-50). Les fractions obtenues sont soumises à une évaporation lente à l'étuve à la température de 60°C. Elles sont ensuite récupérées par grattage et pesées.

Les coefficients d'enrichissement en carbone (E_C) de chaque fraction ont été calculés selon la formule de Christensen (2001) utilisée par Pallo *et al.* (2009).

$$E_c = \frac{\text{mg C. g}^{-1} \text{ fraction}}{\text{mg C. g}^{-1} \text{ sol non fractionné.}}$$

Ils visent à éliminer les effets des différences liées au taux de la matière organique du sol brut non fractionné et à permettre la comparaison des concentrations de la matière organique dans les trois fractions (Pallo *et al.*, 2009).

3.3.1.3. Carbone organique

La teneur en carbone a été dosée selon la méthode de Walkley et Black (1934) et adaptée pour les sols du Burkina par Gnankambary *et al.* (1999). Le carbone organique est minéralisé en milieu sulfurique (H_2SO_4) par oxydation au bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) dont l'excès est titré par l'ammonium fer II sulfate ou sel de Mohr. Les résultats exprimés en g kg^{-1} de sol tiennent compte d'un facteur de correction de 4/5 lié à la minéralisation incomplète (75 pc) du carbone organique. Les teneurs en carbone organique total des fractions ont également été dosées, et exprimées en g kg^{-1} de fraction et en g kg^{-1} de sol.

3.3.1.4. pH du sol

La mesure du pH eau et pH_{KCl} a été faite par la lecture directe au pH-mètre muni d'électrodes en verre selon le rapport sol/eau distillée de 1/2,5. Pour mesurer le pH_{KCl} des sols, la même solution est reprise et on y ajoute 1,88 g de KCl pour laisser agiter pendant 1 heure avant la lecture au pH-mètre.

3.3.1.5. Azote (N) total

L'azote total est déterminé par la méthode de Kjeldhal (Bremner 1965) par attaque de H_2SO_4 concentré en présence de catalyseur au sélénium et de H_2O_2 . Ce qui convertit l'azote organique en sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. L'ion (NH_4^+) ainsi formé est dosé par le colorimètre automatique dont le principe est fondé sur la réaction modifiée de Berthelot : l'ammonium est chloré en chlorure d'ammonium qui réagit avec le salicylate pour former le 5-amminosalicilate. Après oxydation par couplage, il se forme un complexe vert dont l'absorbance est mesurée à 660 nm. L'azote total est dosé à l'aide d'un colorimètre automatique (Skalar SANplus Segmented flow analyser, Model 4000-02, Berda, Holland).

Les teneurs en azote total des fractions ont également été dosées, et exprimées en g kg^{-1} de fraction et en g kg^{-1} de sol.

3.3.1.6. Dosage du phosphore (P) total et assimilable

Il est déterminé par la méthode Bray I (Bray and Kurtz, 1945) qui utilise le fluorure d'ammonium (NH_4F) 0,03 N et l'acide chlorhydrique 0,1 M comme solution d'extraction dans un rapport 1/5. Le dosage est fait selon le principe suivant : le molybdate d'ammonium et le potassium antimoine tartrate réagissent en milieu acide ascorbique en formant un complexe intensément coloré en bleu dont l'absorbance a été mesurée à 880 nm à l'aide d'un colorimètre automatique (Skalar SANplus Segmented flow analyser, Model 4000-02, Berda, Holland).

3.3.1.7. Dosage du potassium (K)

Le dosage du K s'est fait également sur le minéralisât. Le potassium a été dosé par un spectromètre à émission de flamme.

3.3.1.8. Bases échangeables

Les cations échangeables sont déplacés du complexe absorbant par une solution d'argent (AgNO_3) et de thiouré (H_2NCSNH_2). On procède par dosage spectrométrique des cations Ca^{2+} et Mg^{2+} en absorption atomique, puis de K^+ en émission de flamme.

3.3.1.9. Capacité d'Echange Cationique (CEC)

Elle se mesure à partir de la solution d'extraction des bases échangeables. La CEC, exprimée en $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ est la somme des bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) ainsi que l'hydrogène et l'aluminium échangeables.

3.3.1.10. Analyses biologiques des sols

Les analyses biologiques ont été réalisées au laboratoire Sols-Eaux-Plantes de Kamboinsé.

- **Test de respirométrie**

Dans le sol, les sources énergétiques sont soumises à la biodégradation dont le terme ultime est la production de CO_2 , c'est-à-dire, la minéralisation de la matière organique. Ce dégagement de CO_2 quantifié fournit des indications précieuses sur l'activité globale des sols étudiés. La technique de mesure est celle développée par Dommergues (1968), largement utilisée par Asmi (2006) et Pallo *et al.* (2008). Elle consiste à introduire 100 g de sol tamisé à 2 mm et humidifié aux 2/3 de sa capacité de rétention dans un bocal en verre d'un litre. On y place également un bécher contenant 20 ml de soude (NaOH) 0,1 N et un récipient contenant de l'eau distillée sont placés le bocal. Le bocal est hermétiquement fermé et mis à incuber à 29°C. Le CO_2 dégagé est piégé par la soude et dosé par titration, avec du HCl 0,1N en présence de la phénolphthaléine, après précipitation préalable du carbone de sodium par 2 ml de chlorure de Baryum (BaCl_2) à 3 pc. L'expérience d'incubation a duré 21 jours. Le dégagement de CO_2 a été mesuré quotidiennement la 1^{re} semaine, puis tous les deux jours, à partir de la 2^e et 3^e semaine d'incubation. La quantité (Q) de CO_2 dégagée, et partant, du carbone minéralisé est donnée par la formule suivante (Dommergues, 1968) :

$$Q (\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ sol}) = (V1 - V2) \times 2,2$$

V1= volume moyen de HCl 0,1N utilisé pour le témoin.

V2 = volume moyen HCl 0,1N utilisé pour les traitements.

- **Détermination du carbone de la biomasse microbienne (CBM) des sols.**

La méthodologie s'est inspirée de la technique mise au point par Jenkinson et Powlson (1976) et modifiée par Chaussod et Nicolardot (1982).

Les mesures de dégagement de CO₂ ont été effectuées journalièrement, pendant une semaine, puis tous les deux jours, jusqu'au 21^e jour, sur des échantillons de sol fumigés (F) et non fumigés (nF). La fumigation a consisté, après homogénéisation de l'échantillon de sol, à déposer 100 g dans un dessiccateur contenant du chloroforme débarrassé de l'éthanol après plusieurs lavages à l'eau. A l'aide d'une pompe à vide, on crée un vide dans le dessiccateur en vue de saturer l'atmosphère par les vapeurs de chloroforme. A l'issue d'environ 24 heures de fumigation, ces vapeurs sont évacuées en procédant à 4 ou 5 vides successifs. Les sols fumigés ou non sont mis à incuber à la température de 30°C, et des échantillons sont prélevés après 7 et 14 jours pour être dosés. Le carbone de la biomasse microbienne (CBM) est obtenu selon la formule suivante :

Carbone de la biomasse microbienne (CBM) = [F (0-7)- F (7-14)]/Kc (exprimée en mg C 100 g⁻¹ sols) dont, F (0-7) : représente le carbone (mg kg⁻¹) du CO₂ dégagé par l'échantillon fumigé entre 0 et 7 jours d'incubation et F (7-14) = représente le carbone (mg kg⁻¹) du CO₂ dégagé par l'échantillon fumigé entre 7 et 14 jours d'incubation.

Kc est un coefficient de proportionnalité représentant la fraction de carbone minéralisable du compartiment « biomasse microbienne ». Il dépend du type de sol. Sa valeur moyenne qui est 0,41 a été utilisée.

3.4. Traitements statistiques des données

Le logiciel MapInfo 8.5 a été utilisé pour le traitement des données en vue d'élaborer les cartes d'occupation des sols.

Les logiciels SPSS16.1 et XLSTAT 2007 ont été utilisés pour les analyses descriptives et de variance (ANOVA) des données. Le test de Newman Keuls a été utilisé pour la séparation des moyennes lorsque l'analyse de variance révèle de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 pc.

L'analyse en composante principale (ACP), méthode de statistique multivariée, permet de décrire graphiquement la variabilité d'une série de variables quantitatives observées chez des individus en analysant les corrélations entre ces variables. L'ACP, conduite sous XLSTAT2007 selon la méthode de Pearson (p<0,05), a été appliquée aux teneurs en matière

organique, à l'azote et au phosphore assimilable, variables actives décrivant les caractéristiques chimiques des sols. Le rendement des cultures a été ajouté comme variable supplémentaire à l'analyse.

Conclusion partielle

Tout le matériel (végétal, pédologique, matériels techniques) que nous avons réuni est mis à contribution en fonction des méthodes retenues pour obtenir les principaux résultats de cette étude. Ces résultats ont permis de décrire, quantitativement ou qualitativement, les exploitations agricoles des savanes tchadiennes, les caractéristiques physiques, chimiques, biologiques des sols ainsi que les rendements des cultures.

TROISIEME PARTIE

RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE IV. OCCUPATION DES SOLS, TYPOLOGIE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES ET ANALYSES DES SYSTEMES DE CULTURE

4.1. Résultats

4.1.1. Principales caractéristiques des sites étudiés

4.1.1.1. Site de Ndaba

Ndaba est situés à la limite sud du champ pétrolier de Doba entre $16^{\circ}45'39''$ et $16^{\circ}52'27''$ de longitude Est et entre $8^{\circ}26'51''$ et $8^{\circ}31'41''$ de latitude Nord. Les terres cultivables représentent 99 pc de la superficie totale du village (Figure 16). En 2011, les cultures et les jachères de plus de 5 ans ont occupé respectivement 32 et 67 pc des terres cultivables.

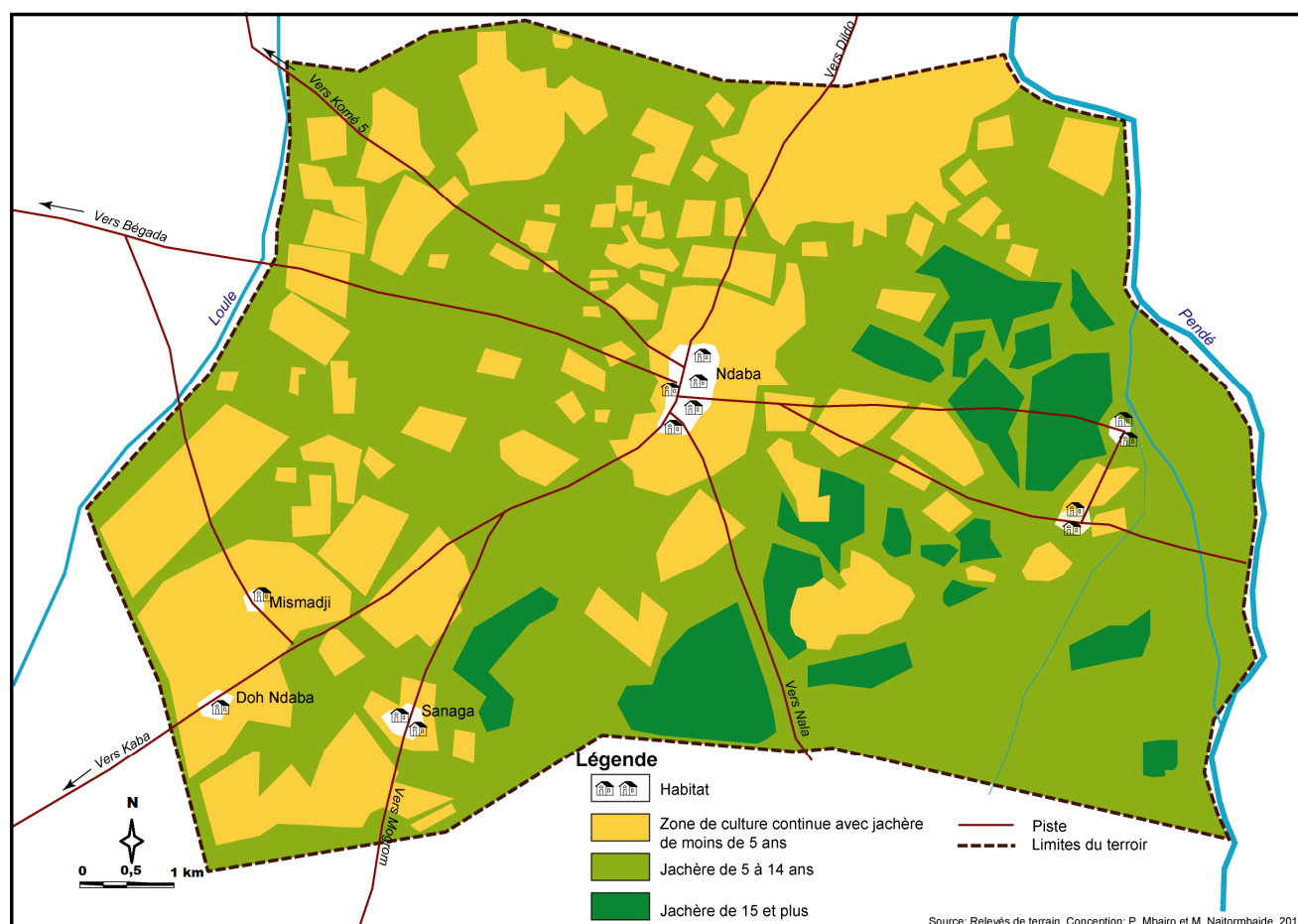


Figure 16. Carte d'occupation de sol de Ndaba

On distingue à Ndaba deux principaux types de sols dont les vertisols et les luvisols couvrant respectivement 5 et 95 pc du terroir. Les luvisols sont à texture sablo-limoneuse avec de teneurs moyennes en matière organique, en phosphore (P) et azote (N) totaux. Avec un rapport C/N égal à 15 et un pH de 6,2, les teneurs en C, en N total et en P total de ces sols sont respectivement de 8,1 g kg⁻¹ ; 0,5 g kg⁻¹ et 361,1 mg kg⁻¹.

Les principales cultures pratiquées en termes de superficies par ordre ont été le sorgho, l'arachide, le mil et le coton. Dans ce site, la jachère est le principal mode restauration de la fertilité des sols. La seule forme d'apport organique aux cultures est le fumier collecté sur les parcs et souvent appliqué dans les champs de case. Les engrais coton NPKSB et l'urée sont essentiellement appliqués à la culture du coton aux doses respectives de 100 et 50 kg ha⁻¹ de NPKSB.

4.1.1.2. Site de Nguetté1.

Nguetté1 est situé entre 15°11'44'' et 15°15'40'' de longitude Est et entre 9°17'46'' et 9°24'01'' de latitude Nord (Figure 17).

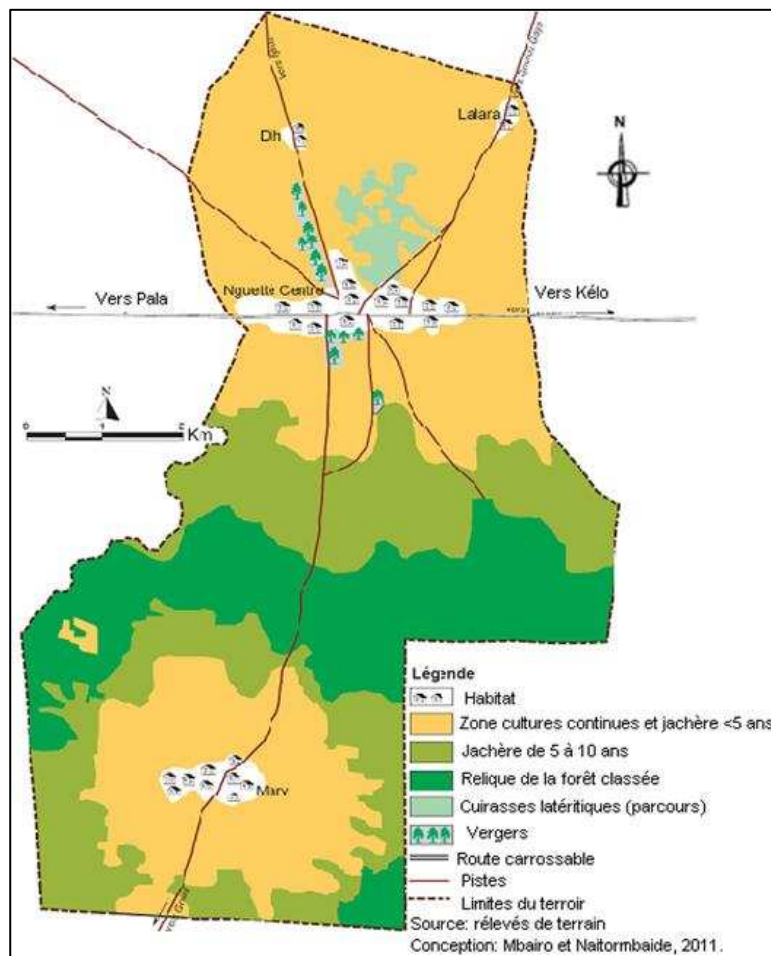


Figure 17. Carte d'occupation de sol de Nguetté1

Trois types de sols ont été identifiés à Nguetté1:

- les lithosols, peu profonds en îlots et parsemant l'Est et l'Ouest du terroir. Cet espace ne représente que 1 pc de la superficie du terroir. Il est surtout dévolu au pâturage.
- les fluvisols où sont implantés les vergers représentent 14 pc de la superficie du terroir ;
- et les ferralsols qui constituent la zone favorable à toutes les cultures pratiquées dans les savanes. Ces sols occupent 85 pc de la superficie totale de Nguetté1. L'étude actuelle a été menée sur ce type de sol à texture sablo-argileuse et faiblement acide ($\text{pH}=6,2$). Il est pauvre en matière organique, en phosphore (P) et azote (N) totaux. Avec un rapport C/N égal à 10, leurs teneurs en C, en N total et en P total sont respectivement de $4,5 \text{ g kg}^{-1}$; $0,4 \text{ g kg}^{-1}$ et $101,3 \text{ mg kg}^{-1}$.

En 2011, 52 pc de la superficie des terres cultivables ont été emblavés. Les jachères de plus de 5 ans ont occupé 14 pc des terres cultivables.

Les principales cultures pratiquées ont été par ordre d'importance le sorgho, l'arachide, le coton, le maïs et mil. La proportion des différentes cultures dans l'assolement varie en fonction de la présence ou non du cotonnier. Toutefois, il a été noté que le sorgho occupe toujours des superficies plus importantes suivies de celles de l'arachide et de coton qui occupent des proportions sensiblement équivalentes.

La jachère reste la méthode la plus utilisée pour restaurer la fertilité. La forme d'amendement organique la plus pratiquée est le parage de bœufs sur les parcelles et les épandages des déjections et des poudrettes de parcs, collectés sur les lieux de parage des animaux, pour ceux qui ont des charrettes. Les engrais minéraux tels que le NPKSB et l'urée sont réservés surtout à la culture du coton et de maïs qui reçoivent des doses moyennes respectives de 100 et 50 kg ha^{-1} de NPKSB.

4.1.1.3. Site de Tala1

Tala est situé entre $16^{\circ}15'29''$ et $16^{\circ}17'23''$ de longitude Est et entre $8^{\circ}51'29''$ et $8^{\circ}53'42''$ de latitude Nord. Il est localisé dans la zone où les sols sont considérés comme les plus dégradés dans les savanes tchadiennes. Les terres agricoles de ce site occupent environ 89 pc de la superficie totale du terroir (Figure 18). La seule jachère qui existe dans ce village a une durée de 12 ans et ne représente que 0,3 pc des terres cultivables.

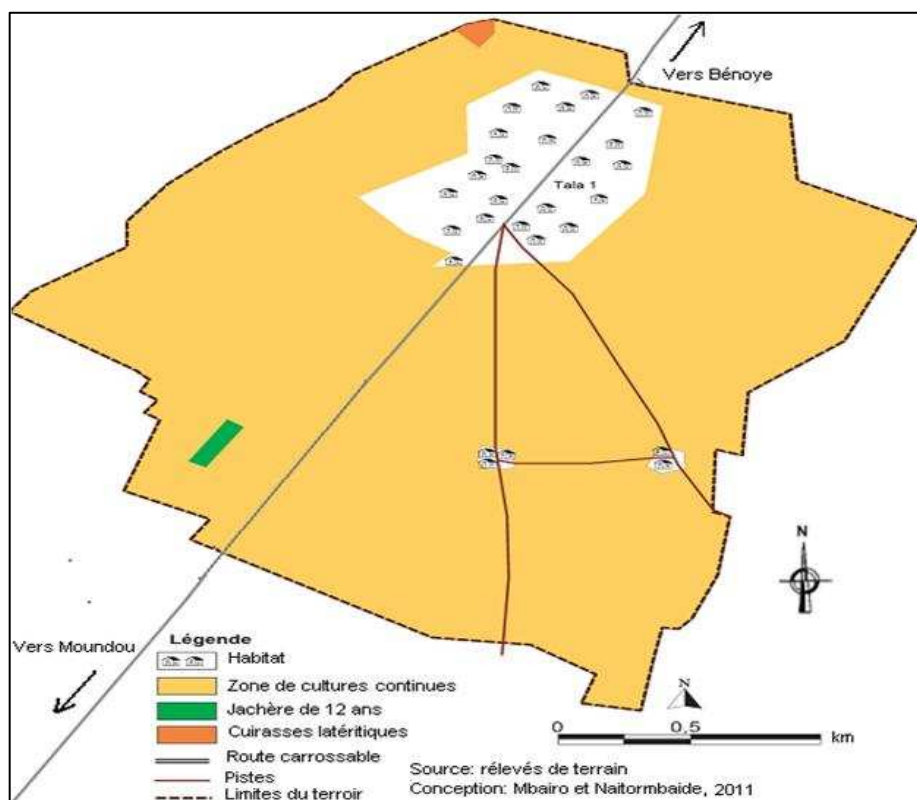


Figure 18. Carte d'occupation de sol de Tala1

On distingue deux types de sols à Tala1 :

- les lithosols où la cuirasse affleure le sol sur 0,2 pc de la superficie totale du village ;
- les nitosols à texture sablo-argileuse et moyennement acides ($\text{pH}=5,8$). L'étude a été menée sur ce type de sols pauvres en matière organique, en azote (N) et phosphore (P) total. Avec un rapport C/N de 9, les teneurs respectives en carbone, en N et en P total sont de $3,3 \text{ g kg}^{-1}$; $0,4 \text{ g kg}^{-1}$ et $90,2 \text{ mg kg}^{-1}$.

Les principales espèces cultivées en termes de superficie par ordre d'importance ont été le mil, l'arachide et le niébé. La culture de coton est proscrite dans ce village à cause de la dégradation avancée de la fertilité des sols. Le système de culture se caractérise par la pratique de culture continue. L'amélioration de la fertilité des sols se fait essentiellement par des apports des poudrettes de parcs de bœufs (fumier mal décomposé) et des composts dans les parcelles d'arachide et de mil. La dose moyenne appliquée tous les 3 à 4 ans n'est que de 2170 kg ha^{-1} .

4.1.2. Typologie des exploitations agricoles

Notre étude basée sur la possession ou non des équipements agricoles à traction animale (Bœufs de traction, charrues, charrettes) des exploitants a permis d'obtenir les résultats contenus dans le Tableau III.

Tableau III. Principales caractéristiques des exploitations agricoles

Site	Type exploitation	Proportion (pc)	Bœuf de trait	Charrue	Charrette	Jachère	Superficie/ exploitation	Superficie /actif
							Ha	
Tala1	Ta1	17	4	1,1	1	0	4,3	0,9
	Ta2	17	0	0	0	0	2,2	0,6
Ndaba	Nd1	9	3	1,2	0	18,9	22,7	3,8
	Nd2	24	0	0	0	7,2	9,1	3,0
Nguetté1	Ng1	11	5	2,3	1	7,1	13,3	2,5
	Ng2	22	0	0	0	2,5	4,6	1,2

Légende. Ta : exploitation de Tala1 ; Nd : exploitation de Ndaba ; Ng : exploitation de Nguetté1 ; les nombres 1 et 2 désignent respectivement les exploitations propriétaires de traction animale et les exploitations manuelles. Le nombre des bœufs, charrues, charrettes et superficies consignées dans le tableau ci-dessus sont des valeurs moyennes.

Des résultats du Tableau III on a pu classer les exploitations en deux groupe d'exploitants dans chaque site : les exploitations propriétaires de traction animale et les exploitations manuelles.

4.1.2.1. Exploitations propriétaires de traction animale

Ils représentent 37 pc de l'échantillon repartis entre les 3 sites. Quarante huit pour cent sont basés à Tala1, 26 pc à Ndaba et 26 pc à Nguetté1.

Les exploitations de Nguetté1 et Tala1 diffèrent de celles de Ndaba surtout par la superficie des terres cultivables et celles qui sont emblavées chaque campagne agricole. A Tala1, un producteur n'a que 4,3 ha de terres cultivables qu'il emblave entièrement chaque année. Celui de Nguetté1 possède 13,3 ha de terres cultivables. Seulement 45 pc de cette superficie est mis en culture chaque année. La surface agricole par actif n'est que 0,9 ha dans les exploitations de Tala alors que celle d'un actif agricole de Nguetté1 est de 2,5 ha.

Les exploitants de Ndaba sont moins équipés. Chaque exploitant possède en moyenne 3 bœufs et 1 charrue. La superficie cultivable par exploitation est de 22,7 ha dont seulement 17 pc est mise en culture chaque année. La surface agricole par actif est de 3,8 ha.

4.1.2.2. Exploitations manuelles

Ils représentent 53 pc de l'échantillon. Vingt cinq pour cent sont basés à Tala1, 35 pc à Nguetté1 et 38 pc à Ndaba. Comparativement aux exploitations propriétaires de traction animale, les superficies des terres agricoles des exploitations manuelles sont relativement faibles. En effet, une exploitation de Tala1, de Nguetté1 et de Ndaba a comme superficie de

terres cultivables respectives de 2,2 ; 4,6 et 9,1 ha. Toutes les terres cultivables des exploitants de Tala1 sont mises en culture chaque année. Dans les exploitations de Ndaba et de Nguetté1, ce sont respectivement 21 et 47 pc des terres cultivables qui sont mises en culture chaque année. Un actif exploite 3 ha à Ndaba ; 1,2 ha à Nguetté1 et 0,7 ha à Tala1.

4.1.3. Analyses des systèmes de culture

Les systèmes de culture identifiés dans les exploitations agricoles changent en fonction des conditions agro écologiques. A Tala1 où les sols sont assez dégradés, la culture du coton n'est plus possible. Seuls, le mil et l'arachide moins exigeants en éléments minéraux et en types de sols sont largement cultivés. Le choix des cultures et les pratiques de gestion de la fertilité des terres par les exploitants sont fonction des conditions économiques des exploitants et de leurs objectifs de production.

4.1.3.1. Assolements des cultures

L'importance relative des superficies par culture varie en fonction des types d'exploitation et des sites.

- **Exploitations agricoles propriétaires de traction animale**

L'arachide (34 pc), le mil (23 pc), le sorgho (22 pc) et le coton (10 pc) sont par ordre d'importance les espèces les plus cultivées dans l'ensemble des exploitations qui possèdent la traction animale.

Le sorgho, le mil et l'arachide occupent respectivement 50 ; 24 et 14 pc des superficies cultivées à Ndaba. A Tala1, les principales cultures sont l'arachide et le mil qui occupent respectivement 49 et 41 pc des superficies cultivées. Le sorgho, l'arachide et le coton occupent respectivement 33 ; 29 ; 23 pc des superficies cultivées à Nguetté1.

- **Exploitations manuelles**

Dans l'ensemble des exploitations manuelles des 3 sites, le sorgho (38 pc), l'arachide (35 pc) et le mil (15 pc) sont par ordre d'importance les principales espèces cultivées. Le coton n'est cultivé que dans les exploitations de Ndaba et Nguetté1.

A Tala1, les sols étant relativement dégradés, l'arachide et le mil sont les deux espèces les mieux adaptées et les plus cultivées. Ils occupent respectivement 47 et 35 pc des superficies cultivées. Le sorgho et l'arachide sont les espèces les plus cultivées à Nguetté1. Ils occupent respectivement 40 et 39 pc des superficies cultivées. Le sorgho, l'arachide et dans

une moindre mesure le mil sont les espèces les plus cultivées à Ndaba. Ils occupent respectivement 58, 22 et 10 des superficies cultivées.

4.1.3.2. Successions et associations culturales

- **Successions culturales**

A Nguetté1 et Ndaba où la pratique de la jachère est possible, le niébé, le sésame ou le coton viennent en tête de rotation après une jachère d'une durée de plus de 10 ans. A Ndaba, le sésame et le niébé viennent en tête de rotations dans respectivement 45 et 35 pc des cas recensés. A Nguetté1, ce sont le coton et le niébé qui sont cultivées après la jachère de longue durée dans 57 et 26 pc des cas recensés. Dans ces sites, lorsque la jachère n'a duré que 2 à 3 ans, les cultures qui la suivent sont le sorgho, le maïs et l'arachide.

A Tala1, compte tenu de la saturation foncière, la pratique de la jachère n'est plus possible. La pratique de la culture continue est courante. Les céréales en culture pure (mil) ou associée (arachide+sorgho) s'alternent d'année en année avec le mil ou l'arachide (arachide/mil ; mil/arachide+sorgho ; mil/arachide). A Nguetté1 et Ndaba, les précédents culturaux des cultures suivies ont été le sorgho pour l'arachide et le coton alors que le coton a précédé le sorgho. A Tala1, c'est la rotation mil/arachide et arachide/mil qui ont été observées.

- **Associations culturales**

Les associations des cultures sont des pratiques agricoles courantes qui existent dans toutes les exploitations des savanes. Cependant, les espèces associées varient en fonction des sites. Dans un site donné, les espèces associées sont les mêmes dans les exploitations propriétaires de traction animale ou manuelles.

A Tala1 deux principaux types d'association des cultures ont été identifiés. L'arachide est associée au sorgho dans 95 pc des cas. Le sorgho est associé à la courge dans 5 pc des cas.

A Nguetté1, c'est l'association de l'arachide (67 pc des cas) au sésame et celle du sorgho au mil (60 pc des cas) qui prédominent.

L'association du sorgho à l'arachide et celle du sorgho au niébé prédominent à Ndaba avec respectivement 63 et 31 pc des cas recensés.

4.1.3.3. Pratiques de gestion de la fertilité des sols

Le nettoyage de la parcelle est la 1^{re} étape pour sa mise en culture entreprise dans toutes les exploitations échantillonnées. Les résidus des cultures ou des végétaux sont entassés, puis brûlés. Le labour est l'opération suivante, puis les semis s'en suivent. L'enquête a révélé que dans 90 pc des cas, les semis effectués autour des cases sont faits directement

sans labour. En revanche dans les champs de brousse, le labour se fait à la traction bovine systématiquement dans les parcelles des exploitations propriétaires de traction animale.

Les exploitations manuelles paient la prestation dont les taux varient en fonction des sites. Le coût d'un hectare labouré dans ces sites varie entre 10 000 et 15 000 francs CFA. Lorsque celles-ci ne peuvent pas accéder à la traction animale pour des raisons financières ou de l'indisponibilité des animaux, elles décident de faire le semis direct. Le semis direct ainsi réalisé est donc une stratégie qui permet d'éviter tout échec lié au semis tardif.

S'agissant des principales cultures identifiées, la priorité du labour est donnée à l'arachide et au coton dans 98 pc des exploitations à traction animale. Ces deux espèces sont pratiquement considérées comme des cultures de rente par les exploitants ces dernières années. En effet, l'arachide procure des revenus monétaires substantiels lorsqu'elle est vendue pendant les mois de juillet et août pour être consommée fraîche.

Les sarclages sont toujours manuels. Le nombre de sarclages d'une culture donnée varie en fonction de l'espèce cultivée et de la disponibilité de la main d'œuvre dans l'exploitation au moment opportun. Quelque soit l'espèce cultivée, le 1^{er} sarclage se fait systématiquement sur toutes les parcelles. Cependant, selon la disponibilité de la main d'œuvre dans l'exploitation, il connaît souvent un retard. Ce qui peut avoir des effets négatifs sur le rendement des cultures car il peut s'établir une forte compétition entre la culture et les adventices pour les éléments minéraux des sols.

Dans toutes les exploitations échantillonnées, 100 pc des parcelles d'arachide recensées ont bénéficié d'au moins deux sarclages pendant la campagne agricole 2007/2008.

L'importance du 2^e sarclage de sorgho est très variable. Dans les exploitations propriétaires de traction animale de Ndaba et Nguetté1, respectivement 58 à 75 pc des parcelles recensées ont connu le 2^e sarclage. Dans les exploitations manuelles, ce sont 55 et 38 pc des parcelles de sorgho respectivement à Ndaba et Nguetté1 qui ont connu un 2^e sarclage. Les proportions des parcelles de mil ayant connu le 2^e sarclage sont de 98 ; 85 et 53 pc respectivement à Tala, Nguetté1 et Ndaba dans les exploitations propriétaires de traction animale. Dans les exploitations manuelles de Tala1, Nguetté1 et Ndaba, ce sont respectivement 62 ; 45 et 58 pc des parcelles de mil qui ont connu un 2^e sarclage. Le 2^e sarclage de coton se fait dans 98 et 97 pc des parcelles respectivement à Ndaba et Nguetté1 dans les exploitations propriétaires de traction animale. Dans les exploitations manuelles de Ndaba et Nguetté1, des proportions respectives de 58 et 86 pc des parcelles de coton ont connu un 2^e sarclage.

L'arachide ne bénéficie que de la fumure organique dans les exploitations propriétaires de traction animale de Tala1. Quarante pour cent des parcelles recensées ont été fertilisées à la

dose moyenne de 2160 kg ha⁻¹. La fumure organique a été appliquée également sur 50 pc des parcelles de mil à Tala1 dans les exploitations propriétaires de traction animale. Seulement 10 pc des parcelles de sorgho ont été fertilisés au NPKSB à la dose de 50 kg ha⁻¹ dans les exploitations propriétaires de traction animale (Tableau IV). Cinquante pour cent des parcelles du mil ont été fertilisées avec la fumure organique dans les exploitations à traction animale de Tala1. La dose moyenne appliquée est de 2170 kg ha⁻¹. Le coton a été fertilisé au NPKSB et à l'urée aux doses respectives de 108 et 34 kg ha⁻¹ (Tableau IV).

Tableau IV. Dose des fumures organiques et minérales appliquées en kg ha⁻¹ aux cultures

Sites	Type	Arachide	Sorgho	Mil	Coton	
	exploitation	Fo	NPK	Fo	NPK	Urée
Tala1	Ta1	2160	0	2170	np	np
	Ta2	0	0	0	np	np
Nguetté1	Ng1	0	50	0	108	34
	Ng2	0	0	0	0	0
Ndaba	Nd1	0	0	0	100	50
	Nd2	0	0	0	0	0

Légende. Fo : fumure organique ; NPKSB : engrais coton dosé à 19.12.19.5.1,2 ; np : culture non pratiquée ; Ta : exploitation de Tala1 ; Nd : exploitation de Ndaba ; Ng : exploitation de Nguetté1 ; le nombre 1 désigne les exploitations propriétaires de traction animale ; le nombre 2 désigne les exploitations manuelles.

Après les récoltes, les résidus des cultures sont soit laissés sur place dans les parcelles, soit brûlés par les feux accidentels ou encore exportés par les producteurs pour des besoins domestiques. Les fanes des variétés d'arachide précoces récoltées en juillet et août ne peuvent pas être stockées ni pour le bétail de l'exploitant, ni pour la vente à cause de l'humidité toujours élevée. Elles se décomposent donc sur place en contribuant ainsi dans une certaine mesure à améliorer la fertilité des sols.

4.1.3.4. Effets des fumures sur les rendements des cultures suivies

Pour évaluer la productivité des espèces cultivées, deux principales cultures pratiquées en pur par sites ont été suivies à travers des placettes implantées dans les champs paysans. Seule l'arachide est cultivée en pur et suivie dans tous les sites. Le sorgho n'est cultivé en pur à Ndaba et Nguetté1. Il n'est pas cultivé en pur à Tala1 à cause de la pauvreté des sols. C'est ainsi le choix a été porté sur le mil qui a été suivi. En conséquence, l'effet des traitements sur

une culture selon les sites ne peut se faire que pour l'arachide cultivée dans tous les sites et le sorgho pour Ndaba et Nguetté1. En 2008, le sorgho, l'arachide et le mil cultivés en pur en milieu paysan ont atteint des rendements moyens respectifs de 655; 1089 et 711 kg ha⁻¹ (DSA, 2011). Les rendements de ces mêmes espèces suivies dans les exploitations des sites étudiés (Tableau V) sont supérieurs aux rendements observés sur ces cultures dans la zone.

Tableau V. Rendements des principales cultures en kg ha⁻¹ par sites et par exploitants

Site	Type exploitation	Arachide	Sorgho
Tala1	Ta1	2436 a	-
	Ta2	1351 b	-
Nguetté1	Ng1	2133 ab	1578 a
	Ng2	1211 b	1121 ab
Ndaba	Nd1	1724 ab	867 b
	Nd2	1200 b	533 b

Légende. - : culture non suivie dans le site ; Les moyennes suivies de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls ($p < 0,05$).

Les rendements de mil obtenus par les exploitants à traction animale et manuels à Tala1 ont été respectivement de 990 et 630 kg ha⁻¹. Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) n'a pas révélé des différences significatives entre les rendements de cette culture obtenu par les deux types d'exploitants.

Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) appliqué aux rendements de l'arachide et du sorgho obtenus par les exploitations est significatif. Les exploitants possédant la traction animale obtiennent des meilleurs rendements en arachide que ceux qui n'en possèdent pas. Le rendement du sorgho le plus élevé est obtenu par toutes les exploitations de Nguetté1. Les propriétaires de traction animale de Tala1 ont obtenu 990 kg ha⁻¹ de mil. Les exploitations manuelles n'ont obtenu que 630 kg ha⁻¹ de mil.

4.1.4. Caractéristiques chimiques des sols sous l'arachide, relations entre son rendement, la matière organique (MO), l'azote (N) et le phosphore (P) assimilable des sols.

4.1.4.1. Caractéristiques chimiques des sols

L'analyse de variance a montré des différences significatives pour les teneurs en matière organique et le phosphore total des sols (Annexe 10). Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé que, la teneur en matière organique (MO) des sols cultivés en arachide a été

la plus élevée (17 g kg⁻¹) dans les exploitations de Ndaba propriétaires de traction animale (Tableau VI); elle a été 3 fois plus élevée que celles obtenues dans les autres exploitations.

Tableau VI. Caractéristiques chimiques des sols cultivés en arachide

Site	Exploitation	pH eau	MOS	N total	P total	P assimilable
			g kg ⁻¹		mg P kg ⁻¹	
Tala1	Ta1	5,7	6 b	0,3	113 ab	3,4
	Ta2	5,8	6 b	0,4	86 b	1,3
Nguetté1	Ng1	6,2	8 b	0,5	114 ab	3,2
	Ng2	6,2	6 b	0,4	92 b	2,7
Ndaba	Nd1	6,3	17 a	0,5	140 a	6,7
	Nd2	5,9	7 b	0,4 a	106 ab	1,3
Caractéristiques chimiques						
		ns	*	ns	*	ns

Légende. * : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; ns : non significatif ($p > 0.05$). Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$ selon le test de Newman Keuls.

Les teneurs en phosphore (P) total des sols cultivés en arachide dans les exploitations propriétaires de traction animale ont été les plus élevées que celles des exploitations manuelles. Quelque soit le type d'exploitation, la teneur en azote (N) du sol cultivé en mil est faible (0,3 à 0,4 g kg⁻¹).

4.1.4.2. Relations entre le rendement de l'arachide, la MO, l'N et le P assimilable des sols

L'analyse en composantes principales a permis d'établir la matrice de corrélations qui existent entre les différents paramètres chimiques analysés et le rendement de l'arachide (Tableau VII). L'analyse a intégré au départ tous les paramètres (site, type exploitation, MO, N et P assimilable) mais aucune corrélation significative n'a été relevée. C'est ainsi que les paramètres sites et exploitation ont été éliminés à cause de leur faible contribution à la formation des axes.

Tableau VII. Matrice de corrélation (Pearson (n))

Variables	Matière organique (MO)	Azote total (NT)	Phosphore assimilable (Pa)	Rendement
Matière organique	1	0,270	0,276	-0,413
Azote total	0,270	1	0,333	-0,021
P assimilable	0,276	0,333	1	0,734
Rendement	-0,413	-0,021	0,734	1

Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

La Figure 19 représente le cercle de corrélation des variables sur le plan principal (plan 1 - 2). Les deux premiers axes expliquent 77,76 pc de la variabilité totale des différentes variables actives.

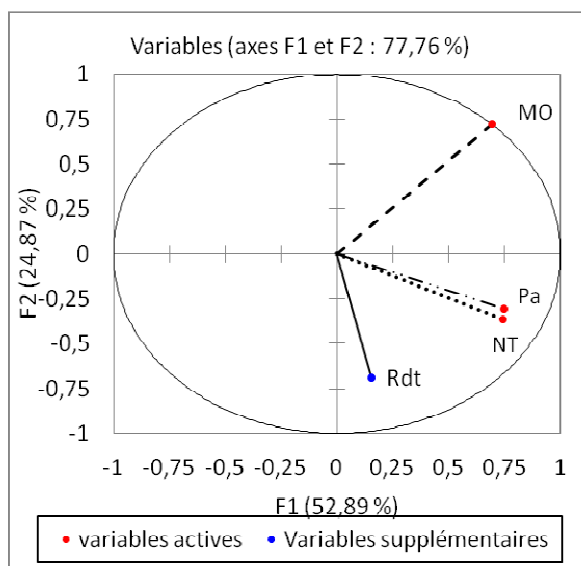


Figure 19. Corrélation entre la MO, l’N et le P assimilable et le rendement de l’arachide

L'axe 1 explique à lui seul 52,89 pc de la variation totale de la matrice de dispersion des individus et l'axe 2 ; 24,87 pc. L'axe 1 est caractérisé surtout par le phosphore assimilable et l’N. La corrélation qui existe entre le rendement de l’arachide et le phosphore assimilable est significative ($p < 0,05$ au Test de Pearson). Par contre, les corrélations qui existent entre les paramètres chimiques étudiés ne sont pas significatives.

4.1.5. Caractéristiques chimiques des sols sous le mil, relations entre son rendement, la matière organique (MO), l'azote (N) et le phosphore (P) assimilable des sols.

4.1.5.1. Caractéristiques chimiques des sols

A Tala1, les teneurs des sols en MO, en N et en phosphore ont été statistiquement identiques dans les exploitations propriétaires de traction animale et manuelles. Les teneurs en MO ont été de $0,5 \text{ g kg}^{-1}$ de sol, celles de l'azote ont été dans les exploitations à traction animale et manuelle de $0,4$ et $0,3 \text{ g kg}^{-1}$ respectivement. Les teneurs en P total ont été de 92 et 86 mg kg^{-1} de sol respectivement dans les exploitations propriétaires de traction animale et manuelles. La teneur en P assimilable n'a été que de $1,3 \text{ mg kg}^{-1}$ dans les deux types d'exploitations. Le test de Newman Keuls appliqué à tous ces paramètres ne révèle pas des différences significatives ($p < 0,05$) entre leurs valeurs dans les deux types d'exploitations.

4.1.5.2. Relations entre rendement du mil, la MO, l'N et le P assimilable des sols.

L'analyse en composantes principales montre que le maximum d'informations est obtenu avec les axes factoriels F1 et F2 (Figure 20). Ces derniers expliquent respectivement 74,88 et 22,19 pc des informations.

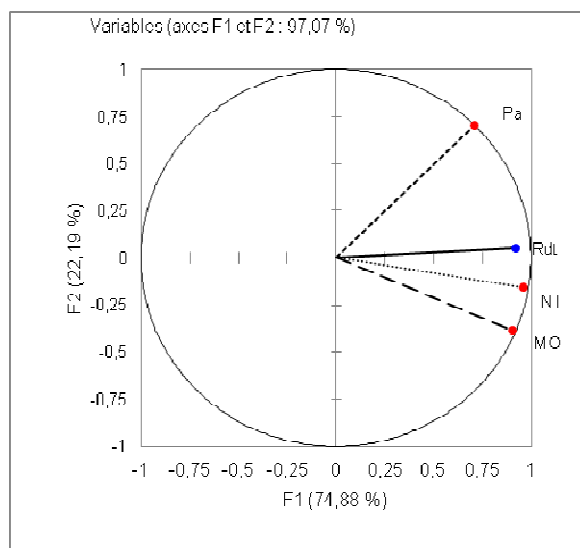


Figure 20. Corrélation entre la MO, l'N et le P assimilable et le rendement du mil.

L'axe 1 est caractérisé par le P assimilable, la matière organique du sol et l'azote. C'est l'axe de la fertilité des sols. La matrice de corrélation des variables révèle qu'il existe des corrélations étroites et significatives (test de Pearson, $p < 0,05$) entre le rendement du mil et la matière organique du sol d'une part et entre la matière organique et l'azote d'autre part (Tableau VIII).

Tableau VIII. Matrice de corrélation (Pearson (n))

Variables	Matière organique (MO)	Azote total (NT)	Phosphore assimilable (Pa)	Rendement
Matière organique	1	0,889	0,382	0,868
Azote total	0,889	1	0,559	0,811
P assimilable	0,382	0,559	1	0,703
Rendement	0,868	0,811	0,703	1

Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

Le coefficient de corrélation entre la MO et le rendement du mil, puis entre la MO et l’N étant respectivement de 86,8 et 88,9 pc. La corrélation entre la MO et l’N est également significative ($p<0,05$).

4.1.6. Caractéristiques chimiques des sols sous le sorgho, relations entre son rendement, la matière organique (MO), l’azote (N) et le phosphore (P) assimilable des sols.

4.1.6.1. Caractéristiques chimiques des sols

Les teneurs en matière organique des sols cultivés en sorgho sont faibles. Elle est en moyenne de 8,2 g kg⁻¹ dans les exploitations propriétaires de traction animale et de 6,8 g kg⁻¹ dans les exploitations manuelles. Cependant, le test de Newman Keuls ($p<0,05$) n’a pas révélé des différences significatives entre les teneurs en MO observées. Ces sols étant pauvres en MO, ils ont été moyennement acides (pH eau variant entre 5,7 et 6,3).

Les teneurs en phosphore total (90,4 à 111 mg kg⁻¹) et celles du phosphore assimilable (2,8 à 3,4 mg kg⁻¹) sont aussi faibles. Le test de Newman Keuls ($p<0,05$) n’a pas révélé des différences significatives entre les teneurs en phosphore des sols sous culture de sorgho selon les types d’exploitations caractérisés.

4.1.6.2. Relations entre le rendement du sorgho, la MO, l’N et le P assimilable des sols.

L’examen de la matrice de corrélation permet de dégager des relations étroites et significatives (Test de Pearson, $P<0,05$) qui existent entre les différents paramètres du sol et le rendement du sorgho.

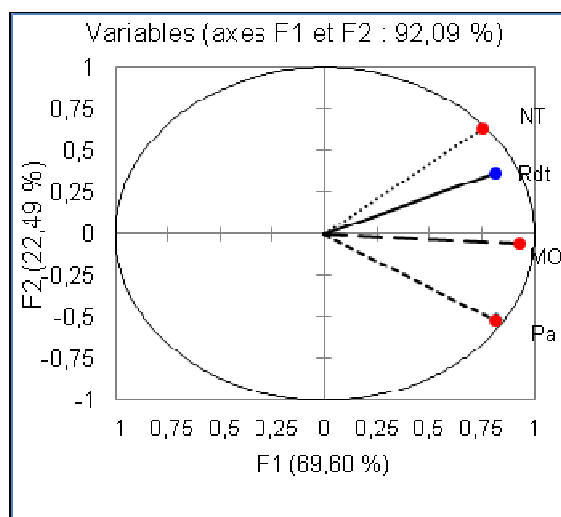
Tableau IX. Matrice de corrélation (Pearson (n))

Variables	Matière organique (MO)	Azote total (NT)	P assimilable (Pa)	Rendement
Matière organique	1	0,594	0,688	0,743
Azote total	0,594	1	0,330	0,840
P assimilable	0,688	0,330	1	0,463
Rendement	0,743	0,840	0,463	1

Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,0$.

Des corrélations étroites et significatives existent entre la MO et le rendement ($r = 74,3$ pc), entre l’N et le rendement ($r = 84$ pc), et entre le P assimilable et la MO ($r = 68,8$ pc).

Quatre vingt douze pourcent des informations est obtenu sur les deux premiers axes (Figure 21). L’axe 1 comprend 69,6 pc des informations.

**Figure 21.** Corrélation entre la MO, l’N et le P assimilable et le rendement du sorgho.

L'axe 1 est caractérisé par P assimilable, MO et N. La variable rendement est expliquée par l'axe 1. Cet axe peut être considéré comme l'axe de la fertilité des sols.

4.1.7. Evaluation des effets des pratiques culturales dans les systèmes culturaux de Nguetté1

L'évaluation des effets des pratiques agricoles sur les caractéristiques chimiques des sols et les rendements des cultures a été effectuée à travers les successions culturales coton/sorgho, arachide/sorgho, sorgho/arachide et maïs/arachide dans les parcelles paysannes en 2006 et 2007. L'étude a eu pour objectif d'évaluer les effets des pratiques agricoles

paysannes (gestion des fumures, rotations) sur les rendements des cultures. Elle n'a été effectuée que dans les exploitations à traction animale.

4.1.7.1. Evolution des caractéristiques chimiques des sols

- **Le carbone et l'azote total**

Le test de Duncan ($p < 0,05$) appliqué aux teneurs en C, en N et les rapports C/N des sols du système maïs/arachide entre 2006 et 2007 a été significatif. Les valeurs de ces paramètres observés dans ce système en 2006 est statistiquement supérieures à celles de l'année 2007 (Tableau X). Les sols se sont relativement appauvris en matière organique par rapport à la 1^{re} année de culture.

Tableau X. Effets des successions culturales sur les teneurs des sols en carbone total et azote total exprimées en g kg⁻¹ entre 2006 et 2007.

Paramètres	Années	Succession culturale			
		Coton/sorgho	Arachide/sorgho	Sorgho/coton	Maïs/arachide
Carbone total	2006	4,4±0,4 a	5,5±1,1 a	5,5±0,9	7,9±0,5 a
	2007	4,5±1,1 a	4,4±0,4 a	3,8±1,9	3,0±0,1 b
Azote total	2006	0,3±0,1 b	0,4±0,1 a	0,4±0,1	0,6±0 a
	2007	0,4±0,1 a	0,5±0 a	0,3±0,1	0,4±0,1 b
C/N	2006	15±2,4 a	14±0,4 a	13±1,7	13±0,5 a
	2007	10±2,0 b	9±1,3 b	10±3,5	7±1,3 b

Légende. Les moyennes de chaque paramètre des 2 années suivies de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différentes selon le test de Duncan ($p < 0,05$).

A l'exception du système sorgho/coton où les rapports C/N en 2006 et 2007 ont été identiques, les rapports C/N des autres systèmes de l'année 2007 ont été inférieurs à ceux observés en 2006.

- **Le pH, le phosphore (P) et le potassium (K) des sols**

Le test de Duncan a révélé des différences significatives entre les pH des sols de tous les systèmes entre 2006 et 2007 montrant une baisse tendancielle de ce paramètre. En ce qui concerne le P total, le test de Duncan révélé des différences significatives entre ses teneurs observées en 2006 et 2007 dans le système maïs/arachide (Tableau XI). La teneur en P dans ce système a diminué significativement à la 2^e année de culture.

Tableau XI. Effets à court terme des successions culturales sur le pH du sol, et les teneurs des sols en phosphore (mg P kg⁻¹) et potassium (mg K kg⁻¹) entre 2006 et 2007.

Paramètre	Année	Succession culturale			
		Coton/sorgho	Arachide/sorgho	sorgho/coton	maïs/arachide
pH eau	2006	6,9±0 a	7,0±0,3 a	7,0±0,2 a	7,1±0,1 a
	2007	6,2±0,2 b	6,1±0,5 b	6,1±0,2 b	6,3±0,1 b
P total	2006	84,9±19,7 a	117,2±28,9 a	87,1±17,5 a	140,4±0,3 a
	2007	94,6±11,7 a	94,6±8,3 a	94,6±16,5 a	102,9±11,7 b
K total	2006	194±67 a	304±39 a	246±81 a	309±39 a
	2007	205±56 a	278±87 a	226±61 a	289±43 a

Légende. Les moyennes de chaque paramètre des 2 années suivies de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différentes selon le test de Duncan ($p<0,05$).

4.1.7.2. Le fractionnement granulométrique de la matière organique du sol

Le test de Duncan ($p<0,05$) a révélé que la teneur en carbone (C) de la fraction argilo-limoneuse (0-50) du système maïs/arachide est statistiquement supérieure à celles des trois autres systèmes qui sont identiques entre elles (Tableau XII). Dans la fraction de sable fin (50-200), la teneur de C du système maïs/arachide est également statistiquement supérieure à celle du système coton/sorgho alors que dans la fraction de sables grossiers (200-2000), les teneurs en C de tous les systèmes ont été statistiquement identiques.

Tableau XII. Comparaison des teneurs en carbone total (g C kg⁻¹) et en azote total (g N kg⁻¹) de chaque fraction granulométrique (µm) entre les systèmes étudiés.

Système de culture	Carbone total			Azote total		
	0-50	50-200	200-2 000	0-50	50-200	200-2000
Coton/sorgho	3,2±0,5 b	0,22±0,1 b	0,14±0	0,27	0,03	0,02
Arachide/sorgho	4,3±1,0 b	0,48±0,2 ab	0,41±0,3	0,30	0,03	0,03
Sorgho/coton	3,9±0,5 b	0,47±0 ab	0,34±0	0,31	0,04	0,04
Maïs/arachide	6,0±0,5 a	0,67±0 a	0,61±0	0,42	0,04	0,04

Légende. Les moyennes suivies de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différentes selon le test de Duncan, ($n=30$) ($p<0,05$).

Le test de Duncan ($p<0,05$) a révélé que les teneurs en azote des sols ont été identiques dans chaque fraction des systèmes étudiés.

Les rapports C/N de la matière organique associée aux particules argilo-limoneuses (0 -50 μm) dans le système coton/sorgho est de 11,6 ; dans le système arachide/sorgho, il est de 14; dans les systèmes sorgho/coton et maïs/arachide, il est respectivement de 12,7 et 15.

Dans la fraction (50 –200 μm), le rapport C/N est de 8,3 ; 18,1 ; 13,5 et 17,2 respectivement dans les systèmes coton/sorgho, arachide/sorgho, sorgho/coton et maïs/arachide. Par contre, dans la fraction (200 –2 000 μm), les rapports C/N est de 6,1 dans coton/sorgho ; 13 dans le système arachide/sorgho ; de 8,5 et 16,2 respectivement dans les systèmes sorgho/coton et maïs/arachide. Globalement, les rapports C/N augmentent de la fraction fine à la fraction sableuse dans le système maïs/arachide tandis que l'évolution inverse est observée dans les systèmes coton/sorgho, arachide/sorgho et sorgho/coton.

L'analyse de variance a montré des différences significatives pour les teneurs en C et N. Le test de Duncan ($p < 0,05$) a révélé que quelque soit le système étudié, les teneurs en C et en N de la fraction argilo-limoneuse sont statiquement supérieures à celles des fractions de sables fins (50-200) et grossiers (200-2000) (Tableau XIII).

Tableau XIII. Comparaison des teneurs en carbone et azote total (g kg^{-1}) entre les trois fractions granulométriques (μm) de chaque système étudié.

Carbone ($\text{g C kg}^{-1} \text{ sol}$)	Coton/sorgho	Arachide/sorgho	Sorgho/coton	Maïs/arachide
0-50	3,2 \pm 0,5 a	4,3 \pm 1,0 a	3,9 \pm 0,5 a	6,0 \pm 0,5 a
50-200	0,22 \pm 0,1 b	0,48 \pm 0,2 b	0,47 \pm 0 b	0,67 \pm 0 b
200-2000	0,14 \pm 0 b	0,41 \pm 0,3 b	0,34 \pm 0 a	0,61 \pm 0 b
Azote ($\text{g N kg}^{-1} \text{ sol}$)				
0-50	0,27 a	0,30 a	0,31 a	0,42 a
50-200	0,03 b	0,03 b	0,04 b	0,04 b
200-2000	0,02 b	0,03 b	0,04 b	0,04 b

Légende. Les moyennes suivies de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différentes selon le test de Duncan, ($n=30$) ($p < 0,05$).

4.1.7.3. Performances agronomiques des systèmes étudiés

Les fumures organiques et minérales ne sont appliquées que dans certains systèmes étudiés. En effet, en 2006, le sorgho et le maïs ont reçu respectivement 400 et 1120 kg ha^{-1} de fumier de parc dans les systèmes sorgho/maïs et maïs/arachide. L'engrais minéral a été appliqué sur le coton et le maïs. En effet, dans le système coton/sorgho, il a été appliqué sur le coton 75 kg ha^{-1} de NPKSB et 50 kg ha^{-1} d'urée. Le maïs n'a reçu que 50 kg ha^{-1} de NPKSB

et 25 kg ha⁻¹ d'urée dans le système maïs/arachide. Seul, le maïs de ce système a reçu une application de fumure organique et minérale. Cet apport a eu d'effet significatif sur le rendement de maïs.

En 2007, seul le coton a reçu en moyenne 109 kg ha⁻¹ de NPKSB et 30 kg ha⁻¹ d'urée. Toutefois, cet apport n'a pas augmenté significativement le rendement du coton graine (Tableau XIV). Le test de Duncan au seuil de 5 % n'est significatif que pour les rendements de l'arachide pendant les deux années de suivi.

Tableau XIV. Rendements (kg ha⁻¹) des spéculations mentionnées entre parenthèses dans les successions culturales.

	Coton/sorgho et sorgho/coton (Coton)	Arachide/sorgho et maïs/arachide (Arachide)	Sorgho/coton et coton/sorgho (Sorgho)	Maïs/arachide (Maïs)
Années				
2006	896±88 a	2800±200 a	1458±493 a	2206±746 a
2007	909±147 a	1267±94 b	1173±145 a	2069±631 a

Légende. Dans une même colonne, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes ($p < 0,05$) selon le test de Duncan ($n=10$).

4.2. Discussions

4.2.1. Principales caractéristiques des sites étudiés

L'étude effectuée à Ndaba, Nguetté1 et Tala1 a mis en exergue les contrastes qui existent entre ces sites. A Ndaba où la pression foncière est faible, la gestion de la fertilité des sols ne constitue pas une préoccupation majeure des producteurs. Pour maintenir la fertilité des sols, les producteurs ont surtout adopté la pratique des jachères de longues durées. Dans ce site, la pression foncière est surtout liée à la production pétrolière. En effet, lorsque le pétrole est localisé dans un espace donné, une dizaine d'hectares de champs ou de jachères est occupée pour l'installation du puits. Malgré les opérations de restauration des sols, ces derniers sont ainsi fragilisés et donc exposés aux risques de dégradation. De plus, les terres cultivables diminuent alors que la population augmente. Cela peut rompre le relatif équilibre actuel et entraîner la pratique de l'agriculture minière.

La forte pression anthropique ne permet plus la pratique de la jachère à Tala1. Le maintien de la fertilité des sols ne se fait que par l'application de fumier sur les parcelles relativement dégradées.

Les producteurs de Nguetté1 sont dans une zone à moyenne pression anthropique où se pratique davantage la culture du coton et de maïs exigeants en nutriments ; le maintien ou l'amélioration de la fertilité des sols se fait par la combinaison de plusieurs pratiques culturales dont les jachères et les apports organiques et minéraux. Cependant, le manque de restitution des résidus des cultures, les faibles quantités de fumures appliquées aux cultures et la pression foncière due à l'accroissement de la population entraînant la réduction de la durée des jachères peuvent exposer à terme à la dégradation continue des sols.

Les associations et de rotations culturales sont des pratiques généralisées dans tous les sites. Cependant, à Tala1 on observe parfois des associations comprenant plus de 4 cultures. Cette pratique est une stratégie permettant de limiter les risques bioclimatiques afin d'assurer un minimum de revenus et de la disponibilité alimentaire dans l'exploitation.

4.2.2. Typologie des exploitations agricoles

L'étude sur la typologie des exploitations nous est d'un grand intérêt pour réussir nos interventions en milieu rural. En effet, selon Jouve (1992), la prise en compte de la diversité des situations agricoles est fondamentale à toute intervention de recherche en milieu rural non contrôlé.

Deux catégories d'exploitations ont été retenues dans chaque site. Ces types d'exploitants ont des pratiques agricoles très diversifiées et peu adaptées à la gestion durable des terres fragilisant ainsi les systèmes de production actuels.

Seulement 37 pc des exploitations échantillonnées sont équipés. Dans la même zone, Piéri (1989), Hauswirth et Naitormbaide (2004), Djondang et Havard (2010) ont montré qu'entre 27 à 32 pc des exploitations sont équipés. L'augmentation de la proportion des propriétaires des équipements agricoles observés en 2008 serait liée à la reprise des subventions des équipements agricoles par l'Etat en 2005. La proportion des exploitations équipées varient en fonction de la pression anthropique observée dans le milieu. Tala1, compte 48 pc des exploitations propriétaires de traction animale. Ndaba et Nguetté1 comptent chacun un peu plus du quart des exploitations propriétaires de la traction animale.

A Ndaba et Nguetté1, 11 exploitants dans chaque site possèdent chacun deux à six avec une moyenne de trois bœufs de trait, tandis qu'à Tala, 22 exploitants possèdent entre deux et sept bœufs de trait avec une moyenne de quatre bœufs par exploitation. La charrue est possédée par toutes les exploitations à traction animale alors que la charrette n'est possédée que par quelques unes. A Ndaba les 11 exploitations à traction animales possèdent chacune entre une et deux charrues. Parmi ceux-ci, seulement trois possèdent chacun une charrette. A Nguetté1, les 11 exploitations possèdent chacune deux à quatre charrues et au moins une charrette. A Tala1, les 22 exploitations à traction animale possèdent chacune une charrue et une charrette. Le corps butteur est le matériel le moins disponible dans les exploitations. A Ndaba, aucune exploitation n'en possède, tandis qu'à Nguetté1 et Tala1, on dénombre en moyenne deux et un corps butteur respectivement dans ces sites chez un exploitant. Plusieurs raisons expliquent la variation et l'importance des matériels agricoles que possèdent les exploitations agricoles dans les sites d'étude. A Ndaba, la culture du coton à travers laquelle les producteurs accèdent aux crédits d'équipements agricoles est actuellement peu pratiquée. De plus les ressources naturelles étant moins dégradées, le moindre investissement en temps et en travail permet d'obtenir un minimum de production pour la satisfaction des besoins de base des exploitants. A l'opposé à Tala1, le taux d'occupation des terres cultivables (100 pc) à Tala1 est lié à l'importance des équipements agricoles que possèdent les exploitants de ce site. Ces équipements agricoles sont indispensables pour les exploitants car, ils leur facilitent le transport du fumier, les produits agricoles vers les centres urbains et la mise en place précoce des cultures. Cependant, ils ont aussi permis la mise en culture des terres marginales. Cette pratique favorise l'érosion des sols et la dégradation de terre, ainsi que des faibles rendements.

CNUCED (2010) l'a aussi observée au Mali, où l'emploi de la traction animale a permis de multiplier par près de 4 les superficies cultivées en coton de 1968 à 1986.

A Nguette¹, en plus de la culture du coton, l'arachide et le maïs sont de plus en plus cultivés. Les produits sont facilement écoulés à l'intérieur du pays et même exportés vers le Cameroun voisin. Les revenus provenant de ces ventes améliorent donc les revenus des producteurs, en conséquence l'accès aux matériels agricoles. Les exploitants propriétaires de la traction animale emblavent près de la moitié (45 pc) des terres cultivables. Ceux qui n'ont pas la traction animale n'emblavent que 21 pc des terres cultivables. La charrue et la charrette sont donc des facteurs de différenciation des exploitants puisqu'elles leur permettent d'améliorer leurs revenus (Haque *et al.*, 2000) par le labour et le transport, de réduire l'aléa climatique et alimentaire en implantant précocement les cultures (Powell *et al.*, 2004). En effet, par la prestation de service, un exploitant qui possède la traction animale à Nguette¹ gagne environ 55 000 F CFA an⁻¹ pour une superficie moyenne de 6,1 ha labourée. De même, au Kenya, la traction animale a permis d'accroître les rendements et la rentabilité, notamment en réduisant le travail de désherbage (Sosevile, 2000 ; Ghutiga, *et al.*, 2007).

A Tala¹, toutes les terres sont emblavées chaque année par les exploitants. La culture continue est devenue une pratique agricole courante. Ces résultats corroborent ceux de Boserup (1970) et Serpantié (2003) selon lesquels, sous un climat tropical et avec des sols sableux, la pratique de la jachère ne peut s'observer que dans le cas où le taux d'occupation des sols est inférieur à 20 pc. Au delà de 80 pc, la culture continue devient la règle. En conséquence, la fertilité des sols se dégrade. Le manque de jachère expose les terres de ce site à la dégradation. Selon Somé *et al.* (2007), les restitutions organiques par le biais des jachères de longue durée permettent de reconstituer la fertilité des sols épuisés par plusieurs années de cultures successives.

Dans les exploitations possédant la traction animale, le taux d'occupation des terres cultivables est de 45 pc à Nguette¹ et de 17 pc à Ndaba. A Nguette¹, les terres cultivables sont donc intensément exploitées. Ce qui peut constituer un risque de dégradation des sols. En effet, dans de bonnes conditions climatiques, la mise en culture des grandes superficies peut permettre aux exploitants d'assurer leur sécurité alimentaire et d'améliorer leurs revenus par la vente d'une partie des récoltes. Cependant, les pratiques culturales peu adaptées comme les brûlis, l'exportation des résidus de récolte, le manque ou l'insuffisance des apports organiques et minéraux peuvent entraîner la dégradation biophysique et chimique des sols cultivés (Naitormbaide *et al.* (2010).

4.2.3. Analyse des systèmes de culture

L'arachide occupe entre 18 et 48 pc des superficies cultivées. Les céréales sont souvent cultivées après cette légumineuse. En conséquence, elles profitent de l'azote atmosphérique fixé par la légumineuse. Cette pratique agricole contribue dans une certaine mesure à l'amélioration de la fertilité des sols. Djondang et Havard (2010) ont montré que les légumineuses, avec l'arachide comme espèce principale, occupent 38 pc des surfaces cultivées dans les savanes tchadiennes. Bien que l'arachide enrichisse le sol par la fixation de 8 à 23 kg ha⁻¹ d'azote atmosphérique (Bado, 2006), la pratique qui consiste à privilégier sa culture peut être à terme un facteur de paupérisation du sol car les exportations minérales n'y sont que faiblement compensées, tandis que les jachères ne sont plus assez longues pour permettre l'amélioration de la fertilité du sol.

La succession culturale est une pratique ancestrale et assez répandue dans les savanes tchadiennes. Elle est pratiquée pour des raisons d'amélioration de la fertilité. Le cycle de succession est souvent mal défini dans la plupart des exploitations. Dans les systèmes de culture de Ndaba et Nguetté¹, les successions culturales intègrent les jachères d'au moins 5 ans et les cultures du coton, des légumineuses et oléagineuses. Cette pratique contribue à la durabilité des systèmes de production. Par contre à Tala¹ où la culture continue par la pratique de labour est courante, les sols risquent de connaître d'avantage une dégradation accélérée. Ouattara (2009) a évalué le déstockage de la matière organique par les labours annuels à 9,8 t ha⁻¹ sous jachère contre 8,4 t ha⁻¹ lorsque les labours sont bisannuels.

A l'instar des successions culturales, les associations culturales sont pratiquées pour des raisons d'amélioration de la fertilité et de diversification des revenus. En outre, elles permettent aussi de résoudre la question de l'insuffisance des terres arables. L'arachide constitue le noyau autour duquel sont bâties les différentes formes d'associations culturales dans toutes les exploitations échantillonnées. Hauswirth et Naitormbaide (2004) ont aussi montré que dans la zone des savanes tchadiennes, les associations à base d'arachide et niébé occupent respectivement en moyenne 46 et 9 pc des superficies cultivées dans les exploitations.

L'association légumineuses (arachide ou niébé)/ sorgho constitue un bon exemple de synergie dans la gestion de la fertilité. Bado (2002) indique que l'arachide fixe 8 à 23 kg N ha⁻¹ de l'atmosphère, couvrant 27 à 34 pc de ses besoins en azote. Quant au niébé, il fixe 50 à 115 kg N ha⁻¹, soit 52 à 56 pc de ses besoins en azote. Compte tenu de la faible disponibilité de nos sols en azote, ces fixations peuvent améliorer la fertilité des sols et donc des cultures qui sont

associées à ces légumineuses. De plus, après les récoltes, les fanes et les pailles des céréales abandonnées au champ se décomposent et restituent de la matière organique et d'éléments minéraux au sol. Les effets favorables des associations tiennent également à la maîtrise des mauvaises herbes. Les études de Lawane *et al.* (2009) menées dans les savanes tchadiennes ont montré que la variété de sorgho S35 associée à la variété de niébé IT 81 D-994 permet de limiter les effets néfastes du *Striga*. Le rendement de sorgho obtenu avec l'association a été de 1459 kg ha⁻¹ alors qu'en culture pur il n'a été que de 425 kg ha⁻¹.

Les associations des cultures contribuent également à la préparation des terres grâce au labour biologique qu'effectuent les racines de certaines espèces cultivées. En effet, lorsque les racines des plantes cultivées colonisent le sol à différentes profondeurs, elles augmentent ses teneurs en MO, sa porosité et en conséquence son aération, l'infiltration de l'eau et des éléments minéraux de même que l'activité biologique de ce sol. Il est généralement admis que l'avantage de la culture associée par rapport aux cultures pures est que les cultures composantes sont capables, dans certaines situations, d'utiliser différemment les ressources naturelles. Le décalage dans le temps et l'espace des demandes en facteurs de croissance des composantes favorise une complémentarité dans l'utilisation des ressources (Willey, 1979).

L'association des cultures a aussi l'avantage de réduire les risques parasitaires par l'utilisation des plantes qui piègent certains parasites.

Après le défrichage et les brûlis des résidus, les exploitants échantillonnés propriétaires de traction animale pratiquent dans 100 pc des cas le labour avant les semis de l'arachide et du coton. Le labour présente des avantages certains mais il a également ses effets pervers. Au Mali, l'emploi de la traction animale a permis de multiplier les rendements par 6 de 1968 à 1986 (CNUCED, 2010). Cependant, Lal (2000) ; Seguy *et al.* (2001) et Ouattara (2009) ont montré le rôle mitigé du labour. Seguy *et al.* (2001) ont mis en exergue des pertes annuelles dues à l'érosion de 0,25 kg ha⁻¹ de carbone dans l'horizon 0-10 cm sur les sols ferrallitiques. Lal (2000) a enregistré des pertes annuelles du carbone organique des sols de 1,8 t ha⁻¹ et de 0,7 t ha⁻¹ respectivement sous labour conventionnel et sous le non labour. Ouattara (2009) a évalué des pertes du carbone organique des sols par les labours à 9,8 t ha⁻¹ sous jachère contre 8,4 t ha⁻¹ lorsque les labours sont bisannuels.

Les sarclages des cultures sont manuels dans toutes les exploitations échantillonnées. Ils concernent les mauvaises herbes comme *Spermacoce spp.* et *Dactyloctenium aegyptium*, *Eragrotis tremula*, *Pennisetum pedicelatum* et *Commelina spp.*, très présentes avant les premiers sarclages. Celles-ci constituent un fléau dans les villages. Selon Le Bourgeois (1993), les espèces qui apparaissent avant le 1^{er} sarclage ont un effet négatif de compétition avec les

cultures. A défaut des herbicides qui ont un coût économique et environnemental, le sarclage est le principal moyen de lutte utilisé par les exploitants.

Les exploitations échantillonnées regorgent de fortes potentialités (bovins, ovins, caprins, résidus des cultures) pouvant contribuer à l'amélioration de la fertilité des sols, mais mal valorisées. Le fumier est très peu produit car les animaux sont très mobiles pendant toute la saison sèche (novembre à avril). Cette mobilité favorise le transfert de la fertilité des zones de pâturages vers les aires cultivées (Dugué, 1998a). Elle peut aussi constituer un facteur de dégradation biophysique des sols lorsque la charge animale est supérieure à 1 UBT ha⁻¹.

Les exploitants de Tala1, propriétaires de la traction animale, appliquent à l'arachide et au mil, une dose moyenne de 2160 kg ha⁻¹ de fumier tous les 3 à 4 ans. Même si cette dose peut permettre une production durable de l'arachide, elle ne l'est pas pour le mil car Berger (2006) propose une dose minimale 5 t ha⁻¹ de fumier tous les 2 à 3 ans. L'utilisation de la fumure animale n'a été observée qu'à Tala1 où toutes les terres sont saturées. Ceci conforte la thèse de Dugué (1998b) selon laquelle l'utilisation de la fumure animale par les agro-éleveurs est observée lorsqu'ils ne peuvent plus augmenter leur surface cultivée. Cet auteur a observé au Burkina Faso que malgré l'accroissement des effectifs d'animaux d'élevage dans les exploitations agricoles, les disponibilités en fumure animale traditionnelle (poudrette) ne permettent de fertiliser que 7 pc, voire au mieux 15 pc, de l'espace cultivé chaque année. Compte tenu de la faible organisation de la filière des engrais minéraux, les exploitants accèdent difficilement aux engrais spécifiques. Ils n'utilisent que l'engrais complexe NPKSB (19.12.19.5.1,2) et l'urée (46 pc d'azote) destinés à la culture cotonnière aux doses relativement faibles sur les céréales (25 à 50 kg ha⁻¹). Ces résultats corroborent ceux de Mbétid-Bessane *et al.* (2006) et IFDC (2008). De plus, les apports minéraux sont faits par les exploitants sans être associés au fumier. En conséquence, la matière organique se minéralise de manière continue et finit par tendre vers la disparition. Les ions Al³⁺, sont de plus en plus libérés dans le sol et de part leur forte liaison avec les ions H⁺ vont faire baisser le pH du sol, donc l'acidification, comme Sedogo l'a montré en 1993.

Les rendements des cultures ont varié en fonction des types d'exploitations et des sites d'étude. Les rendements de l'arachide obtenus dans toutes les exploitations propriétaires de traction animale sont plus élevés que chez les exploitations manuelles. On peut émettre l'hypothèse que le labour a amélioré la structure du sol favorable à la fixation des gousses et aussi à la gestion des eaux à la parcelle. Ce résultat corrobore ceux de Shumba (1984) et Powell *et al.* (2004) selon lesquels, la possession d'un équipement à traction animale permet d'améliorer les revenus par le labour et le transport, de réduire l'aléa climatique et alimentaire

en implantant précocement les cultures. De même, au Kenya, la traction animale a permis d'accroître les rendements et la rentabilité, notamment en réduisant le travail de désherbage (Ghutiga *et al.*, 2007).

L'étude révèle que le meilleur rendement d'arachide est obtenu par les propriétaires de traction animale à Tala1. Cette performance est non seulement liée à l'utilisation de la traction animale, mais aussi, à l'application de la fumure organique sur l'arachide.

Le meilleur rendement de sorgho est obtenu par les exploitations propriétaires de traction animale à Nguetté1. Cette performance serait liée à l'application de 50 kg ha⁻¹ de NPKSB et à la mise en place précoce du sorgho.

Les exploitations manuelles obtiennent 630 kg ha⁻¹ du mil alors que celles qui possèdent la culture attelée obtiennent 990 kg ha⁻¹, soit un écart de +330 kg ha⁻¹. Cette augmentation est liée à l'application du fumier à la culture par ces derniers. Cependant, l'analyse de variance n'a pas montré des différences significatives pour les rendements de mil obtenus par les deux types d'exploitations.

En 2008, les rendements du sorgho, de l'arachide et du mil cultivés en pur dans la zone étaient respectivement de 655; 1089 et 711 kg ha⁻¹ (DSA, 2011). Les rendements des cultures suivies sont relativement supérieurs à ceux obtenus dans la région. Cela peut s'expliquer par le fait que le dispositif mis en place a permis de mieux collecter les données car réduit à de petits espaces.

4.2.4. Caractéristiques chimiques des sols sous l'arachide, relations entre son rendement, la matière organique (MO), l'azote (N) et le phosphore (P) assimilable des sols.

Les sols de toutes les exploitations échantillonnées sont pauvres en azote car les teneurs en cet élément sont inférieures à 0,6 g kg⁻¹. .

Les teneurs en matière organique (MO) des sols cultivés en arachide sont élevées (17 g kg⁻¹) dans les exploitations de Ndaba propriétaires de la traction animale. Cela s'explique par le fait que ces exploitants ont la possibilité de pratiquer les jachères qui peuvent dans certaine mesure contribuer à remonter les teneurs en matière organique des sols. En effet, 83 pc des terres cultivables dans les exploitations de ce site, dont 63 pc de plus de 5 ans étaient en jachère pendant nos investigations. A cela il faut ajouter la faible pression foncière à cause de la reconversion de certains agriculteurs en ouvriers des sociétés pétrolières sises dans la zone. Compte tenu de la faible pression anthropique sur les ressources naturelles, on a aussi noté une présence importante des biomasses qui reste en majorité dans les sols après les récoltes si elles ne sont pas brûlées par les feux accidentels.

La faible teneur en matière organique des sols de Tala1 s'explique par la faible production de biomasse, source de matière organique des sols. A Tala1, les exploitants qui possèdent la traction animale appliquent à la culture d'arachide de la fumure organique. Cependant, les teneurs en MO de ces exploitants sont identiques à celles des sols des exploitants qui ne possèdent pas la traction animale. La dose de la fumure organique (2160 kg ha⁻¹) appliquée à l'arachide n'a pas contribué à augmenter significativement la teneur en MO.

Les teneurs en phosphore total et assimilable des sols des exploitations propriétaires de traction animale sont plus élevées que celles des sols des exploitations non propriétaires de traction animale. Cela est à mettre en relation avec la possibilité qu'ont surtout les exploitants de Ndaba et Nguetté1 de mettre en jachère leurs terres cultivables. L'amélioration significative de la teneur en P assimilable est un résultat très important pour la production agricole au niveau du sahel où le P constitue le facteur le plus limitant pour la production agricole (Lompo, 1995 ; Traoré *et al.*, 2007).

La matrice de corrélation a montré que le rendement de l'arachide a corrélié positivement et significativement avec le phosphore assimilable. Le rendement de l'arachide dépend donc de la teneur des sols en P. Ce résultat conforte celui qui a été obtenu sur les teneurs en phosphore des sols selon lequel les meilleurs rendements de l'arachide ont été obtenus sur des sols riches en P.

4.2.5. Caractéristiques chimiques des sols sous le mil, relations entre son rendement, la matière organique (MO), l'azote (N) et le phosphore (P) assimilable des sols.

Les rendements du mil obtenus par ces deux types d'exploitations sont statistiquement identiques. La matrice de corrélation a montré que le rendement du mil a corrélié positivement et significativement à la matière organique. La teneur des sols en MO des sols étudiés détermine donc le rendement du mil. Cissé et Vachaud (1988) et Sedogo (1993) ont montré que l'apport de matière organique en surface favorise en début de cycle le développement racinaire. Ceci induit une meilleure disponibilité et utilisation de l'eau et des éléments nutritifs du sol et de développement accru de la plante permettant ainsi d'améliorer la production végétale.

4.2.6. Caractéristiques chimiques des sols sous le sorgho, relations entre son rendement, la matière organique (MO), l'azote (N) et le phosphore (P) assimilable des sols

Les teneurs en matière organique des sols, l'azote, le phosphore ont été relativement faibles sous le sorgho. La matrice de corrélation obtenue à partir de l'analyse en composantes

principales a révélé des relations étroites et significatives entre le rendement du sorgho et la MO d'une part, et entre le rendement et l'azote d'autre part. La MO et l'azote sont donc les deux principaux paramètres qui déterminent le rendement de sorgho à Ndaba et Nguetté1.

Selon Pichot *et al.* (1981), la fumure organique a une action sur la germination et la vigueur au démarrage des plants. Cette vigueur au démarrage, induit un meilleur développement racinaire du sorgho et par conséquent une meilleure aptitude à s'adapter aux conditions climatiques et édaphiques aléatoires (Hien, 2004).

4.2.7. Evaluation des effets des pratiques culturales sur les sols et les rendements des cultures

4.2.7.1. Evolution des caractéristiques chimiques des sols

- **Le carbone et l'azote total**

A la 2^e année de l'étude, les teneurs des sols en matière organique et les rapports C/N ont suivi une tendance à la baisse dans tous les systèmes. Seule la teneur du carbone dans le système maïs/arachide a connu une baisse significative. Ce résultat montre que la succession culturale maïs/arachide pratiquée dans les savanes tchadiennes expose les sols à une dégradation accélérée en matière organique. Les faibles teneurs en matière organique des sols (5,9 et 8,5 g kg⁻¹) ont été déjà soulignées par Richard et Djoulet (1986). L'appauvrissement des sols en matière organique dans le système étudié est lié à l'exportation des fanes d'arachide et de la paille de maïs par les paysans comme aliment de bétail dans les exploitations. Malheureusement, ces résidus n'ont pas été retournés sous formes de fumier ou de compost dans les parcelles où ils ont été exportés. De plus, s'ils sont laissés sur place dans les parcelles, les animaux transhumants en prélèvent lors de leur passage. Ils déposent les fèces plus loin dans d'autres parcelles. Ce qui constitue un transfert horizontal de la fertilité des sols. Dans les systèmes étudiés, aucun apport organique n'a été effectué. Balesdent *et al.* (2000) ont aussi observé que de telles pratiques entraînent une baisse de -2 à -4 pc par an selon les situations agro écologiques.

- **Le phosphore des sols**

Les sols des successions culturales étudiés sont particulièrement pauvres en phosphore. Les faibles teneurs en ces éléments seraient liées aux mauvaises pratiques culturales tels que les brûlis des résidus de récolte, le faible apport d'engrais organiques et minéraux, les exportations des résidus des récoltes sans une fertilisation phosphorique conséquente mais

aussi à l'érosion hydrique. Corrélativement à la baisse de la matière organique qui a été observée dans le système arachide/maïs, l'analyse de variance a révélé que la teneur en P du sol de ce système a aussi baissé significativement à la 2^e année de l'étude. Lompo (2008) a déjà montré que lorsque les résidus des cultures sont très peu restitués au sol, on assiste inévitablement à une baisse de la matière organique des sols, et par conséquent la baisse du phosphore des sols. Plusieurs auteurs (Berger *et al.*, 1987; Bationo et Mokwunye, 1991; Sedogo, 1993; Bado *et al.*, 1997 ; Abdoulaye *et al.*, 2006) ont montré que la mise en culture des terres diminue systématiquement la MO du sol et des rendements (Bado, 2002).

4.2.7.2. Le fractionnement granulométrique de la matière organique du sol

Le fractionnement granulométrique a montré que la matière organique des sols de tous les systèmes étudiés se retrouve principalement dans la fraction liée aux particules argilo-limoneuses (<50 µm). Ces résultats corroborent ceux de Christensen (2001) en zone tempérée. Les mêmes observations ont été faites par Nacro *et al.* (1996) pour des sols de Côte d'Ivoire, et par Pallo *et al.* (2009) au Burkina Faso. Dans la fraction argilo-limoneuse, l'analyse de variance a montré des différences significatives au seuil de probabilité de $p < 0,05$. Le test de Duncan ($p < 0,05$) a montré que le carbone (C) du sol du système maïs/arachide est statistiquement supérieur au C des autres systèmes. Le C de la fraction argilo-limoneuse du système arachide/maïs est donc moins sujet à la dégradation.

Qu'il s'agisse des teneurs en carbone ou en azote des sols contenues dans les trois fractions des sols d'une même succession culturale, les teneurs en ces éléments dans la fraction argilo-limoneuse ont été statistiquement supérieures à celles des fractions de sables fins (50-200) et grossiers (200-2000). Ouattara, (1990), Sedogo (1993), Segda (2006), Pallo *et al.* (2009) ont aussi montré que lorsqu'un sol est mis en culture, le carbone lié fraction grossière baisse au profit de fraction fine.

Les rapports C/N augmentent de la fraction fine à la fraction sableuse dans le système maïs/arachide. Christensen (2001) et Pallo *et al.* (2009) ont montré que le rapport C/N de la matière organique associée aux différentes fractions baisse avec la taille de ces dernières. Cette diminution serait indicatrice d'une augmentation du degré d'humification des produits organiques avec la finesse de la tailles des particules (Guggenberger *et al.*, 1994 ; Nacro *et al.*, 1996). Elle serait aussi liée à une décroissance significative des phénols dérivés de la lignine des fractions grossières aux fractions fines (Amelung *et al.*, 1999). Les résultats obtenus au niveau du système maïs/arachide concordent avec ces données. En effet, les rapports C/N de la

fraction F (0 -50 μm) sont généralement plus faibles que ceux de la matière organique qui se trouvent dans les fractions sableuses. Ceci serait dû à la nature des matières organiques associées à cette fraction argilo-limoneuse : association de débris de parois végétales ou fongiques et de micro-agrégats organo-limoneux dans la fraction (2 -20 μm), dominance des matières organiques à caractère amorphe dans les fractions argileuses (Feller, 1995). Si une telle décroissance du rapport C/N de la fraction F (200 -2 000 μm) à la fraction F (0 -50 μm) a été observée dans les sols du système maïs/arachide, c'est le phénomène inverse qui est observé dans ceux des systèmes coton/sorgho et sorgho/coton. Ce résultat suggère que les sols de ces systèmes contiendraient très peu d'azote et de la matière organique ou que les processus microbiens de transformation de la matière organique sont moindres.

4.2.7.3. Performances agronomiques des systèmes étudiés

Les apports organiques sont quasiment négligés par la plupart des producteurs. Or, ils sont une alternative pour l'amélioration ou le maintien de la fertilité des sols eu égard aux prix des engrais et leur indisponibilité. Les exploitations regorgent de potentialités mais le faible niveau d'équipement ne leur permet pas de produire le fumier ou le compost pour maintenir ou améliorer la fertilité des sols. Les doses appliquées aux cultures qui varient entre 140 à 280 kg ha^{-1} ne permettent pas d'assurer la durabilité des systèmes de cultures identifiés actuels. En effet, pour assurer une production durable, la dose minimale de fumier à apporter tous les 2 à 3 ans est de 5 t ha^{-1} (Berger, 2006).

En dehors de la CotonTchad qui fournit aux cotonculteurs à crédit les engrais minéraux, la filière engrais est quasiment inexistante au Tchad. Ceci rend pratiquement impossible l'application d'engrais minéraux sur les céréales. Les engrais minéraux sont souvent appliqués aux cultures sans le fumier. Cette pratique rend acides les sols dans la mesure où l'engrais n'est pas associé à la fumure organique (Sedogo, 1993 ; Koulibaly, 2011).

Ces pratiques ont toutefois permis aux exploitants d'obtenir des rendements bien meilleurs que ceux obtenus dans la région pendant les mêmes campagnes agricoles. En effet pendant l'année 2007, les rendements des cultures sont de 746 kg ha^{-1} pour le coton, 965 kg ha^{-1} pour l'arachide, 760 kg ha^{-1} pour le sorgho et de 834 kg ha^{-1} pour le maïs. Cela peut s'expliquer par le dispositif de suivi mis en place et qui a permis de mieux collecter les données car réduit à de petits espaces. Toutefois, une baisse relative des rendements des cultures suivies a été observée entre la 1^{re} et la 2^e année de l'étude. Celle-ci n'est pas uniquement due aux pratiques agricoles paysannes peu adaptées à la conservation de la fertilité des sols, mais aussi, à l'arrêt précoce des pluies.

Conclusion partielle

L'étude a montré que la fertilité chimique des sols a varié en fonction des pratiques culturales des exploitants. Chez les exploitants propriétaires de traction animale où les jachères occupent 83 pc des terres cultivables, les teneurs en P des sols sont plus élevées que celles des autres types d'exploitations. Les rendements en arachide qu'ils ont obtenus ont été également plus élevés.

Le test de corrélation a montré que la matière organique a corrélé significativement aux rendements du sorgho et du mil, alors que le P a corrélé significativement à l'arachide. Le P aurait déterminé le rendement de l'arachide et la matière organique ceux du mil et du sorgho. Sachant que les sols des savanes tchadiennes sont relativement pauvres en P et en MO, toute intervention en vue d'améliorer la productivité du mil, du sorgho et de l'arachide doit particulièrement contribuer à remonter leurs teneurs des sols en ces éléments.

Les pratiques culturales paysannes se caractérisent par de faibles apports organo-minéraux et une baisse du pH et de la MO des sols de la plupart des systèmes de culture étudiés. En outre, ils ne compensent pas les exportations hors des parcelles des éléments nutritifs des sols car les teneurs en éléments minéraux ont aussi baissé. En conséquence, les pratiques culturales rendent fragiles les systèmes de production.

Pour rendre plus durables et économiquement rentables les systèmes de production actuels, il serait alors intéressant d'améliorer la qualité des fumures organique et des pratiques de fertilisation par :

- l'amélioration des modalités d'acquisition des équipements agricoles pour faciliter le transport des produits agricoles, les engrais et surtout les résidus des récoltes en vue de les transformer en fumier et/ou compost de meilleure qualité;*

- la formation et la sensibilisation des producteurs à l'intensification des cultures par l'utilisation des bonnes pratiques agricoles telles que l'adjonction des engrais et du fumier, l'application aux cultures des doses d'engrais organiques et minéraux vulgarisés, la pratique des jachères améliorées et le respect des itinéraires techniques*

CHAPITRE V. EVALUATION DES EFFETS DES FUMURES ET DES MODES DE GESTION DES RESIDUS DES RECOLTES SUR LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DES SOLS

5.1. Résultats

5.1.1. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des récoltes sur les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols

5.1.1.1. Bilans minéraux

Ces bilans portent sur le phosphore (P) et l'azote (N) totaux. Ils ont été établis de façon théorique sur les 3 années d'étude. Ils ont été établis sur la base des exportations de l'N et du P faites par le mil et l'arachide à partir des biomasses produites.

- **Bilan de l'azote (N)**

L'évolution de la teneur globale de l'azote du sol a varié en fonction des traitements. L'analyse de variance a révélé des effets de fumures et résidus des cultures sur la production des biomasses et des exportations de l'azote dans les traitements étudiés (Annexe 11). Cependant, l'interaction entre les modes de gestion des fumures et résidus des cultures n'est pas significative (Tableau XV). Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a montré que la production la plus élevée est obtenue avec le traitement Fom (5 t ha^{-1} fumier/2 ans + 50 kg ha^{-1} NPKSB + 50 kg ha^{-1} urée). La production en biomasse de ce traitement est aussi statistiquement supérieure à celles des traitements témoin et Fmc (50 kg ha^{-1} NPKSB). Les exportations de l'N des sols liées à la production de ces biomasses suivent pratiquement la même tendance. L'analyse de variance a aussi révélé que les exportations de N dans les traitements étudiés ont été significatives. Le Test de Newman Keuls ($p < 0,05$) révèle que, la plus faible exportation en N a été observée sur le traitement témoin et celle qui est la plus élevée a été observée sur le traitement Fom. Les apports en N sont évalués à partir des engrais minéraux (NPKSB : 19.12.19.5.1,2 ; urée : 46pc N), du fumier de parc ($5 \text{ t ha}^{-1}/2\text{ans}$) appliqués aux traitements et des pluies. S'agissant de l'apport de l'N à partir des pluies, des quantités moyennes de $5 \text{ kg ha}^{-1}/\text{an}$ ont été obtenues par Rose (1981) sur les essais de longue durée à Saria. L'ensemble de ces apports varie selon les traitements étudiés entre 15 et $112,5 \text{ N kg ha}^{-1}$.

Tableau XV. Bilan théorique de l’N sur l’essai rotation mil/arachide/mil (2008-2010)

Fumure	Biomasse (sorgho, mil, arachide)	N exporté	Apport N				Bilan théorique
			Engrais	Fumier	Pluies	Total	
			kg ha ⁻¹				
Fm	3572 ab	119,4 ab	97,5	0	15	112,5	-6,9
Fmc	3159 b	110,6 ab	28,5	0	15	43,5	-67,1
Fo	3478 ab	118,0 ab	0	50	15	65,0	-53,0
Fom	3749 a	129,4 a	97,5	50	15	162,5	+33,1
T	2709 c	96,6 b	0	0	15	15,0	- 81,6
Fumure	**	**	-	-	-	-	-
Résidu	**	**	-	-	-	-	-
Fumure x Résidu	ns	ns	-	-	-	-	-

Légende. Fm (50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée), Fmc (50 kg ha⁻¹ NPKSB), Fo (5 t ha⁻¹ fumier/2 ans), Fom (Fo + Fm), T (témoin), ** test significatif au seuil de probabilité de 0,05 et 0,01 ; ns : test non significatif ; - test non applicable ; les chiffres suivis de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différent au seuil de $p < 0.05$ selon le test de Newman Keuls.

Dans le traitement organo-minéral (Fom) où ont été appliqués les engrais minéraux et le fumier, le bilan a été positif à la 3^e année de l’étude, alors que dans le traitement témoin (T), le bilan a été largement négatif car le seul apport provient des pluies. Dans le traitement avec la fumure minérale (Fm) composée de NPKSB et de l’urée, le bilan est négatif. Toutefois, il est relativement faible comparativement aux teneurs d’N des traitements dont les bilans sont négatifs. Dans le traitement avec fumure minérale (Fmc) composé uniquement de NPKSB, le bilan est aussi relativement élevé. Les seuls apports dus aux pluies et cet engrais ne permettent pas de compenser les exportations. Le bilan du traitement avec le fumier (Fo) est quasiment le même que celui du Fmc.

L’analyse de variance de l’N exporté dans les traitements en 2008 et 2010 montre des différences significatives (Annexe 12). Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé que l’N a été plus exporté dans le traitement Fom (Tableau XVI). Les exportations de l’N dans les traitements Fmc, Fm et Fo ont été statistiquement identiques. La plus faible exportation a été observée dans le traitement témoin.

Tableau XVI. Evolution des quantités de l'N exportées (kg ha⁻¹) par le mil.

Type de fumure	Quantité exportée	Quantité exportée	Comparaison entre 2008 et 2010 de N exporté
	en 2008	en 2010	
	kg N ha ⁻¹		
Fm	30,9±9 ab	28,9±8 ab	ns
Fmc	29,1±13 ab	23,7±9 bc	ns
Fo	27,8±10 ab	27,2±11 ab	ns
Fom	32,9±10 a	30,9±9 a	ns
T	22,9±9 b	20,9±7 c	ns
a.	21,4±5 b	19,9±6,7 b	ns
b.	33,6±11 a	30,9±11 a	ns
c.	23,6±6,8 b	17,5±6 b	ns
e.	36,4±11 a	32, ±13 a	ns
Fumure	**	**	-
Résidu	**	**	-
Fumure x Résidu	ns	ns	-

Légende. Fm (50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée), Fmc (50 kg ha⁻¹ NPKSB), Fo (5 t ha⁻¹ fumier/2 ans), Fom (Fo + Fm), T (témoin), ** test significatif au seuil de probabilité de 0,05 et 0,01 ; ns (colonne) : test non significatif ; ns (ligne) : les chiffres de 2008 et 2010 ne sont pas significativement différents ; - test non applicable ; les chiffres suivis de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$ selon le test de Newman Keuls.

Les teneurs en azote du sol exportées varient selon le mode gestion des résidus. Pendant les années 2008 et 2010, les exportations les plus importantes ont été observées sur les résidus exportés (e) et brûlés (b). L'analyse de variance a montré qu'il n'existe pas d'interaction entre les modes de gestion des fumures et des résidus. Elle a révélé également que les teneurs en azote exportées dans les traitements principaux en 2008 et 2010 ne sont significativement différentes.

• Bilan du phosphore (P)

L'analyse de variance des exportations de P dans les biomasses produites dans les traitements étudiés montre des différences significatives (Annexe 11). Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé que la teneur en P la plus élevée et la plus faible ont été observées respectivement dans les traitements Fom et témoin. Les apports ont été essentiellement faits sous formes d'engrais minéraux et de fumier (Tableau XVII). Le bilan du P a été négatif dans

tous les traitements. Cependant, son importance a varié en fonction des traitements étudiés. Dans le traitement organo-minérale (Fom), le bilan a été aussi négatif mais de faible importance. C'est dans le traitement témoin où le bilan négatif en P est plus important.

Tableau XVII. Bilan théorique de P sur l'essai rotation mil/arachide/mil (2008-2010)

Fumure	Biomasse (sorgho, mil, arachide)	Exportation P	Apport P			Bilan théorique P
			Engrais	Fumier	Total	
			kg ha ⁻¹			
Fm	3572 ab	31,6 ab	18	0	18,0	-13,6
Fmc	3159 b	28,5 b	18	0	18,0	-10,5
Fo	3478 ab	30,3 ab	0	13,1	13,1	-17,2
Fom	3749 a	34,1 a	18	13,1	31,1	-3,0
T	2709 c	24,5 c	0	0	0	-24,5
Fumure	**	**	-	-	-	-
Résidu	*	**	-	-	-	-
Fumure x Résidu	ns	ns	-	-	-	-

Légende. Fm (50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée), Fmc (50 kg ha⁻¹ NPKSB), Fo (5 t ha⁻¹ fumier/2 ans), Fom (Fo + Fm), T (témoin), ** test significatif au seuil de probabilité de 0,05 et 0,01 ; * test significatif au seuil de probabilité de 0,05 ; ns : test non significatif ; - test non applicable ; les chiffres suivis de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différents au seuil de p<0,05 selon le test de Newman Keuls.

Sous la culture du mil, l'analyse de variance a montré des différences significatives pour les teneurs en P exporté dans les différents traitements en 2008 (Annexe 13). Le test de Newman Keuls (p<0,05) a révélé que le P a été plus exporté dans les traitements Fom et Fm (Tableau XVIII). Les exportations de P dans les traitements Fmc et Fo ont été statistiquement identiques. La plus faible exportation a été observée dans le traitement témoin. Sur la 4^e colonne sont comparées les exportations de P de chaque traitement entre 2008 et 2010. L'analyse de variance n'a pas montré des différences significatives pour les teneurs en P exportées en 2008 et 2010.

Les modes de gestion des résidus influencent également sur les teneurs en phosphore des sols exportées. En effet, elles sont particulièrement plus élevées lorsque les résidus des récoltes sont brûlés ou exportés et ce, pendant les années 2008 et 2010. Cependant, par rapport aux exportations des sols de cet élément, il n'y a pas d'interaction entre les modes de gestion des fumures et des résidus des cultures.

Tableau XVIII. Evolution des quantités de P exporté par le mil en 2008 et 2010

Type de fumure	Quantité exportée en 2008	Quantité exportée en 2010	Comparaison entre 2008 et 2010 du P exporté
	kg ha ⁻¹		
Fm	10,8±3 a	10±2 ab	ns
Fmc	10±4 ab	8,2±3 bc	ns
Fo	9,6±3 ab	9,4±4 ab	ns
Fom	11,4±3 a	10,7±3 a	ns
T	8±3 b	7,2±2 c	ns
a.	7,8±2 b	6,8±2 b	ns
b.	11,2±4 a	10,6±3 a	ns
c.	8,6±3 b	7,9±2 b	ns
e	12,4±4 a	11,1±3 a	ns
Fumure	**	**	-
Résidu	**	**	-
Fumure x Résidu	ns	ns	-

Légende. Fm (50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée), Fmc (50 kg ha⁻¹ NPKSB), Fo (5 t ha⁻¹ fumier/2 ans), Fom (Fo + Fm), T (témoin), ** test significatif au seuil de probabilité de 0,05 et 0,01 ; ns (colonne) : test non significatif ; ns (ligne) : les chiffres de 2008 et 2010 ne sont pas significativement différents ; - test non applicable ; les chiffres suivis de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différent au seuil de $p < 0,05$ selon le test de Newman Keuls.

En 2010, le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé que les exportations du P ont été également plus élevées dans le traitement Fom. Les exportations observées dans les traitements Fo et Fm ont été statistiquement identiques et supérieures au traitement témoin. Contrairement à l'année 2008, une exportation relativement faible a été observée dans le traitement Fmc.

5.1.1.2. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des récoltes sur la matière organique (MO) et l'azote (N) des sols

Le terrain sur le lequel a été implanté l'essai est relativement hétérogène par rapport à la teneur des sols en matière organique (MO). L'analyse de variance a révélé des différences significatives pour les teneurs en matière organique des sols (MOS) au début (2008) et à la fin (2010) des expériences (Annexe 14). Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé qu'en 2008, la teneur en MOS du traitement avec engrais minéral (Fmc) a été la plus élevée (Tableau

XIX). La plus faible teneur en MOS a été observée dans la parcelle ayant reçu le traitement avec fumure organo-minérale (Fom). En 2010, la teneur en MO des sols du traitement Fmc a été également la plus élevée, alors que celle du traitement témoin (T) a été la plus faible. Pour les teneurs en azote et les rapports C/N des sols des traitements étudiés, l'analyse de variance n'a pas montré des différences significatives.

Tableau XIX. Evolution de la matière organique (MO), de l'azote (N) total des sols entre 2008 et 2010.

Type de fumure	MO		N total		C/N	
	2008	2010	2008	2010	2008	2010
	g kg ⁻¹					
Fm	9,9±0,7 c	7,7±3,0 ab	0,9±0,3	0,6±0,1	9,9	9,6 bc
Fmc	12,5±1,3 a	10,3±4,8 a	0,8±0,4	0,7±0,1	11,5	11,1 ab
Fo	11,3±1,9 b	9,1±2,9 ab	0,8±0,3	0,6±0,1	9,9	8,8 c
Fom	7,9±1,5 d	7,3±1,5 ab	0,6±0,3	0,6±0,0	9,3	11,7 a
T	9,0±1,3 cd	6,7±2,0 b	0,9±0,3	0,6±0,1	10,3	10,9 ab
a.	10,6±2	9,8±4,8	0,6±0,3	0,7±0,2	12,2	10,1
b.	10,5±1,8	8,0±3,1	0,9±0,9	0,7±0,1	10,4	10,4
c.	9,7±2,1	7,0±2,6	0,7±0,2	0,7±0,1	8,7	11,2
e.	9,8±2,6	8,2±3,3	0,9±0,8	0,6±0,1	9,3	10,1
Fumure	**	*	ns	ns	ns	**
Résidu	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Fumure x Résidu	*	ns	ns	ns	ns	*

Légende. Fm (50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée), Fmc (50 kg ha⁻¹ NPKSB), Fo (5 t ha⁻¹ fumier/2 ans), Fom (Fo + Fm), T (témoin) ; a, b, c, e : résidus laissés sur place (a), brûlés (b), compostés (c) et exportés (e) ; ** test significatif au seuil de probabilité de 0,05 et 0,01 ; * test significatif au seuil de probabilité de 0,05 ; ns : test non significatif ; les chiffres suivis de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différent au seuil de p<0,05 selon le test de Newman Keuls.

Malgré l'application des fumures organiques et minérales, les teneurs en MOS ont sensiblement baissé après la mise en culture des parcelles. Cependant, l'importance de la baisse des teneurs en ces éléments varie en fonction du type de fumure appliquée. L'analyse de variance a montré des différences significatives pour les teneurs en MOS des traitements entre 2008 et 2010. Le test de Newman Keuls (p<0,05) a révélé que les teneurs en MOS des traitements Fm (NPKSB +urée) et témoin (T) ont baissé significativement entre 2008 et 2010. En effet, dans les traitements Fm et T des baisses respectives de 8 et 7 pc de MOS par an ont été observées.

Pour les teneurs en azote et les rapports C/N de chaque traitement étudié entre 2008 et 2010, l'analyse de variance n'a pas révélé des différences significatives.

Les modes de gestion des résidus des cultures (compostés, exportés, laissés sur place et brûlés) n'ont pas influencé significativement sur les propriétés chimiques des sols (Annexe 15). Toutefois, l'interaction entre les modes de gestion des résidus des cultures et des fumures est significative au seuil de probabilité de 0,05.

5.1.1.3. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des récoltes sur le phosphore assimilable

Avant la mise en place de l'essai, l'analyse de variance des teneurs en P assimilable a montré des différences significatives (Annexe 14). Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé que le traitement Fmc a une teneur en P assimilable plus élevée (Tableau XX). Puis, suivent respectivement celles des traitements Fo et T statistiquement identiques et supérieures à celles des traitements Fom et Fm statistiquement identiques entre elles.

Tableau XX. Evolution du phosphore (P) assimilable sols entre 2008 et 2010.

Type de fumure	P assimilable (mg P kg ⁻¹)		Comparaison entre 2008 et 2010 P assimilable
	2008	2010	
Fm	33,8±5 c	31,5±6,2 c	ns
Fmc	49,5±3 a	46,8±4,6 a	ns
Fo	43,9±5 b	43,5±14 a	ns
Fom	36,1±8 c	34,4±4,7 bc	ns
T	45,8±4 b	40,4±3,9 ab	s
a.	43,2±7	42,5±10	ns
b.	41,2±8	36,7±8	ns
c.	40,4±8	38,3±8	ns
e.	42,4±8	39,9±11	ns
Fumure	**	**	-
Résidu	ns	ns	-
Fumure x Résidu	**	ns	-

Légende. Fm (50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée), Fmc (50 kg ha⁻¹ NPKSB), Fo (5 t ha⁻¹ fumier/2 ans), Fom (Fo + Fm), T (témoin) ; a, b, c, e : résidus laissés sur place (a), brûlés (b), compostés (c) et exportés (e) ; ** test significatif au seuil de probabilité de 0,05 et 0,01 ; ns : test non significatif ; les chiffres suivis de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0,05$ selon le test de Newman Keuls.

En 2010, l'analyse de variance a montré des différences significatives pour le P assimilable des traitements Fmc et Fo. Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a montré que les teneurs en P assimilable dans les traitements Fmc et Fo ont été statistiquement identiques et supérieures à celles des autres traitements.

La 4^e colonne du Tableau ci-dessus compare les moyennes des teneurs en P assimilable des années 2008 et 2010 de chaque traitement. Ainsi, le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé que la teneur en P assimilable du traitement témoin (T) de l'année 2010 est plus faible que celle de l'année 2008. En conséquence, la baisse de la teneur en P assimilable de ce traitement entre 2008 et 2010 qui a été de 4 pc an⁻¹ est significative. Dans les autres traitements, les teneurs en P assimilable des années 2008 et 2010 ont été statistiquement identiques.

Les modes de gestion des résidus n'ont pas influencé significativement les teneurs en phosphore des sols du début à la fin de l'étude. Cependant, on note une interaction entre les fumures et les modes de gestion des résidus des cultures.

5.1.1.4. Effets des fumures et des résidus des récoltes sur le complexe absorbant

- **Effets des fumures sur le complexe absorbant**

Au début de l'étude en 2008, les moyennes de la CEC et de la somme des bases échangeables des sols étudiés a été de 5,3 et 2,7 Cmol kg⁻¹ respectivement. En 2010, l'analyse de variance n'a pas révélé des différences significatives pour la CEC (Annexe 15). Cependant, elle a été significative pour la somme des bases échangeables de la même année. Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé que la somme des bases échangeables des traitements Fom et Fo ont été statistiquement identiques et supérieures à celles du traitement témoin (Tableau XXI). En ce qui concerne les modes de gestion des résidus des cultures, l'analyse de variance n'a pas révélé des différences significatives pour tous les paramètres chimiques analysés. Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé que la CEC du traitement témoin en 2008 est statistiquement supérieure à celle de l'année 2010. La baisse de 6 pc de la CEC observée entre ces périodes d'expérimentation est donc significative.

Tableau XXI. Evolution du complexe absorbant des sols entre 2008 et 2010.

Type de fumure	CEC		S (Mg ²⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺)		V
	Cmol kg ⁻¹				Pc
	2008	2010	2008	2010	2010
Fm	5,3	5,9	2,7	2,4 ab	42
Fmc	5,3	5,3	2,7	2,3 ab	44
Fo	5,3	5,6	2,7	2,6 a	48
Fom	5,3	5,3	2,7	2,8 a	55
T	5,3	5,0	2,7	2,1 b	43
a.	5,3	5,6	2,7	2,3	50
b.	5,3	5,4	2,7	2,6	49
c.	5,3	5,4	2,7	2,6	50
e.	5,3	5,4	2,7	2,2	49
Fumure	-	ns	-	**	ns
Résidu	-	ns	-	ns	ns
Fumure x Résidu	-	ns	-	ns	ns

Légende. Fm (50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée), Fmc (50 kg ha⁻¹ NPKSB), Fo (5 t ha⁻¹ fumier/2 ans), Fom (Fo + Fm), T (témoin) ; a, b, c, e : résidus laissés sur place (a), brûlés (b), compostés (c) et exportés (e) ; ** test significatif au seuil de probabilité de 0,05 et 0,01 ; ns : test non significatif ; - test non applicable ; les chiffres suivis de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différents au seuil de p<0,05 selon le test de Newman Keuls.

L'analyse de variance des taux de saturation n'a pas montré des différences significatives pour tous les traitements étudiés dans la même année et entre les années pour un même traitement.

Sur le tableau ci-dessus, on observe une baisse tendancielle de la CEC et de la somme des bases échangeables entre 2008 et 2010 dans les traitements étudiés, mais l'analyse de variance n'a montré des différences significatives que pour la somme des bases échangeables du traitement résidus exportés (e). Le test de Newman Keuls (p<0,05) a révélé que la somme des bases échangeable de ce traitement de l'année 2008 a été statistiquement supérieure à celle de l'année 2010. La baisse de 19 pc de la somme des bases échangeables de ce traitement observée entre 2008 et 2010 est donc significative.

5.1.1.5. Effets des fumures sur la répartition de la matière organique dans les fractions granulométriques des sols

Les analyses faites dans les chapitres précédents ont montré que la productivité des sols dépendait largement des teneurs des sols en matière organique. Le fractionnement granulométrique du sol permet l'accès à des fractions de matières organiques de natures différentes qui ont une signification fonctionnelle en terme d'effet sur les propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols. Il consiste à évaluer les stocks de carbone et d'azote organique associés aux différentes fractions granulométriques du sol.

- **Bilan du fractionnement**

Les proportions du carbone varient entre 80 et 98 pc par rapport au sol non fractionné. Ces teneurs en carbone varient en fonction des fractions des sols et des traitements étudiés.

- **Effets des fumures sur la répartition du carbone total dans les fractions des sols**

Quel que soit le traitement étudié, les fractions fines F_0 contiennent des teneurs plus élevées en carbone (C) total. Les répartitions du C total dans les différentes fractions sont fonction des traitements étudiés (Tableau XXII).

Tableau XXII. Contribution des fractions granulométriques du C dans l'horizon 0–20 cm

Type de fumure	F_0	F_{50}	F_{200}
	g C kg ⁻¹ de sol		
Fm (50 kg ha ⁻¹ NPKSB + 50 kg ha ⁻¹ urée)	3,12±0,44 c	0,15±0,03	0,29±0,04
Fmc (50 kg ha ⁻¹ NPKSB)	3,27±0,17 c	0,16±0,01	0,36±0,06
Fo (5 t ha ⁻¹ fumier/2 ans)	4,37±0,94 b	0,17±0,15	0,38±0,21
Fom (Fo + Fm)	5,35±0,70 a	0,25±0,04	0,36±0,10
T (témoin)	3,45±0,30 c	0,13±0,05	0,23±0,06
Signification (p<0,05)	s	ns	ns
Coefficient de variation (pc)	25	46	35

Légende. Les moyennes suivies d'une même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls ($p<0,05$).

L'analyse de variance a montré des différences significatives pour les teneurs en carbone liées à la fraction fine (F_0) des différentes fractions étudiées. Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé que la teneur en C liée à la fraction fine (F_0) du traitement Fom est statistiquement supérieure à celle du traitement Fo qui contient lui-même une teneur en carbone statistiquement supérieure à celles des traitements Fmc, Fm et T avec des teneurs en C

statistiquement identiques. Dans les fractions de sables fins et grossiers, l'analyse de variance des teneurs en C n'a pas montré des différences significatives.

- **Coefficients d'enrichissement en carbone (E_C) dans les fractions des sols.**

Le Tableau XXIII montre que le coefficient d'enrichissement en carbone (E_C) varie selon les fractions des sols des traitements étudiés. L'analyse de variance a révélé des différences significatives pour les coefficients d'enrichissement des fractions fines et de sable grossiers des traitements étudiés.

Tableau XXIII. Coefficients d'enrichissement en carbone (E_C) en fonction des traitements

Type de fumure	F ₀	F ₅₀	F ₂₀₀
Fm (50 kg ha ⁻¹ NPKSB + 50 kg ha ⁻¹ urée)	4,88±0,44 ab	0,20±0,04	0,09±0,03 b
Fmc (50 kg ha ⁻¹ NPKSB)	4,49±0,19 ab	0,23±0,10	0,07±0,04 b
Fo (5 t ha ⁻¹ fumier/2 ans)	4,98±0,45 ab	0,24±0,05	0,13±0,02 a
Fom (Fo + Fm)	5,21±0,42 a	0,22±0,02	0,11±0,01 ab
T (témoin)	4,22±0,47 b	0,19±0,06	0,08±0,02 b
Signification (p<0,05)	s	ns	s
Coefficient de variation (pc)	11	27	30

Légende. ns : test non significatif; s : test significatif. Les moyennes suivies de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls (p<0,05).

Les coefficients d'enrichissement en carbone (E_C) des sols associés la fraction fine F₀ sont relativement plus élevés que ceux associés aux fractions de sables fines F₅₀ et grossières F₂₀₀. Le test de Newman Keuls (p<0,05) a révélé que le coefficient d'enrichissement en C de la fraction F₀ du traitement Fom est le plus élevé. Dans la même fraction, le coefficient d'enrichissement en C le plus faible a été observé dans le traitement.

5.1.1.6. Effets des fumures sur la minéralisation du carbone

La plupart des transformations d'intérêt agronomique dans le sol sont d'origine biochimique. La nutrition des plantes dépend des réactions biochimiques. En effet, les microorganismes, loin d'être répartis de manière homogène dans le sol, constituent une composante de la rhizosphère. C'est à ce niveau qu'ont lieu les échanges entre les matières organiques et minérales du sol et la plante. La connaissance de l'activité biologique d'un sol permet donc d'approcher la dynamique d'évolution du sol et les capacités d'échanges entre le sol et la plante.

- **Dégagement du gaz carbonique des sols**

On constate que le CO₂ dégagé par jour a atteint une valeur maximale dès le premier jour d'incubation (Figure 22). Il s'en est suivi d'une diminution progressive de CO₂ entre le 2^e et le 4^e jour, puis une reprise de dégagement de CO₂ importante entre le 4^e et le 5^e jour. Entre le 1^{er} et le 5^e jour, il été constaté des pics variables selon les traitements.

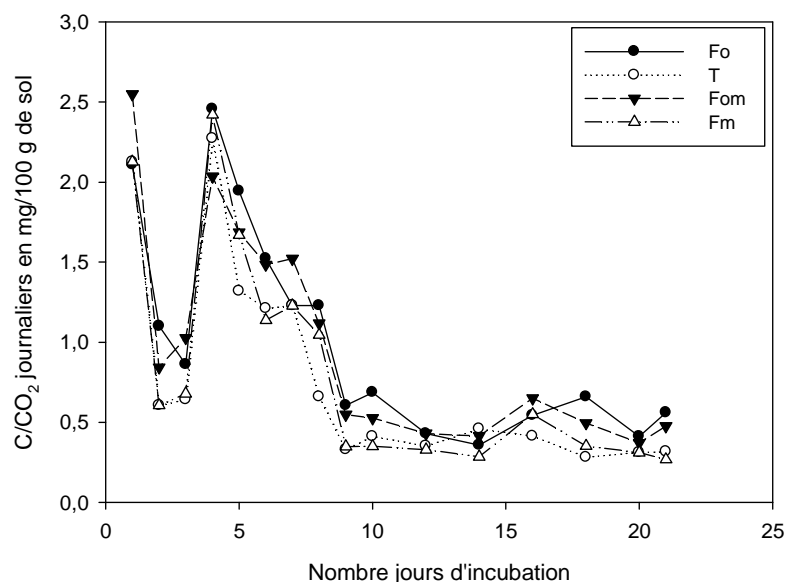


Figure 22. Quantités de CO₂ dégagées par jour (sol prélevé après récolte en 2010)

Les valeurs de CO₂ obtenues le 1^{er} jour d'incubation avec Fom, Fo, Fm et T ont été respectivement de 2,54 ; 2,11 ; 2,22 et 2,12 mg/100 g de sol. Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) n'a pas révélé des différences significatives entre ces valeurs.

Les dégagements du CO₂ suivent une évolution exponentielle avec tous les traitements étudiés (Figure 23). Les cumuls des dégagements de CO₂ obtenus après les 21 jours d'incubation ont été de 20,68 ; 24,4 ; 23,21 et 20,8 mg C/CO₂/100 g de sols pour Fm, Fo, Fom et T respectivement.

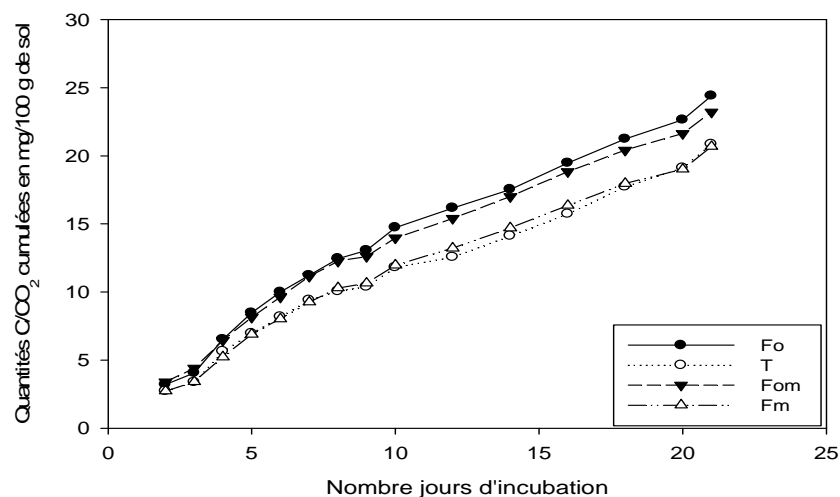


Figure 23. Quantités cumulées de C/CO₂ dégagées par le sol prélevé après récolte

Les cumuls des dégagements du CO₂ obtenus avec Fom et Fo ont été statistiquement identiques et supérieurs à ceux obtenus avec Fm et T identiques entre eux (test de Newman Keuls, $p < 0,05$).

- **Les coefficients de minéralisation du carbone (C-CO₂/C)**

Le calcul des coefficients de minéralisation du carbone dans chaque traitement a permis de mieux apprécier le potentiel de minéralisation des composés organiques (Tableau XXIV).

$$\text{C-CO}_2/\text{C} = \frac{\text{C-CO}_2 \text{ (mg/100 g de sol)} \times 100}{\text{C total 100 g de sol}}$$

Où C - CO, représente la quantité exprimée en mg de carbone d e gaz carbonique dégagé en sept jours pour un échantillon de 100 g de sol et C total le carbone total déterminé dans chaque échantillon exprimé également en mg pour 100 g de sol.

Tableau XXIV. Les coefficients de minéralisation du carbone (C-CO₂/C)

Type de fumure	C-CO ₂ /C	pH eau
Fm (50 kg ha ⁻¹ NPKSB + 50 kg ha ⁻¹ urée)	0,8±0,21 b	5,7
Fo (5 t ha ⁻¹ /2 ans)	1,3±0,30 a	6,1
Fom (Fo + Fm)	1,4±0,43 a	6,0
T (Témoin)	0,6±0,19 b	5,8
Signification ($p < 0,05$)	s	-
Coefficient de Variation (pc)	41	-

Légende. s : test significatif. Les moyennes des coefficients de minéralisation suivies de la même lettre dans la colonne ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls ($p < 0,05$).

Le test de Newman Keuls appliqué aux coefficients de minéralisation déterminés avec les traitements étudiés est significatif ($p < 0,05$). Les coefficients de minéralisation des traitements Fom et Fo sont statistiquement identiques et supérieurs à ceux des traitements Fm et T.

5.1.1.7. Effets des fumures sur la biomasse microbienne des sols

La biomasse microbienne est une mesure globale représentant la quantité de carbone « vivant » dans le sol. Dans le cadre de cette étude, il constitue un indicateur qui a permis d'apprécier l'état de la fertilité des sols mise en culture. Les résultats des analyses rapportés dans le Tableau XXV.

Tableau XXV. Le carbone de la biomasse microbienne (CBM) en 2009 et 2010 (Cmg kg^{-1})

Type de fumure	CBM en 2009	CBM en 2010	Comparaison entre 2009 et 2010 de CBM
Fm (50 kg ha^{-1} NPKSB + 50 kg ha^{-1} urée)	18,6±4,3	13,2±1,5 b	ns
Fmc (50 kg ha^{-1} NPKSB)	16,3±3,9	13,1±2,7 b	ns
Fo (5 t ha^{-1} / 2 ans)	16,7±3,3	16,9±4,1 ab	ns
Fom (Fo + Fm)	20,1±7,7	21,2±6,0 a	ns
T (Témoin)	14,2±4,0	10,2±3,0 b	ns
Signification ($p < 0,05$)	ns	s	-
Coefficient de Variation (pc)	28	34	-

Légende. ns : test non significatif; s : test significatif. Les moyennes suivies de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls ($p < 0,05$).

En 2009, le CBM des sols dans les différents traitements a varié de 14,2 à 20,1 mg C kg^{-1} de sol. L'analyse de variance n'a pas montré des différences significatives. L'application des fumures organiques et minérales n'a pas stimulé significativement le carbone de la biomasse microbienne, en conséquence l'activité biologique des sols.

En 2010, l'analyse de variance du CBM a montré des différences significatives. Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé que le CBM des traitements Fom et celui de Fo ont été statistiquement identiques. Le CBM de Fom a été statistiquement supérieur au CBM des traitements Fmc, Fm et T. L'application de la fumure organique seule ou associée à la fumure minérale a un effet positif sur la biomasse microbienne.

A l'exception du CBM du traitement Fom et Fo qui n'ont pas connu une évolution régressive entre 2009 et 2010, une baisse tendancielle de CBM a été observée dans tous les autres traitements. Cependant, l'analyse de variance n'a pas montré des différences significatives.

5.2. Discussion

5.2.1. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des récoltes sur les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols

5.2.1.1. Bilans minéraux

Les bilans apparents de l'azote et du phosphore établis ont confirmé l'importance du rôle de la matière organique lorsqu'elle est associée aux engrais minéraux.

S'agissant de l'azote, seul le traitement avec fumure organo-minérale (Fom) a présenté un bilan positif au terme des trois années d'étude. L'application de cette formule peut conduire à terme à l'accumulation de cet élément dans le sol si ce dernier n'est pas exposé au lessivage, à la lixiviation et à l'évaporation due aux aléas climatiques. Il est connu que la teneur en azote de la MOS (matière organique du sol) constitue un paramètre favorable pour la libération de l'azote dans le sol. De nombreux travaux ont démontré qu'il existe un lien étroit entre la teneur en azote de la litière et la minéralisation nette de l'azote (Hien et Floret, 2005). Nos résultats corroborent ceux obtenus à travers les études de Ouattara *et al.* (1991) avec des capteurs de solution et les observations faites par Cissé (1986) au Sénégal sur les sols dégradés, et Sedogo (1993) au Burkina Faso. Koulibaly *et al.* (2009) a aussi montré que l'apport de la matière organique à la culture du coton et du maïs sous forme de compost au Burkina Faso entraîne un bilan positif de l'azote. Selon Brock *et al.* (2011), il y a une corrélation positive entre les rendements des cultures non légumineuses et la matière organique du sol. En conséquence, la fumure organique seule ne peut pallier à la baisse des réserves azotées. Les engrais minéraux lui doivent être associés. Gangry et Feller (1977) ont montré qu'en fumure azotée optimale, l'alimentation des céréales s'effectue aux $\frac{3}{4}$ à partir de la matière organique des sols. La matière organique constitue donc une réserve d'éléments fertilisants dont l'azote pour les plantes. La matière organique joue un rôle capital dans la fourniture à la plante de l'azote provenant de cette réserve organique. L'emploi du fumier améliore donc le bilan de l'azote du sol ce, en fonction de sa qualité.

Les résultats de l'étude révèle également que l'application de la fumure organique au sol entraîne une augmentation des exportations par les cultures en cet élément. Plusieurs auteurs (Gangry, 1990 ; Sedogo, 1993 et Bonzi, 2002) ont montré que les céréales ayant un faible indice d'efficacité de l'azote (Quantité de grains produite/Quantité d'N parties aériennes plante), compris entre 23 et 30 comme le mil et le sorgho, même en fumure azotée optimale, présentent un NdfS (N total dérivé de la matière organique du sol en pc) supérieur au

NdfF (N total plante dérivé de l'engrais). Ce type de culture exige plus d'N pour produire une même quantité de grains que celui ayant un indice supérieur (maïs par exemple avec un indice > 40) et ce « plus » est pris au sol et non à l'engrais (Blondel, 1971 ; Ganry, 1990).

Le bilan positif de l'azote suggère aussi que cet élément a été particulièrement immobilisé dans l'horizon 0-20 cm, comme l'a déjà montré Bonzi (2002). Dans le cas de notre étude, cela est attribuable à deux causes : (i) une teneur en matière organique du sol et une activité de la biomasse microbienne plus importante dans cet horizon du fait du labour, ce qui favorise l'immobilisation de l'azote comme cela a déjà été montré par Badiane (1993) au Sénégal, (ii) le fait que la majorité des racines du mil se trouve dans l'horizon de surface.

Les exportations et brûlis des résidus des cultures augmentent significativement les exportations de l'N du sol. Ces pratiques sont donc à proscrire dans les savanes tchadiennes.

Il convient de souligner que les bilans présentés sont loin des réalités. Bonzi (2002) a montré qu'avec l'application des engrais minéraux, les pertes globales de N engrais sont élevées et dues vraisemblablement à la volatilisation à partir de l'urée et/ou la dénitrification. Les observations de Bilgo *et al.* (2002) au Burkina Faso dans une parcelle cultivée ont montré des pertes annuelles par érosion et ruissellement d'azote de 8 à 27 kg. ha⁻¹. De plus, il faut tenir compte des pertes par lixiviation et par volatilisation. Chabalier (1976) au nord de la Côte d'Ivoire et Ganry (1990) au Sénégal sur sols sableux ont montré qu'on pouvait enregistrer des pertes d'azote par volatilisation de l'ordre de 30 à 40 pc. Pour Ouattara *et al.* (1991) les pertes d'azote par lixiviation peuvent représenter 2 à 6 kg ha⁻¹ an⁻¹.

Le bilan du phosphore (P) est toujours négatif. Ce qui peut à terme engendrer la carence du P des sols en zone des savanes du Tchad qui n'en contient que des teneurs relativement faibles (Naitormbaide *et al.*, 2010). Toutefois, le traitement Fom avec l'adjonction de fumure organique et minérale où le bilan négatif n'est que de -3 kg ha⁻¹, les traitements avec fumure organique ou minérale seule (Fm, Fmc et Fo) ont des bilans très négatifs qui varient entre -10 et -17 kg ha⁻¹. Les pertes les plus élevées ont été observées dans le traitement témoin. Ces bilans négatifs en phosphore sont en effet, le reflet d'une faible disponibilité en cet élément. Les études de Olina *et al.* (2008) dans la savane cotonnière du Cameroun ont aussi montré que les sols sont pauvres en P. Les apports sous formes organiques et minérales n'ont pas permis de compenser les exportations du P des sols par les cultures. Compte tenu de l'importance du rôle que joue le P dans le sol (transferts d'énergie, stimulation de croissance, densité et longueur des racines, production de biomasse, etc.), sa carence dans le sol peut rendre le sol improductif. Cependant, il faut souligner que les carences en P ne sont pas seulement liées à l'insuffisance de cet élément dans le sol. Elles sont souvent associées à

d'autres désordres nutritionnels tels que la toxicité ferreuse à pH acide, la déficience en zinc (Zn), et en fer (Fe) à pH basique (Lompo, 2009).

L'évaluation des quantités du P exporté en 2008 et 2010 montre que l'application des fumures organique favorise l'exportation de cet élément par le mil. L'apport de la fumure aurait favorisé l'activité microbienne et une augmentation du pH du sol ayant donc rendu disponible le P lié à l'aluminium et au fer (Van Raij *et al.* (2009).

Les exportations en N et P des sols sont aussi particulièrement importantes lorsque les résidus des cultures sont brûlés ou exportés hors des parcelles. Dans l'optique d'une agriculture durable, ces pratiques sont donc à proscrire en zone des savanes du Tchad.

5.2.1.2. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des récoltes sur la matière organique (MO) et l'azote (N) des sols

La matière organique des sols (MOS) joue un rôle prépondérant dans la fertilité des sols et dans la réduction des gaz à effet de serre. Il est aussi établi que les caractéristiques de la MOS sont liées à l'environnement pédo-bio-climatique d'une part, et aux modalités de gestion des terres de l'autre (Hien *et al.* 2003). Toute modification de l'un ou de l'autre affecte ces caractéristiques et par voie de conséquence les processus qui vont influencer les cycles et bilans des éléments majeurs, dont le carbone (Eswaran *et al.*, 1993 ; Feller, 1994 ; Bernoux *et al.*, 1998), ainsi que la dynamique de l'eau, les échanges gazeux et thermiques au sein des sols (Piéri, 1989 ; Batjes, 1996).

Les résultats de l'étude ont montré que la baisse de la teneur en MOS varie entre 2 et 7 pc par an. Sedogo (1981), Berger *et al.* (1987), Bationo et Mokwunye (1991), Bado *et al.* (1997), Bado (2002), et Deen et Kataki (2003) ont également montré que sur les sols d'Afrique de l'Ouest, la mise en culture entraînait une diminution systématique de la matière organique du sol et une diminution des rendements. Pour Berger (1990), le stock de la matière organique d'un sol lors de sa mise en culture est de l'ordre de 1,5 à 2,5 pc. Sur sol sableux, la vitesse de la minéralisation de la MOS se situe à 4 pc par an et les teneurs moyennes avoisinent 0,5 pc.

Les résultats de l'étude révèlent qu'avec l'application de la fumure organo-minérale, la diminution de la teneur en carbone du sol observée après trois années de culture a été relativement faible (2 pc an⁻¹). Ce résultat suggère que l'application au sol de toutes sources de matière organique de qualité (fumier, compost, résidus des cultures, etc.) peut contribuer dans une certaine mesure à maintien des teneurs des sols en matière organique. Berger (2006)

préconisent des doses de 4 à 6 t de matière sèche ha⁻¹ de fumier dans des zones semblables pour induire un bilan humique satisfaisant. La dose appliquée respecte cette norme.

A la 3^e année de l'étude, à l'exception de la teneur en MOS du traitement Fmc, les teneurs en MOS des autres traitements sont inférieures à 10 g kg⁻¹. Les sols des savanes du Tchad peuvent être considérés comme relativement dégradés. En effet, selon Berger *et al.* (1987), lorsque la teneur en MOS est de l'ordre de 6 g kg⁻¹, on constate « une absence de réponse aux engrais minéraux. Pour assurer aux sols cultivés une fertilité correcte, il faut maintenir le taux de MOS au dessus 10 g kg⁻¹ (Berger *et al.*, 1987, Lavigne-Delville, 1996), au minimum 6 g kg⁻¹ pour les sols sableux (Lavigne-Delville, 1996). Ce dernier précise que la baisse de la MOS entraîne un lessivage des bases suivi d'une apparition de toxicité de l'aluminium donc l'acidification des sols cultivés.

Quant au rapport C/N, ses valeurs moyennes permettent de conclure que dans ces sols, la MO a une vitesse de décomposition dite normale car le C/N est compris entre 9,3 et 11,5 au début et entre 8,8 et 11,7 à la fin de l'étude. Boyadgiev (1980) a défini deux classes de sols : la première avec le C/N compris entre 8 et 12, regroupe les sols dont la matière organique a une vitesse de décomposition dite normale ; la seconde avec le C/N compris entre 12 et 13, dont la vitesse de décomposition de la matière organique est jugée assez lente.

S'agissant des effets des modes de gestion des résidus des cultures sur les teneurs en MO et de l'N des sols, ils n'ont pas été significatifs même à la fin de l'étude en 2010. On peut faire l'hypothèse que les résidus ne se sont pas suffisamment décomposés pour améliorer significativement les teneurs des sols en ces éléments. Toutefois, ces résidus des cultures peuvent contribuer à mieux valoriser les fumures appliquées sur les cultures.

5.2.1.3. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des récoltes sur le phosphore assimilable

Le phosphore joue un rôle important dans l'amélioration et le maintien de la matière organique des sols en stimulant la croissance, la densité et la longueur des racines et la production de la biomasse microbienne. Dans le cadre de cette étude qui s'est située dans un temps relativement court, cet élément ne peut jouer ce rôle que s'il est un phosphore agricole (phosphore assimilable et phosphore en solution dans le sol). Même si la tendance générale des teneurs en phosphore assimilable des sols est à la baisse, celles-ci restent très élevées (Bunasols, 1990) car elles sont comprises entre 31,5 et 46,8 mg kg⁻¹ P. Le seuil de carence du phosphore n'étant atteint que lorsque la teneur du phosphore assimilable est inférieure à 30 mg kg⁻¹ (Piéri, 1989). Malgré ces teneurs élevées, on peut faire l'hypothèse qu'une partie du

phosphore des sols étudiés est encore restée sous formes de phosphore capital (P capital qui ne le sera effectivement que 10 ans plus tard) et de phosphore inerte (Lompo, 2009). Le même auteur indique que plus de la moitié du phosphore organique des sols tropicaux est du phosphore inerte. Pour Broudiscou *et al.* (1999), le phosphore stimule la production de la biomasse microbienne, qui contribue pour 2 à 3 pc à la matière organique totale des sols.

Or l'étude a montré que l'évolution des teneurs en MOS a été régressive pendant les trois années de mise en culture des terres. Puisque l'activité biologique a comme support énergétique la matière organique, les faibles teneurs en MOS auraient considérablement limité le développement des micro-organismes (Chaussod, 1996).

5.2.1.4. Effets des fumures et des résidus des récoltes sur le complexe absorbant

Les caractéristiques des sols montrent un appauvrissement des sols en bases échangeables dans certains traitements. Une baisse relativement importante a été observée surtout lorsque l'engrais minéral est appliqué de manière continue dans les traitements sans ajout de fumier. Sedogo (1993) a déjà observé au Burkina Faso un certain appauvrissement en bases en fonction des doses d'azote apportées. Pour Hien (1990), les engrais azotés accentuent les pertes en calcium et magnésium du complexe absorbant.

Même si la tendance générale en bases échangeables entre le début et la fin de l'étude est à la baisse, on a noté que les bases sont plus importantes dans les traitements avec fumier (Fom et Fo). De plus, selon le mode de gestion des résidus des cultures, l'effet bénéfique du compost a été observé à la 3^e année de l'étude. Ces résultats confirment l'importance du rôle de la matière organique qu'ont déjà souligné, Sedogo (1993) et N'dayegamiye et Coté (1996).

A l'opposé, lorsque les résidus des cultures sont exportés hors des parcelles, ils entraînent un appauvrissement des sols en bases échangeables. L'exportation des résidus des cultures hors des parcelles est pratique qui peut exacerber l'appauvrissement des sols en P.

5.2.1.5. Effets des fumures sur la répartition de la matière organique dans les fractions granulométriques des sols

La séparation en trois fractions F_0 ; F_{50} et F_{200} des échantillons de sol a entraîné des pertes de terre dans des proportions variant entre 0,5 et 1,2. Ces pertes survenues au cours du fractionnement ont été également observées par Sedogo (1993), Nacro *et al.* (2005), Segda, (2006), et Pallo *et al.* (2008).

Quelque soit le traitement étudié, la matière organique se trouve principalement dans la fraction inférieure à 50 μm (F_0), c'est-à-dire celle liée aux particules argilo-limoneuses. Ce

constat a été fait dans d'autres régions tropicales par Sedogo (1993) et Pallo *et al.* (2009). Il concorde également avec les observations faites ailleurs, sur des sols tempérés (Guggenberger *et al.*, 1994 ; Christensen, 2001). Dans cette fraction, la teneur totale du carbone du traitement Fom est la plus élevée, suivie de celle du traitement Fo. Les teneurs en C des traitements T ; Fmc et Fm se valent. Ce résultat suggère que l'apport organique a induit des augmentations plus ou moins fortes par rapport au témoin. Les variations de C observées sur les traitements seraient liées au niveau des apports mais aussi à une dynamique propre des fractions (Martin *et al.*, 1990 ; Balesdent *et al.*, 1987).

La matière organique ne constitue pas un ensemble homogène dans le sol. La fraction grossière (F_{200}) contient moins de carbone que la fraction fine (F_0). Or c'est dans cette fraction que la matière organique se dégrade facilement. Tout se passe comme si lors de la mise en culture des sols, la minéralisation de matière organique dans la fraction F_{200} des sols se fait au profit de la fraction F_0 des sols. Selon Segda (2006), dès qu'une parcelle est mise en culture dans les sols tropicaux exondés, le stock organique lié à la fraction grossière baisse au profit de la fraction fine. A contrario, Hien (2004) a montré que la mise en culture n'entraîne pas un transfert de C d'un compartiment à un autre. Elle induit plutôt la destruction rapide du C des fractions grossières. Le C stocké dans la fraction fine est plus stable, mieux protégé et donc moins sujet à la dégradation. Le fumier induit une stabilité du stock de C plus grande.

Les teneurs en carbone des traitements diffèrent en fonction des fumures appliquées. L'application du fumier à raison de 5 t ha^{-1} de fumier tous les deux ans a permis l'accumulation du carbone dans l'horizon 0-20 cm particulièrement dans la fraction fine des sols. Ce résultat est en conformité avec ceux de Ouattara (1990); Sedogo (1993) et Segda (2006). Les traitements Fom et Fo semblent davantage favoriser l'accumulation du carbone que les traitements T, Fmc et Fm sans apport organique qui ont tendance à s'appauvrir en cet élément. Cette augmentation de C des fractions fines, peut aussi s'expliquer par l'effet positif de l'activité biologique du sol, le nombre et/ou la diversité de la communauté microbienne. Cela a pour conséquence de stimuler l'humification de la MO et partant son stockage dans les fractions fines (Hien, 2004). Cet auteur a aussi montré que lorsque le fumier est apporté simultanément avec de l'azote à raison de $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, il favorise un stockage préférentiel de C dans les fractions fines.

Les traitements Fom et Fm où l'urée a été appliquée ont actuellement des teneurs relativement élevées en azote total. Cependant, ces apports peuvent provoquer une minéralisation plus importante de l'azote organique. Selon Sedogo (1993), ce phénomène, attribué à un effet d'activation apparent de l'engrais (*priming effect*), peut accentuer

l'appauvrissement en azote des sols à faibles teneurs en matières organiques. D'où l'intérêt d'apporter à ces sols des engrais organiques associés aux engrais minéraux.

Quelque soit le type de fumure appliqué, le coefficient d'enrichissement en carbone (Ec) des sols est plus élevé dans la fraction fine des sols (F_0 , riches en limon et argile). Il est faible dans la fraction de sables fins (F_{50}) et très faible dans la fraction de sables grossiers (F_{200}). Les mêmes observations ont été également faites par Pallo *et al.* (2009) en zone nord soudanienne du Burkina Faso et Christensen (2001) sur les sols des zones tempérées. Dans les traitements Fo et Fom où le fumier a été utilisé comme source de matière organique, les coefficients d'enrichissement en carbone des sols sont plus élevés dans la fraction fine F_0 et dans la fraction de sables grossiers. Ce résultat corrobore celui qui a été obtenu par le fractionnement des sols des traitements étudiés. Il souligne le rôle de la matière organique dans l'activité biologique des sols contribuant à l'amélioration de la qualité physique, chimique et biologique des sols. Selon Hien (2004), le fumier induit une plus grande stabilité du stock de carbone.

5.2.1.6. Effets des fumures sur la minéralisation du carbone

L'activité biologique permet de suivre l'état de fertilité d'un sol, elle est en retour fonction des caractéristiques physico-chimiques de celui-ci et de tous les facteurs pouvant les modifier (Zombré, 2006).

Les cumuls de CO_2 dégagés dans les traitements avec du fumier ont été plus élevés que ceux des autres traitements (T et Fm). L'apport du fumier au sol a donc vraisemblablement augmenté l'activité biologique des sols. Ce qui suggère qu'il favorise des conditions de prolifération bactérienne assurant cette minéralisation.

Les courbes de minéralisation journalière pendant les 21 jours d'incubation présentent plusieurs périodes correspondant aux phases de minéralisation bien précises (Sedogo, 1981, Zombré, 2006). Une première phase correspondant à la reprise de l'activité biologique du sol et à la dégradation des produits facilement biodégradables. Cette phase correspond à la biodégradation des microorganismes morts pendant la phase de dessiccation et des composés labiles tels les sucres et composés protéiques (Hien, 1990, Sedogo, 1993, Zombré, 2006). Ce phénomène s'est traduit par les pics de minéralisation observés dès le 1^{er} jour. Des pics relativement élevés ont été observés sur les traitements Fom et Fo. Les dégagements élevés de CO_2 au début de l'incubation ont aussi été rapportés par plusieurs auteurs avec différents types de matière organique tels que les composts (Lompo, 2009), le fumier (Sedogo, 1993) et la litière (Gnankambary *et al.*, 2007). On a noté une deuxième phase de décroissance progressive

de dégagement de CO₂ qui pourrait s'expliquer par non seulement l'épuisement des composés facilement biodégradables, mais aussi par la présence de composés récalcitrants pouvant inhiber la croissance microbienne (Lompo, 2009). Il s'en est suivi une légère reprise correspondant à la minéralisation de composés hydrosolubles, de celluloses, de lignines et de produits néoformés (Lompo, 2009) entre le 4^e et le 5^e jour.. Après cette période, il a été observé une baisse continue jusqu'au 21^e jour. L'intensité du dégagement est donc plus forte les sept premiers jours d'incubation. Plusieurs auteurs (Sedogo, 1993 ; Zombré, 2006 ; Asimi, 2006, Pallo *et al.*, 2009) ont observé la plus forte intensité de dégagement du CO₂ les sept premiers jours d'incubation. Ces résultats suggèrent que les sols analysés contenaient beaucoup plus des composés très dégradables, notamment les microorganismes morts qui se sont minéralisés rapidement.

Selon Dommergues et Mangenot (1970), les phases successives distinguées dans l'évolution journalière du CO₂ dégagé correspondent à autant d'étapes assurées par des vagues microbiennes différentes. En conséquence, l'importance et la nature des microorganismes d'un sol peuvent influencer les différentes phases et l'intensité respiratoire. C'est pourquoi, cette interprétation du dégagement journalier de CO₂ est à nuancer.

Les coefficients de minéralisation ont varié de 0,6 à 1,4 selon les traitements étudiés. Ils se situent dans la fourchette de 0,3 à 10 fixée par Dommergues (1960) pour la plupart des sols tropicaux. Les coefficients de minéralisation mettent en évidence une baisse du taux de minéralisation dans les traitements T (CO₂-C/C = 0,6) et Fm (CO₂-C/C = 0,8) et inversement un accroissement significatif dans les traitements Fo (CO₂-C/C = 1,3) et Fom (CO₂-C/C=1,4) où est appliqué le fumier. Ces résultats corroborent ceux de Dommergues qui ont mis en évidence l'influence remarquable des trois types d'amendements sur le coefficient de minéralisation du carbone, qui passe de 1,21 dans le traitement témoin à 2,24 et plus dans les parcelles amendées.

5.2.1.7. Effets des fumures sur la biomasse microbienne des sols

La biomasse microbienne est de plus en plus considérée comme un marqueur écologique (Smith *et al.*, 1990 ; Davet, 1996 ; Franco *et al.*, 2004) et un indicateur utile de l'amélioration ou de la dégradation des sols (Ros *et al.*, 2003 ; Gil-Sotres *et al.*, 2005).

Les résultats de cette étude révèlent qu'il y a une stimulation de la biomasse C induite par l'application du fumier. Par contre, dans les traitements où sont appliqués uniquement les engrais minéraux et le traitement témoin, l'activité microbienne a relativement diminué. L'apport du fumier au sol semble stimuler la minéralisation du carbone. L'importance de la

biomasse dans le sol après l'apport de fumier serait liée à la disponibilité du C dans cet amendement. Koulibaly (2011) a observé au Burkina Faso que sur sol brun eutrophe (cambisol) et ferrugineux (lixisol) riche en matière organique, la minéralisation du carbone est significativement supérieure par rapport à celle observée sur les sols ferrallitiques (ferralsol). Il existe un équilibre entre la taille les besoins énergétiques de la macro-flore d'une part, et entre la taille et la biodisponibilité de la matière organique, d'autre part (Zombré, 2006). Guilbault (2006) a aussi montré que l'apport des matières organiques est favorable au développement de la biomasse, mais, les sols pauvres en cet élément ($<15 \text{ g kg}^{-1}$ sur les 20 1^{ers} cm) présentent toujours une faible biomasse. Une teneur « élevée » en matières organiques n'est, en effet, pas suffisante pour créer un environnement favorable au développement microbien. Le pH et l'aération du sol par exemple sont également des paramètres limitant. Dans le cadre de cette étude, les biomasses les plus élevées sont observées sur les traitements Fom ($21,2 \text{ mg kg}^{-1}$ sol) et Fo ($16,9 \text{ mg kg}^{-1}$ sol). Les traitements Fm, Fmc et T détiennent les plus faibles biomasses microbiennes avec respectivement 13,2 ; 13,1 et $10,2 \text{ C mg kg}^{-1}$ sol. Dans l'ensemble, les biomasses microbiennes obtenues à partir des traitements étudiés sont faibles. Ceci est en rapport avec le moment du prélèvement des échantillons (fin de saison pluvieuse) de sol. Zombré (2003) a montré que l'activité biologique est plus importante au niveau des échantillons de début d'hivernage, moyenne pour les échantillons de saison pluvieuse et faible pour les échantillons prélevés en fin de saison sèche. Les pH respectifs des traitements Fm, Fmc et T sont de 5,7 ; 5,8 et 5,8, alors que ceux de Fo et Fom sont de 6,1 et 6 respectivement. L'activité microbienne des sols étudiés est faible lorsque son pH est inférieur à 5,8. Ces résultats corroborent ceux issus de l'étude de Guilbault (2006) effectuée en zone tempérée.

Conclusion partielle

L'étude a montré que les sols des savanes sont relativement pauvres en nutriments et en MO (matière organique). La mise en culture de ces sols augmente particulièrement l'appauvrissement des sols en MO, en P et en N. La baisse de la MO des sols entraine corrélativement celle des bases échangeables et de l'activité biologique des sols. Toutefois, les baisses des teneurs des sols en ces paramètres sont modérées lorsqu'on applique conjointement le fumier et les engrais minéraux aux cultures ou si les résidus des cultures sont transformés et restitués sous forme de compost. Ces résultats soulignent l'importance de la matière organique dans les systèmes de production des savanes tchadiennes.

CHAPITRE VI. EVALUATIONS DES EFFETS DES FUMURES ET DES MODES DE GESTION DES RESIDUS DES RECOLTES SUR LES RENDEMENTS DES CULTURES

6.1. Résultats

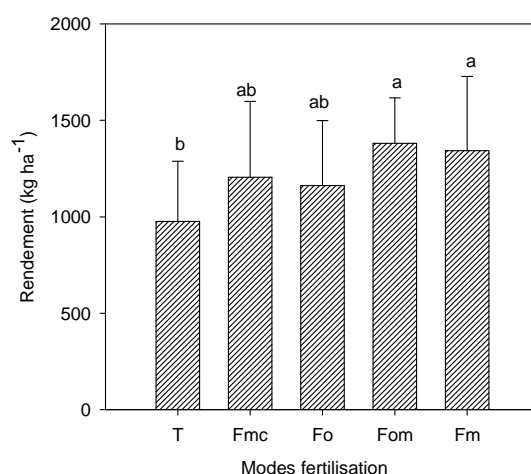
Les résultats présentés dans cette partie du mémoire ont été obtenus sur trois années d'observations à la Station de Bébédjia et en milieu paysan. Ils concernent l'évolution des rendements grains du mil, du sorgho, de l'arachide et quelques composantes des rendements des cultures.

6.1.1. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus sur le rendement du mil en 2008 et 2010

En 2008, le rendement du mil a varié entre 977 et 1382 kg ha⁻¹ avec une moyenne générale de 1214 kg ha⁻¹. L'analyse de variance a montré des différences significatives au seuil de probabilité de 0,05 (Annexe 16). Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a permis de dégager deux groupes homogènes (Figure 24).

- le 1^{er} groupe comportant la fumure minérale (Fm : 50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée) ; la fumure organo-minérale (Fom : 5 t ha⁻¹ 2 ans⁻¹ + 50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée) ; fumure organique (Fo : 5 t ha⁻¹ 2 ans⁻¹) et l'engrais composé (Fmc 50 kg ha⁻¹ NPKSB).
- le 2^e groupe est composé de fumure organique (Fo : 5 t ha⁻¹ 2 ans⁻¹) et l'engrais composé (Fmc : 50 kg ha⁻¹ NPKSB) et du témoin (T).

Le traitement Fm et Fom sont statistiquement supérieurs au traitement T en 2008.



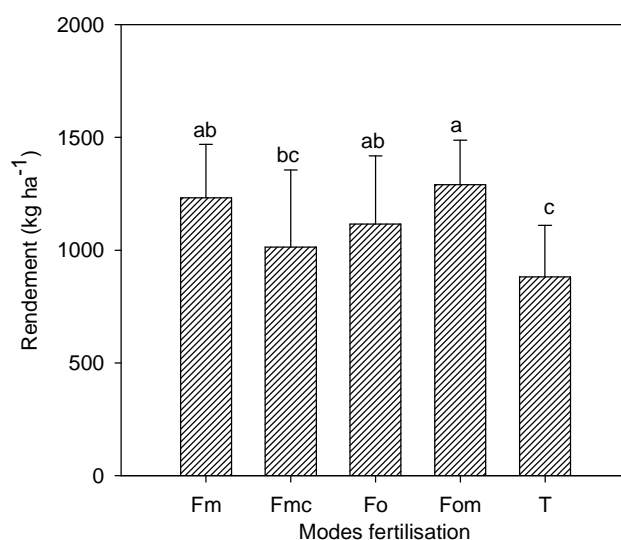
Légende. T, Fmc, Fo, Fom et Fm sont les traitements étudiés. Ceux qui portent les mêmes lettres ne sont pas significativement différents ($p < 0,05$).

Figure 24. Effets des fumures sur le rendement du mil en 2008

En 2010, les rendements obtenus avec les traitements étudiés sont présentés dans la Figure 25. L'analyse de variance a montré des différences significatives au seuil de probabilité de 0,01 et de 0,05 (Annexe 16). Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé 3 groupes homogènes.

- le 1^{er} groupe est composé des traitements Fom ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ 2 ans}^{-1} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ urée}$), Fo ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ 2 ans}^{-1}$), et Fm ($50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ urée}$) ;
- le 2^e groupe est composé de Fm ($50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ urée}$) ; Fo ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ 2 ans}^{-1}$) et Fmc ($50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB}$) ;
- et le 3^e groupe est composé de Fmc ($50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB}$) et T (témoin).

Le traitement avec fumure organo-minérale Fom ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ 2 ans}^{-1} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ urée}$) est statistiquement supérieur aux traitements Fmc et T.



Légende : T, Fmc, Fo, Fom et Fm sont les traitements étudiés. Ceux qui portent les mêmes lettres ne sont pas significativement différents ($p < 0,05$).

Figure 25. Effets des fumures sur le rendement du mil en 2010

Il a été obtenu sur le témoin un rendement de 882 kg ha^{-1} . Sur les traitements Fo ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ 2 ans}^{-1}$), Fmc ($50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB}$), Fm ($50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ urée}$) et Fom ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ 2 ans}^{-1} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ urée}$) ayant bénéficié des apports organiques et minéraux, des augmentations respectives de +21 ; +13 ; +28 et +32 pc par rapport au témoin (T) ont été obtenues. Toutefois, l'analyse de variance entre les moyennes des rendements du mil obtenus dans chaque traitement étudié en 2008 et 2010 n'a pas révélé des différences significatives ($p < 0,05$).

L'analyse de variance a montré également qu'il n'y a pas d'interaction entre le mode de gestion des fumures et celui de gestion des résidus (Tableau XXVI et Annexe 16).

S'agissant des modes de gestion des résidus des cultures, l'analyse de variance n'a pas montré des différences significatives. Les modes de gestion des résidus des cultures appliqués aux parcelles cultivées n'ont pas influencé les rendements du mil.

L'apport des apports organiques et minéraux n'ont pas d'effet significatif sur le poids moyen des épis et l'indice de récolte (rapport poids graines/poids biomasse) des traitements étudiés (Tableau XXVI).

Tableau XXVI. Effet des fumures sur les composantes des rendements du mil en 2010.

	Rendement 2008 (kg ha ⁻¹)	Rendement 2010 (kg ha ⁻¹)	Nombre épi 2010	Poids moyens épi (g) 2010	Biomasse (kg ha ⁻¹) 2010
Fm	11343 a	1232 ab	93 a	20	3823 a
Fom	1382 a	1290 a	86 a	31	3631 a
Fo	1162 ab	1116 ab	84 a	30	3556 a
Fmc	1206 ab	1013 bc	70 b	30	3000 b
T	977 b	882 c	65 b	31	3016 b
a.	1188	1036	77	28	3217
b.	1132	1076	75	27	3279
c.	1309	1194	88	31	3824
e.	1227	1120	77	26	3300
Fumure	*	**	**	**	**
Résidu	ns	ns	ns	ns	*
Fumure x résidu	ns	ns	ns	ns	ns

Légende. Fm (50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée), Fmc (50 kg ha⁻¹ NPKSB), Fo (5 t ha⁻¹ fumier/2 ans), Fom (Fo + Fm), T (témoin) ; a, b, c, e : résidus laissés sur place (a), brûlés (b), compostés (c) et exportés (e) ; ** test significatif au seuil de probabilité de 0,05 et 0,01 ; * test significatif au seuil de probabilité de 0,05 ; test non significatif ; les chiffres suivis de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différent au seuil de p<0,05 selon le test de Newman Keuls.

L'analyse de variance du rendement du mil, du nombre des épis et des biomasses produites en 2010 dans les traitements étudiés a montré des différences significatives au seuil de probabilité de 0,01 et 0,05. Le test de Newman Keuls (p<0,05) révèle que les traitements Fom ; Fm et Fo sont statistiquement identiques et supérieurs aux traitements Fmc et T identiques entre eux.

L'analyse de variance des effets des modes de gestion des résidus sur les mêmes variables (nombre épi, poids épi, biomasse et indice de récolte) n'a pas révélé des différences significatives (Annexe 17). Pour ces mêmes variables, les valeurs observées avec les sous traitements c (résidus compostés), e (résidus exportés), a (résidus laissés sur place) et b

(résidus brûlés) varient dans la même fourchette que celles observées sur les principaux traitements Fom, Fo, Fm, Fmc et T.

6.1.2. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des cultures sur les rendements de l'arachide.

Les moyennes des rendements de l'arachide obtenues selon les 5 types de fumures testées ont varié entre 1370 et 1770 kg ha⁻¹ respectivement pour le témoin et le traitement Fmc. L'analyse de variance a montré des différences significatives au seuil de probabilité de 0,05 pour le rendement de l'arachide (Annexe 18). Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé que les traitements Fom, Fm et Fo ont été statistiquement identiques et supérieurs au témoin (Tableau XXVII). Par rapport au traitement témoin (T) des augmentations d'importance variable ont été observés sur les traitements étudiées : +16 pc sur le traitement Fm, +19 pc sur les traitements Fo et Fom et +23 pc sur le traitement Fmc.

Des quantités relativement importantes biomasses (fanés+coques) ont été obtenues avec les différents traitements. Cependant, l'analyse de variance n'a pas montré des différences significatives au seuil de probabilité de 0,05.

Tableau XXVII. Effet des fumures et des modes de gestion des résidus des cultures sur le rendement de l'arachide et la production des biomasses

Fumure	Rendement graine (kg ha ⁻¹)	Rendement biomasse (kg ha ⁻¹)
Fm	1637 ab	1300
Fom	1664 ab	1272
Fo	1684 ab	1338
Fmc	1770 a	1253
T	1370 b	1259
a.	1488 b	1265
b.	1559 b	1129
c.	1844 a	1325
e.	1610 b	1150
Fumure	*	ns
Résidu	*	ns
Fumure x Résidu	ns	ns

Légende. Fm (50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée), Fmc (50 kg ha⁻¹ NPKSB), Fo (5 t ha⁻¹ fumier/2 ans), Fom (Fo + Fm), T (témoin) ; a, b, c, e : résidus laissés sur place (a), brûlés (b), compostés (c) et exportés (e) ; * test significatif au seuil de probabilité de 0,05 ; ns : test non significatif ; les chiffres suivis de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différent au seuil de $p < 0,05$ selon le test de Newman Keuls.

Les modes de gestion des résidus, n'ont pas influencé significativement la production des biomasses. L'analyse de variance a montré des différences significatives pour les rendements de l'arachide obtenus selon les modes de gestion des résidus des cultures. Par contre, il n'y a pas d'interaction entre les fumures et les modes de gestion des résidus sur les rendements de l'arachide. Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a montré que le rendement obtenu avec les résidus compostés (c) est statistiquement supérieur aux rendements obtenus avec les résidus des récoltes laissés sur place (a) sur place, exportés (e) ou brûlés (b). Les résidus des récoltes compostés (c) et restitués dans les parcelles, contribuent davantage à l'amélioration du rendement de l'arachide que les autres modes de gestion des résidus de récolte. En effet, par rapport aux rendements de l'arachide obtenus avec les résidus laissés sur place (a), exportés (e) et brûlés, des augmentations respectives de +19 ; +13 et +15 pc ont été observés sur le rendement obtenu avec les résidus des récoltes compostés et restitués dans les parcelles qui est de 1844 kg ha^{-1} .

6.1.3. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des cultures sur le rendement du sorgho

L'analyse de variance des composantes de rendement du sorgho a montré des différences significatives au seuil de probabilité de $p < 0,01$ et $p < 0,05$ (Tableau XXXVIII et Annexe 19). Le test de Newman Keuls au seuil de 0,05 a montré que le rendement du sorgho obtenu avec le traitement avec l'apport de fumure organo-minérale Fom est statistiquement supérieur aux rendements obtenus avec les traitements Fm, Fmc et T qui ont été statistiquement identiques.

Tableau XXVIII. Effet des fumures et des modes de gestion des résidus des cultures sur les composantes du rendement de sorgho et la production des biomasses

Fumure	Nombre épi	Poids moyen/ épi (g)	Rendement graine (kg ha ⁻¹)	Rendement biomasse (kg ha ⁻¹)
Fm	16 b	33 ab	275 b	4225 b
Fom	23 a	38 a	380 a	7123 a
Fo	15 b	24 b	246 b	3953 b
Fmc	15 b	20 b	197 b	3448 ab
T	11 b	23 b	172 b	2660 c
a.	14	29	240 b	4065 b
b.	17	24	182 b	3833 b
c.	18	35	380 a	5599 a
e.	15	23	212 b	3630 b
Fumure	**	**	**	**
Résidu	ns	ns	**	**
Fumure x Résidus	ns	ns	ns	ns

Légende. Fm (50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée), Fmc (50 kg ha⁻¹ NPKSB), Fo (5 t ha⁻¹ fumier/2 ans), Fom (Fo + Fm), T (témoin) ; a, b, c, e : résidus laissés sur place (a), brûlés (b), compostés (c) et exportés (e) ; ** test significatif au seuil de probabilité de 0,01 et 0,05 ; ns : test non significatif ; les chiffres suivis de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différents au seuil de p<0,05 selon le test de Newman Keuls.

Les fumures Fom, Fmc et Fm ont permis d'augmenter les rendements du sorgho de +53 ; +9 ; +27 et +35 par rapport au rendement obtenu avec le traitement témoin qui a été de 180 kg ha⁻¹. Ce faible rendement du sorgho s'explique par le fait qu'il a été associé à l'arachide. De plus, les parcelles ont une infestation relativement forte de *Striga hermonthica*.

Le test de Newman Keuls au seuil de p< 0,05 a révélé que le traitement Fom a permis d'obtenir un nombre plus élevé des épis, ainsi que le poids moyen d'un épi. Ce traitement a la plus importante production de biomasse.

Lorsque les résidus des récoltes sont transformés sous forme de compost et restitués dans les parcelles, ils améliorent significativement les rendements du sorgho et sa production de biomasse. Par rapport aux rendements de sorgho obtenus avec les résidus laissés sur place (a), exportés (e) et brûlés des écarts respectifs de +37 ; +44 et +52 pc ont été observés sur le rendement obtenu avec les résidus des récoltes compostés et restitués dans les parcelles.

6.1.4. Evaluation agronomique des meilleures technologies dans les sites d'étude

L'objectif de cette étude est de valider en milieu paysan les résultats des meilleures technologies qui ont été mises au point à la station de recherche et ce, avec l'appui des producteurs. Pour ce faire, l'arachide et le mil ont été étudiés dans une rotation : mil (2009)/arachide (2010) avec les traitements suivants :

- Fom : 5 t ha⁻¹ tous les 2 ans + 50 kg ha⁻¹ NPKSB + 50 kg ha⁻¹ urée ;
- DAP [Di-ammonium phosphate (NH₄)₂HPO₄] : 13 kg ha⁻¹ DAP + 66 kg ha⁻¹ urée.
- Témoin (T).

6.1.4.1. Effets des fumures sur le rendement du mil à Tala1, Nguetté1, Ndaba et Bébédjia

- **Effet des fumures sur le rendement du mil dans chaque site d'étude**

Les résultats obtenus dans les deux sites sont contenus dans le Tableau XXIX. L'analyse de variance des rendements obtenus dans chaque site avec les différents types de fumures appliquées au mil n'a pas révélé des différences significatives (Annexe 20).

Tableau XXIX. Effet des fumures sur le rendement (kg ha⁻¹) du mil dans chaque site d'étude

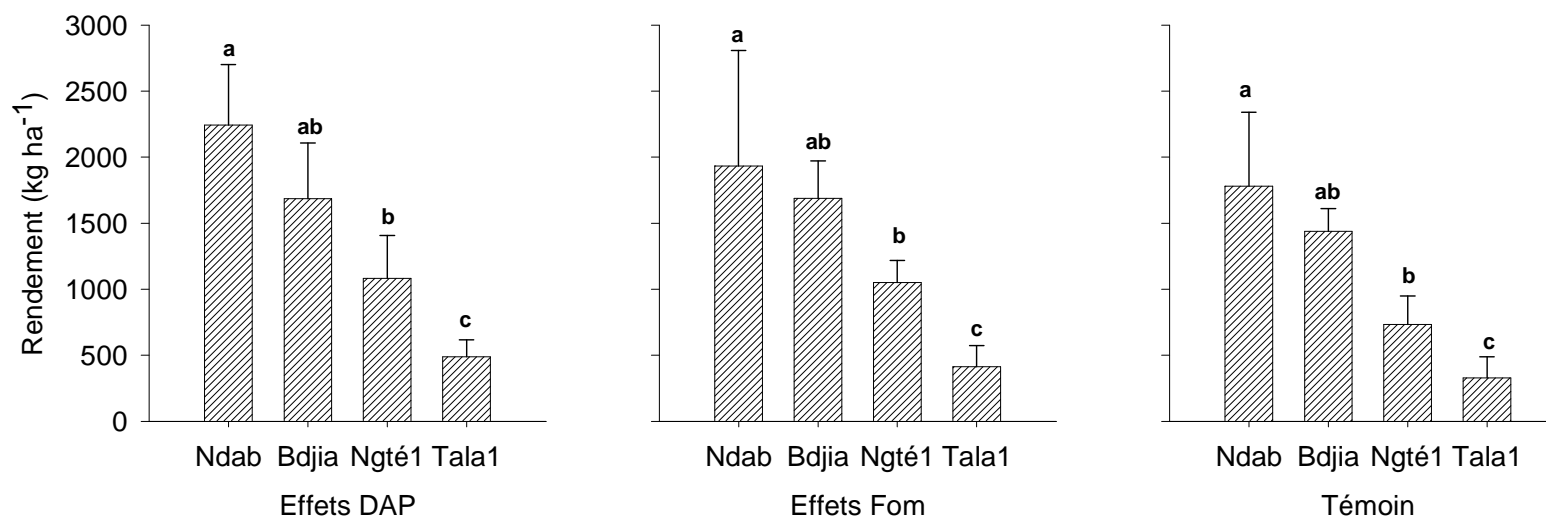
Modes fertilisation	Ndaba	Bébédjia	Nguetté1	Tala1
Dap	2244	1686	1158	488
Fom	1932	1688	1051	412
T	1780	1438	984	327
Signification (p<0,05)	ns	ns	ns	ns
Coefficient de variation (pc)	41	19	30	36

Légende : ns : test non significatif; les moyennes suivies de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls (p<0,05).

Les résultats du Tableau XXX montrent que l'importance des rendements du mil est fonction du site et du type de fumure appliqué. En effet, à Ndaba, Bébédjia (à faibles pression anthropique) et Nguetté1 (à moyenne pression anthropique), les rendements sont relativement élevés (984 à 2244 kg ha⁻¹) alors qu'à Tala1 (forte pression anthropique), les rendements du mil obtenus ont été faibles (327 à 488 kg ha⁻¹).

- **Comparaison des effets de chaque type de fumure sur le rendement du mil**

Qu'il s'agisse du Di-ammonium phosphate ou de la fumure organo-minérale, leurs effets sur les rendements du mil varient en fonction des sites. L'analyse de variance a montré des différences significatives au seuil de probabilité de p<0,05 (Annexe 20 et Figure 26).



Légende. Ngte=Nguetté1, Bba=Bébédjia, Nda=Ndaba, Tala=Tala1. Les bâtons représentent les rendements du mil obtenus avec les technologies (Fom, DAP, T) dans un site donné. Ceux qui portent les mêmes lettres ne sont pas significativement différents selon le test de Newman Keuls ($p < 0,05$).

Figure 26. Comparaison des effets de chaque type de fumure sur le rendement du mil

- Effet du Di-ammonium phosphate (DAP)

Le rendement du mil obtenu à Ndaba avec le DAP est statistiquement identique au rendement obtenu avec cet engrais à Bébédjia et supérieur au rendement obtenu avec le même engrais à Nguetté1 et Tala1. Les rendements du mil obtenus avec le DAP à Bébédjia et Nguetté1 sont statistiquement identiques et supérieurs au rendement du mil obtenu à Tala1. Le plus faible rendement a été donc obtenu à Tala1 avec le DAP.

- Effets de la fumure organo-minérale (Fom)

Le rendement du mil obtenu avec le traitement Fom est statistiquement identique au rendement du mil obtenu avec cette fumure organo-minérales à Bébédjia et supérieur au rendement obtenu avec la même fumure à Nguetté1 et Tala1. Les rendements du mil obtenus avec le Fom à Bébédjia et Nguetté1 sont statistiquement identiques et supérieurs au rendement obtenu à Tala1. Le plus faible rendement est obtenu avec cette fumure à Tala1.

- Le témoin (T)

Les rendements du mil obtenus à Bébédjia et Ndaba ont été statistiquement identiques et supérieurs au rendement obtenu à Tala1. Le plus faible rendement a été celui de Tala1.

Quelle que soit la technologie utilisée, le meilleur rendement est obtenu à Ndaba. Ensuite, suivent par ordre décroissant, les rendements obtenus à Bébédjia, à Nguetté1 et à Tala1. Ces résultats suggèrent que l'obtention d'un rendement optimal du mil avec les technologies est étroitement liée à l'état de la fertilité des sols.

6.1.4.2. Arrières effets des fumures sur le rendement de l'arachide sur sites

Les analyses ne concerneront que les sites de Bébédjia, Ndaba et Nguetté1 car les données de Tala1 n'ont pas été validées à cause de la destruction d'une partie du test par les animaux.

- **Arrières effets des fumures sur le rendement de l'arachide**

Les rendements de l'arachide ont varié en fonction des types de fumure antérieure et des sites d'étude. A Ndaba, ils ont varié entre 1879 et 2677 kg ha⁻¹, alors qu'à Bébédjia, ils ont varié entre 3318 et 3629 kg ha⁻¹ et à Nguetté1 entre 1144 et 1670 kg ha⁻¹ (Tableau XXX)

Tableau XXX. Arrières effets des fumures sur le rendement (kg ha⁻¹) de l'arachide dans les sites

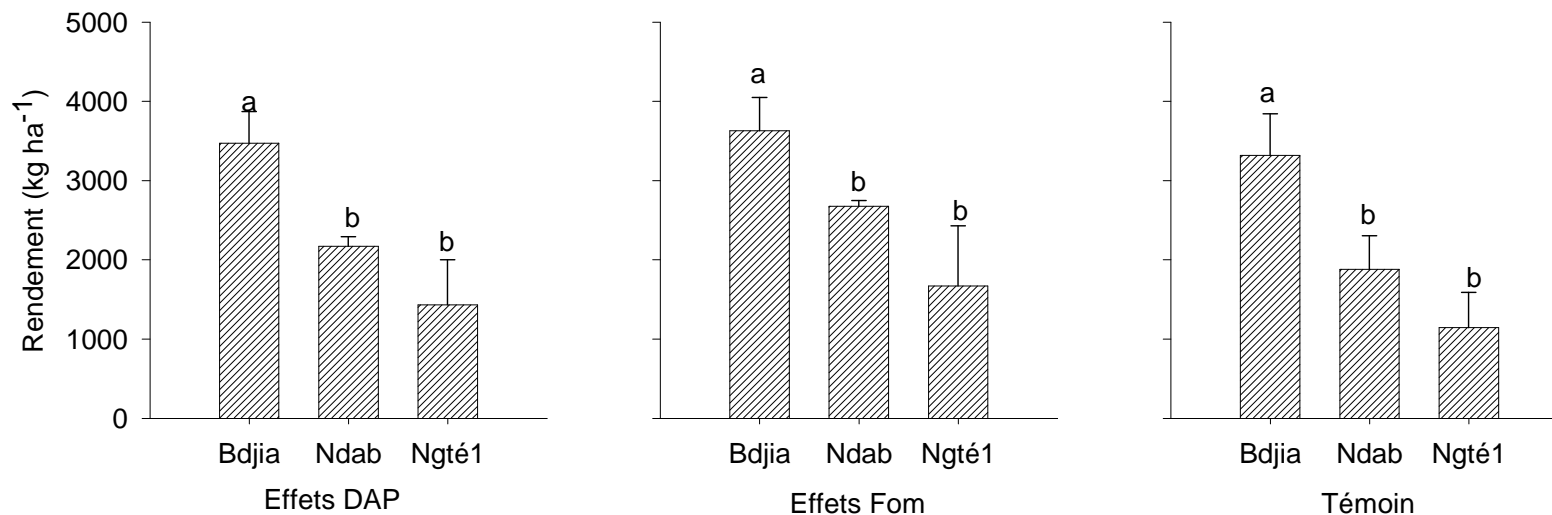
Modes fertilisation	Ndaba	Bébédjia	Nguetté1
DAP	2677 a	3629	1432
Fom	2172 ab	3470	1670
T	1879 b	3318	1144
Signification (p<0,05)	s	ns	ns
Coefficient de variation (pc)	27	9,2	30

Légende. ns : test non significatif; s : test significatif. Les moyennes suivies de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls au seuil de 5 pc.

A Bébédjia et Nguetté1 où la fertilité des sols est moyenne, l'analyse de variance n'a pas révélé des différences significatives au seuil de probabilité de $p < 0,05$. Par contre à Ndaba où les sols sont relativement riches, elle a montré des différences significatives (Annexe 21). Le test de Newman Keuls ($p < 0,05$) a révélé que les rendements de l'arachide obtenus avec le DAP et Fom ont été statistiquement identiques. Le DAP a permis d'obtenir un rendement plus élevé que celui qui a été obtenu avec le témoin sans apport. Le plus faible rendement a été obtenu avec le témoin.

- **Comparaison des arrières effets des fumures sur le rendement de l'arachide**

Quelque soit la technologie testée, le meilleur rendement de l'arachide a été obtenu à Bébédjia (Figure 27). Les arrières effets du DAP, de la Fom et du traitement témoin sur les rendements de l'arachide obtenus à Bébédjia avec ont été statistiquement supérieurs à ceux obtenus avec les arrières effets de ces mêmes traitements à Ndaba et Nguetté1.



Légende. Ngte=Nguetté1, Bba=Bébédjia, Nda=Ndaba, Tala=Tala1. Les bâtons représentent les rendements de l'arachide obtenus avec la technologie dans un site donné. Ceux qui portent les mêmes lettres ne sont pas significativement différents ($p < 0,05$).

Figure 27. Arrières effets de chaque type de fumure sur le rendement de l'arachide

- Arrières effets du Di-ammonium phosphate (DAP)

Le rendement de l'arachide obtenu à Bébédjia sur la parcelle où a été appliqué le DAP la campagne agricole précédente est statistiquement supérieur à ceux obtenus sur les parcelles ayant reçu le même traitement à Ndaba et Nguetté1.

- Arrières effets de la fumure organo-minérale (Fom)

Le rendement de l'arachide obtenu à Bébédjia sur la parcelle où a été appliqué Fom la campagne agricole précédente est statistiquement supérieur à ceux obtenus sur les parcelles ayant reçu ce même traitement à Ndaba et Nguetté1.

- Arrières effets du traitement sans application de fumure

Le témoin a permis d'obtenir le rendement de l'arachide le plus élevé à Bébédjia. Les rendements de l'arachide obtenus avec le témoin à Ndaba et Nguetté¹, ont été statistiquement identiques.

Les résultats de cette étude montrent clairement que sur les sols pauvres en matière organique, quelle que soit la qualité de la fumure appliquée, la réponse de la culture à cet apport est relativement faible. C'est le cas des sols dégradés de Tala¹. Pour une production acceptable dans cette zone où la pression foncière est élevée comme à Tala¹, l'utilisation des fumures organiques de qualité est indispensable. Dans ce site, les producteurs utilisent le fumier de parc pour la fertilisation du mil et de l'arachide. Le constat est que les fumures organiques utilisées ne sont pas de bonne qualité.

6.2. Discussion

6.2.1. Effets des fumures sur le rendement du mil en 2008 et 2010

En 2008, les fumures du mil ont amélioré significativement les rendements grains du mil. Des augmentations variant entre 16 et 29 pc par rapport au témoin ont été observées sur les traitements. Les augmentations les plus élevées ont été celles des traitements Fom ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ 2 ans}^{-1} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ urée}$) et Fm ($50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ urée}$). Les rendements de mil obtenus avec les formules Fom et Fm ont augmenté respectivement +27 et +29 pc par rapport au rendement du traitement témoin (T) qui a été de 977 kg ha^{-1} . Les rendements obtenus avec les traitements Fmc et Fo montrent l'importance des apports combinés des engrais minéraux et organiques. En effet, par rapport au témoin, les augmentations des rendements de Fmc ($50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB}$) et Fo ($5 \text{ t ha}^{-1} / 2 \text{ ans}$) n'ont été que de +19 et +16 pc respectivement. C'est la conséquence de l'application séparée dans ces traitements des fumures organique et minérale.

En 2010, il a été obtenu sur le témoin un rendement de 882 kg ha^{-1} . Avec les traitements Fo, Fmc, Fm et Fom ayant bénéficié des apports organiques et minéraux, des augmentations respectives de +21 ; +13 ; +28 et +32 pc ont été obtenues. Les effets des fumures ont été également significatifs ($p < 0,05$) sur les rendements du mil. Les traitements Fom et Fm se talonnent dans le classement. Toutefois, par rapport au témoin, l'augmentation de rendement obtenu avec Fom s'est améliorée de +3 pc alors que celle du traitement Fm n'a été que de +1 pc. La fumure organo-minérale (Fom) a tendance à améliorer le rendement mil alors que la fumure minérale risque à terme, d'influer négativement sur le rendement. Les sols étant relativement pauvre en matière organique, l'engrais composé (NPKSB) ainsi appliqué n'a pas de support donc serait plus sujet aux pertes éventuelles. Lorsque le sol est pauvre en matière organique, la capacité d'échange cationique baisse, entraînant aussi une baisse des potentialités nutritives du complexe absorbant sur lequel doivent se fixer les hydroxydes, les cations bivalents ou trivalents (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+}) (Bationo *et al.*, 2004).

Ces augmentations peuvent s'expliquer par le fait que ces deux types de formules contiennent des engrais azotés, qui ont contribué à l'amélioration du rendement du mil. Saar (1981) a montré que l'apport d'engrais minéral (NPK) avec un complément d'urée accroît très significativement les rendements du mil. L'organe onusien, CNUCED (2010) indique également que la contribution de l'azote détermine jusqu'à 35 pc de la productivité totale de toutes les cultures. De plus, la fumure organique dans la formule Fom a permis de mieux valoriser les engrais minéraux qui lui ont été associés. L'apport combiné de la fumure

minérale et organique permet de mieux valoriser la fumure minérale et de rendre plus durable la productivité des sols (Sedogo, 1993). Selon Ouattara (1994), l'effet positif des fumures organo-minérales résulte aussi de l'amélioration du statut organo-minéral, du sol et de son interaction probable sur les propriétés physiques du sol dont la densité apparente, la porosité et l'état hydrique.

Pour expliquer l'effet du fumier sur le rendement du mil, nous émettons l'hypothèse d'un double effet : l'effet sur la germination et la vigueur au démarrage en début de cycle, donc sur l'enracinement (Pichot *et al.*, 1981) d'une part, et l'effet sur la fourniture de N à la céréale (Ganry, 1990 ; Agbenin et Goladi, 1997) d'autre part. Plusieurs auteurs ont aussi montré que l'application du fumier améliore la teneur des sols en carbone (Gandah *et al.*, 2003 ; Mando *et al.*, 2005), en azote (Agbenin et Goladi, 1997), en K, Mg et Ca (de Ridder et Van Keulen, 1990) et la CEC des sols (Pichot *et al.*, 1981; De Ridder et Van Keulen, 1990), augmentant le rendement grain du mil jusqu'à 439 pc par rapport à un témoin sans apport.

Bien que le traitement Fm ait permis d'obtenir une augmentation substantielle de rendement de +27 pc par rapport au témoin en 2008, son application peut contribuer à la dégradation des sols. Plusieurs auteurs (Sedogo, 1993; Hien, 1990 ; Lavigne-Delville, 1996; Morel, 1996) ont déjà montré que l'application des engrais minéraux sans apport organique peut entraîner à terme la dégradation de la fertilité des sols.

Dans le sahel en général, l'azote est le 2^e élément essentiel de fumure minérale après le phosphore. Or, la demande en azote du mil varie selon le stade végétatif. Saar (1981) a montré qu'une variété locale de mil cultivée au Sénégal peut mobiliser 132 kg ha⁻¹ d'azote pour un rendement grain de 3310 kg ha⁻¹. Le taux maximum de mobilisation d'azote étant de 2,4 kg ha⁻¹/jour. La mobilisation de l'azote ne devient importante qu'après les 40 premiers jours de culture. C'est la période de montaison pendant laquelle l'application d'un complément azoté est indispensable pour une production optimale du mil. Eu égard à sa grande mobilité dans le sol, des apports raisonnés en fonction des besoins spontanés des cultures en cours de végétation permettent de mieux la valoriser. Ainsi, les traitements Fom et Fm ont reçu des applications fractionnées de l'urée qui ont aussi contribué à l'amélioration de son rendement.

En 2010, les biomasses produites et les rendements de mil obtenus avec les traitements étudiés augmentent proportionnellement. En effet, les rendements des traitements Fo, Fom et Fm ont été statistiquement identiques. Les quantités des biomasses produites par ces traitements ont été aussi égales. L'apport du fumier seul ou associé aux engrais azotés permet d'améliorer la production des biomasses qui peuvent induire conséquemment l'augmentation du rendement en grains du mil. Le traitement Fm ne contient que les engrais azotés. Ses

applications répétées peuvent entraîner l'acidification des sols (Hien, 1990 ; Sedogo, 1993; Koulibaly, 2011).

Les effets des modes de gestion des résidus du mil (brûlis, les pailles laissées sur place dans la parcelle, exportation des pailles et restitution sous forme de compost) n'ont pas été statistiquement significatifs sur le rendement du mil. Cela peut s'expliquer par la courte durée du temps de restitution et l'évaluation des rendements (2 ans). En effet, compte tenu de la pauvreté des sols en matière organique, la minéralisation des résidus restitués n'a pas encore permis d'améliorer conséquemment les propriétés bio-physico-chimiques du sol, en conséquence, le rendement du mil. Vullioud *et al.* (2004) ont montré que les restitutions organiques permettent d'améliorer les propriétés bio-physico-chimiques du sol, surtout sa disponibilité en éléments nutritifs. Selon Koulibaly *et al.* (2010), à défaut de maintenir le potentiel de production, l'enfouissement au sol des résidus et leur recyclage en fumure organique, combinés à la fumure minérale, réduisent la baisse des rendements liée à l'exploitation continue des terres.

6.2.2. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des cultures sur le rendement de l'arachide

Les effets des fumures sur le rendement de l'arachide ont été pratiquement les mêmes que ceux observés sur le précédent mil. Les applications des fumures organique (Fo), organo-minérale (Fom) et minérale (Fm et Fmc) ont amélioré les rendements de l'arachide de +19 ; +18 ; +16 et +23 par rapport au témoin qui a été de 1370 kg ha⁻¹. Les effets positifs des éléments nutritifs sur les rendements des légumineuses ont été déjà observés par Bationo et Ntare (2000) ; Fening *et al.* (2001) et Bado (2002). Comme toutes cultures, les légumineuses ont des besoins en éléments nutritifs qui, selon leur disponibilité influencent leurs rendements. Buerkert *et al.* (2001) ont montré que le phosphore augmentait les rendements de l'arachide de 28 à 72 pc. Les amendements minéraux et organiques comme la dolomie et le fumier apportent des éléments nutritifs et neutralisent l'acidité du sol, expliquant leurs effets parfois significatifs sur les rendements en fanes des légumineuses (Bado, 2006). Même l'engrais azoté est nécessaire pour améliorer les rendements des légumineuses. Conformément à nos résultats et ceux obtenus par d'autres auteurs (Bationo et Ntare, 2000; Fening *et al.*, 2001), un minimum d'engrais azoté est nécessaire dans les sols pauvres pour améliorer les rendements des légumineuses et peut aussi s'expliquer par l'incapacité de la légumineuse à fixer l'azote au début de son cycle. La nodulation est un processus qui s'établit plus ou moins lentement (Dommergues *et al.*, 1999) et elle ne peut commencer que lorsque la plante a développé un

enracinement permettant d'accueillir les rhizobiums. Pendant cette période, la légumineuse a un besoin en azote qui, s'il n'est pas comblé par le sol ou les engrais, peut limiter son développement et diminuer les rendements (Bado, 2006).

L'analyse de variance des biomasses produites dans les différents traitements étudiés n'a pas révélé des différences significatives. Toutefois, d'importantes quantités de biomasses ont été obtenues dans chaque traitement. Leur transformation et restitution sous forme de fumier ou de compost peut contribuer considérablement à maintenir ou à améliorer la fertilité des sols. La restitution de ces fanes au sol limiterait la dégradation de la fertilité des sols. Les restitutions organiques permettent d'améliorer les propriétés bio-physico-chimiques du sol, surtout la disponibilité en éléments nutritifs (Vullioud *et al.*, 2004). A défaut de maintenir le potentiel de production, l'enfouissement des résidus au sol et leur recyclage en fumure organique, combinés à la fumure minérale, réduisent la baisse des rendements liée à l'exploitation continue des terres (Koulibaly *et al.*, 2010).

6.2.3. Effets des fumures et des modes de gestion des résidus des cultures sur le rendement du sorgho

L'effet positif de la fumure organo-minérale (Fom) a été très net sur le rendement du sorgho comparativement aux rendements du précédent mil. En effet, une augmentation du rendement de +53 pc a été obtenue avec la fumure Fom par rapport au témoin. Sur le mil les augmentations n'ont été que de +27 pc à la 1^{re} année et de +32 pc à la 3^e année de l'étude. L'efficacité du fumier peut s'expliquer par le fait qu'il augmente la disponibilité du P (Gerke, 1993), améliore les teneurs en carbone (Gandah *et al.*, 2003 ; Mando *et al.*, 2005), et en azote (Agbenin et Goladi, 1997), neutralise l'acidité des sols en apportant au sol le magnésium, le potassium et le calcium (De Ridder et Van Keulen, 1990). De plus, le sorgho a été associé à l'arachide qui est une plante fixatrice d'azote. Cette pratique culturale aurait permis à la culture de satisfaire ses besoins en azote. Bado (2002) a aussi fait observer que le fumier stimule d'avantage les effets de la légumineuse.

Corrélativement au rendement de sorgho élevé avec le traitement Fom, la production de la biomasse a été aussi plus élevée que celle des autres traitements. L'application conjointe du fumier et des engrais minéraux permet d'améliorer la production globale de la biomasse et celle des grains de sorgho. L'apport conjoint des engrais organiques et minéraux permet de mieux valoriser les engrais minéraux (Sedogo, 1993) et d'augmenter jusqu'à 439 pc le rendement du mil (De Ridder et Van Keulen, 1990).

Les résultats obtenus avec les résidus des cultures soulignent l'importance de la fumure organique dans l'amélioration des rendements des légumineuses comme l'a fait remarquer Bado (2002). Dans notre cas, l'étude a révélé que la restitution des résidus sous forme de compost peut améliorer le rendement de l'arachide de +19 ; +15 et +13 pc, respectivement par rapport à l'abandon, le brûlis ou l'exportation des résidus des cultures.

L'effet positif de la restitution des résidus a été particulièrement important sur la culture du sorgho. En effet, les améliorations du rendement de sorgho avec les résidus restitués sous formes de compost (380 kg ha⁻¹) ont été de +52 ; +44 et +37 pc, respectivement par rapport à l'abandon, le brûlis ou l'exportation des résidus des cultures.

6.2.4. Evaluation agronomique des meilleures technologies dans les sites d'étude

Les analyses statistiques ont montré que les performances agronomiques des fumures organo-minérales (Fom) et du Di-ammonium phosphate (DAP) sur le mil n'ont pas été significativement différentes dans un même village. Cependant, lorsqu'on compare entre les sites l'effet d'une même technologie sur les rendements du mil ou de l'arachide, les rendements ont été significativement différents. Quelle que soit la technologie testée, le rendement de la culture décroît du site à faible densité (Ndaba) à celui à forte densité (Tala1). C'est ainsi que les meilleurs rendements du mil et de l'arachide ont été obtenus à Ndaba et Bébédjia (faible densité), suivi de Nguettél (densité moyenne) et enfin Tala1 (forte densité). L'expression de la performance des technologies proposées est donc étroitement liée à la pression anthropique sur la ressource terre. L'état de la fertilité des sols du site expliquerait le niveau de rendement du mil ou de l'arachide obtenu. Ce résultat suggère que les technologies proposées ne peuvent permettre aux cultures de bien exprimer leur potentiel de production que si le sol de ce milieu a un seuil acceptable de teneur en carbone (C). Ce seuil en C se situerait probablement autour de 6 g kg⁻¹ de sol. En effet, le DAP a amélioré de façon notable les rendements du mil et de l'arachide à Ndaba où la teneur en C se situe autour de 6 g kg⁻¹ de sol. Les travaux de Hien (2004) menés à Saria (Burkina Faso) ont permis de montrer qu'en dessous de 6 g C kg⁻¹ de sol dans l'horizon 0-20 cm, la productivité décroche. Selon Feller (1995), il existe une valeur seuil de C en deçà de laquelle la durabilité des agro systèmes soudano-sahéliens n'est plus assurée. Pour cet auteur, cette valeur est définie par l'équation suivante : $C \text{ (mg C g}^{-1} \text{ de sol)} = 0,37 (A + Lf)$ où $A + Lf$ = taux d'argile + limons fins (en pc). Cette formule n'est applicable que pour les sols dont le taux d'éléments fins ($A + Lf$) est compris entre 5 et 40 pc.

Contrairement aux analyses statistiques qui ont montré que les performances agronomiques des fumures organo-minérales (Fom) et du Di-ammonium phosphate (DAP) sur le rendement du mil ont été les mêmes dans un même site, la classification empirique des producteurs a révélé des différences significatives entre de ces effets des technologies. C'est ainsi qu'à :

- Ndaba, le Di-ammonium phosphate (DAP) a été la meilleure technologie, suivi de la fumure organo-minérale (Fom), puis le témoin (T). Les meilleurs rendements du mil et de l'arachide ont été toujours obtenus avec le DAP.

- Nguetté¹ et Tala¹, la fumure organo-minérale (Fom) a été la meilleure. Cela peut s'expliquer par le fait que dans ces sites, les teneurs des sols en matière organique sont plus faibles que celles observées sur les sols de Ndaba. En conséquence, les réponses des cultures suite à l'application du DAP ont été faibles. L'application conjointe de la fumure organique et minérale a augmenté la teneur des sols en matière organique. En conséquence, elle a favorisé une meilleure valorisation des engrais minéraux (NPKSB et urée) utilisés comme l'a souligné Sedogo (1993).

Il faut souligner que l'arrière effet du DAP sur l'arachide a été très net. Les arrières effets de la fumure Fom ont été aussi observés, mais elles ont été de moindre importance que celle du DAP. L'efficacité du DAP peut s'expliquer par l'augmentation de la disponibilité du phosphore du sol qui aurait contribué à l'amélioration substantielle de ce rendement de l'arachide. En effet, la capacité de la fixation de l'azote par les légumineuses, est fonction de la disponibilité du phosphore dans le sol (Walker et Syers, 1976, Ganry *et al.*, 1985).

Les principaux critères utilisés par les producteurs pour classer les technologies ont été : la taille (mil), la grosseur des tiges (arachide, mil), l'importance des feuilles sur la tige sèche (arachide) et la grosseur des graines produites par la culture. Selon les producteurs, les tiges et fanes sont aussi importantes que les graines produites par la culture. Les grosses tiges de mil servent aux usages domestiques tels que la construction des toits des cases, la clôture des concessions et comme source d'énergie. Quant aux fanes d'arachide, elles servent à l'alimentation du bétail surtout pendant la saison sèche où le fourrage est rare. De plus, lorsqu'elles sont consommées par les animaux de l'exploitant, elles servent à produire le fumier qui leur permet de fertiliser leurs champs. Ce résultat suggère que la production d'une technologie d'amélioration des productions agricoles dans les savanes tchadiennes ne doit pas seulement s'intéresser à l'augmentation des rendements des cultures par l'amélioration de la fertilité des sols mais, elle doit prendre en compte dans le processus de mise au point de ladite technologie les savoirs locaux paysans.

Conclusion partielle

L'étude a montré que Fm (50 kg ha⁻¹ NPK+50 kg ha⁻¹ urée) et Fom (5 t ha⁻¹/2 ans fumier+50 kg ha⁻¹ NPK+50 kg ha⁻¹ urée) sont meilleurs. Cependant, compte tenu des prix des engrais dus à la flambée des prix du pétrole et pour assurer une productivité durable du mil la formule Fom peut être proposée aux producteurs car elle est aussi bien appréciée par ces derniers. Elle est donc une technologie diffusable dans l'ensemble des savanes tchadiennes pourvu que la qualité actuelle du fumier produit dans les exploitations soit améliorée.

En outre, on a noté que les sols sont relativement pauvres en phosphore. Il est donc indispensable d'améliorer la fertilité des sols par des apports riches en cet élément.

L'utilisation Di-ammonium phosphate (DAP) peut corriger cette déficience si les teneurs en matière organique des sols sont moyennes. Pour diffuser cette technologie, un accent particulier doit être mis sur l'amélioration des teneurs des sols en matière organique. Aussi l'Etat doit rendre disponible et accessible cet engrais car il est pour le moment indisponible sur le marché local.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'amélioration de la productivité des terres cultivables pour une augmentation de la production agricole suffisante dans les savanes tchadiennes et par conséquent du Tchad est un défi majeur. Cette étude avait pour objectif d'étudier les effets des pratiques culturales et l'incidence des modes de gestion des fumures et des résidus de récolte sur la productivité des sols. Au terme de l'étude, les résultats obtenus permettent de tirer un certain nombre de conclusions.

La fertilité chimique des sols a varié en fonction des pratiques culturales des exploitants. Dans les exploitations où la pratique d'amélioration de la fertilité des sols à travers les jachères et des apports organiques ont été possibles, les teneurs en phosphore des sols sont relativement élevées. Cet élément corrèle positivement et significativement avec la matière organique des sols d'une part, et avec les rendements du sorgho et du mil d'autre part. Toute intervention en vue d'améliorer la productivité des céréales doit particulièrement contribuer à relever les teneurs des sols en phosphore et en matière organique des sols. Pour ce faire, l'intégration des jachères améliorées de courte durée et à haut potentiel de production de biomasse dans les systèmes de production est d'un grand intérêt.

Dans les savanes tchadiennes, les pratiques culturales paysannes se caractérisent par de faibles apports minéraux ou organiques conduisant à une baisse du pH des sols dans la plupart des systèmes de culture étudiés. En outre, ces apports ne compensent pas les exportations hors des parcelles des éléments nutritifs des sols car les teneurs en éléments minéraux ont aussi baissé. Les pratiques culturales ont également entraîné une baisse progressive de la matière organique des sols étudiés, les rendant ainsi sensibles à l'érosion.

Dans l'optique d'une agriculture productive et durable, l'utilisation conjointe des engrais minéraux et organique à des doses acceptables sont à encourager. L'application de la fumure minérale à raison de $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPK} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ urée}$ ou le Di-ammonium phosphate (DAP) ou encore une fumure organo-minérale avec $5 \text{ t ha}^{-1}/2 \text{ ans fumier} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPK} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ urée}$ permettent d'obtenir de meilleurs rendements. Cependant, compte tenu des prix des engrais minéraux eu à la flambée des prix du pétrole et pour assurer une productivité durable l'utilisation de la fumure organo-minérale est la solution la plus appropriée.

L'apport conjoint du fumier et des engrais minéraux a eu plusieurs effets bénéfiques sur le sol et les rendements des cultures. Le fumier grâce à l'apport de la matière organique a favorisé l'accumulation de l'azote dans le sol et l'augmentation des rendements des cultures. En conséquence, l'exportation du phosphore des sols par les cultures a aussi augmenté car il existe une interaction positive entre le phosphore et l'azote du sol.

L'utilisation de la fumure minérale seule, habituellement pratiquée par les producteurs, conduit à l'épuisement rapide des terres et leur acidification. Cette pratique peut à terme entraîner l'appauvrissement des sols en bases échangeables, notamment les cations calcium et magnésium. L'application aux cultures de la matière organique, source d'azote et gage d'une valorisation efficiente des engrais minéraux est donc indispensable pour une production durable dans les savanes tchadiennes.

Quel que soit le type de fumure appliqué aux cultures, les rendements des cultures et les caractéristiques des sols ont été affectés après la mise en culture des terres. Les teneurs en carbone du sol ont diminué dans l'ensemble des traitements étudiés, mais la baisse observée dans le traitement où est appliquée la fumure organique a été relativement faible au terme des trois années d'étude. Ce résultat suggère que l'application continue du fumier tous les 2 ans sur les parcelles peut contribuer à améliorer les teneurs en carbone des sols.

Le fractionnement granulométrique a révélé que quelque soit le type de fumure appliqué, la fraction grossière (F_{200}) contient moins de carbone que la fraction fine (F_0). Or c'est dans cette fraction (F_{200}) que la matière organique se dégrade facilement. Tout se passe comme si lors de la mise en culture des sols, la minéralisation de matière organique dans la fraction grossière des sols se fait au profit de la fraction fine des sols. Cette observation est corroborée par les coefficients d'enrichissement en carbone. Ce résultat suggère que dans les savanes tchadiennes, la majorité de ce carbone est séquestré par les particules fines F_0 . L'évolution de ce compartiment organique revêt alors une importance écologique car il peut contribuer dans une certaine mesure à la séquestration du CO_2 de l'atmosphère qui est d'un grand intérêt pour une agriculture durable.

Sur les activités biologiques des sols, la fumure organo-minérale a entraîné un dégagement de CO_2 relativement important et donc de l'activité respiratoire du sol qui est d'autant important que lorsque le sol est riche en matière organique. La biomasse microbienne

est particulièrement importante dans les sols où a été appliquée la fumure organique. L'application de la fumure organique a donc stimulé la biomasse microbienne. L'importance de la biomasse microbienne du sol, après apport du fumier est liée à la disponibilité du carbone dans cet amendement. L'activité microbienne peut également s'expliquer par le fait que l'apport de la matière organique à travers le fumier a relevé le pH des sols qui était faiblement acide à neutre et qui ne favorisait pas l'activité microbienne du sol.

Il ressort de l'analyse des effets des fumures sur les rendements des cultures que le Di-ammonium phosphate améliore nettement les rendements du mil et de l'arachide. Cependant, les cultures ne répondent bien à l'apport du Di-ammonium phosphate que lorsque la teneur en matière organique du sol a atteint un certain seuil qui se situerait au dessus de 6 g kg^{-1} de sol. Cet engrais ne peut donc être diffusé que dans des zones où la pression anthropique sur les terres est encore faible comme la zone de Ndaba. Une autre contrainte majeure pour cet engrais est son indisponibilité sur le marché local. Son coût risque aussi de le rendre inaccessible aux producteurs. Pour diffuser cette technologie, l'Etat doit prendre des mesures d'accompagnement telles que l'octroi des subventions aux producteurs et commerçants. En revanche, la fumure organo-minérale ($5 \text{ t ha}^{-1} / 2 \text{ ans} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NPKSB} + 50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ urée}$) est facilement accessible et bien appréciée par les producteurs. Elle est donc diffusable dans la quasi-totalité des savanes tchadiennes pourvu que la qualité actuelle du fumier soit améliorée.

Une autre alternative pour l'amélioration des rendements des cultures consisterait à transformer les résidus des récoltes et les restitués dans les parcelles cultivées sous formes de compost. En effet, l'étude a montré que des améliorations notables des rendements du mil, de sorgho et de l'arachide ont été observées lors que les résidus de récolte ont été transformés et restitués dans les parcelles cultivées sous formes de compost. Ces résultats soulignent le rôle que joue la matière organique dans la production végétale dans les savanes tchadiennes.

Par à rapport aux hypothèses de départ, on peut dire que :

- le diagnostic des exploitations a permis de mettre en exergue les contraintes à la production agricole dans les savanes que sont le faible niveau d'équipement agricoles des exploitations et la dégradation des sols due à la forte pression anthropique sur les terres dans certaines zones ;

- les pratiques culturales paysannes dans les savanes tchadiennes a entraîné un appauvrissement des sols qui s'est traduit par la baisse des teneurs en matière organique et une acidification des sols les rendant ainsi sensibles à l'érosion ;
- l'application conjointe du fumier et des engrais minéraux aux sols, le recyclage et la restitution des résidus de récolte améliorent la fertilité des sols et les rendements des cultures. De plus le Di-ammonium phosphate utilisé seul améliore aussi de façon notable les rendements du mil et de l'arachide, mais pour une valorisation efficiente par ces cultures des nutriments qu'il apporte au sol, ce dernier doit avoir un certain seuil de matière organique.

L'étude a aussi suscité des questionnements qui nécessitent d'autres investigations. Aussi, les perspectives suivantes de recherches peuvent-elles être envisagées. Il s'agit notamment :

- de la durabilité des technologies proposées par une étude à long terme de ses effets sur les caractéristiques physiques chimiques et biologiques des sols et les rendements des cultures ;
- de l'établissement du seuil de matière organique des sols qui permet de rendre efficiente l'utilisation par les cultures le Di-ammonium phosphate en fonction des types de sol ;
- de la nature des espèces à forte production de biomasse et leur intégration dans les systèmes de production pour relever les teneurs en matière organique des sols.
- de la méthodologie d'amélioration de la qualité chimique de fumier produit actuellement dans les savanes tchadiennes ;
- de la typologie des argiles en zone des savanes tchadiennes ;
- de l'étude de l'importance de l'arbre dans les champs et la pratique de l'agriculture de conservation afin d'améliorer la fertilité des sols ;
- de l'étude de la rhizosphère et de l'ensemble de la chaîne tropique de celle-ci et pouvant contribuer à améliorer la fertilité des sols ;
- de l'amélioration des activités biologiques des sols par l'inoculation de ce milieu.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdoulaye A. A, Hofs J. L, Mergeai G., 2006.** Relever les défis environnementaux pour les filières cotonnières d'Afrique de l'Ouest et du Centre. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 10 (4): 351–359.
- Agbenin J.O., Goladi J.T., 1997.** Carbon, nitrogen and phosphorus dynamics under continuous cultivation as influenced by farmyard manure and inorganic fertilizers in the savanna of northern Nigeria. *Agric. Ecosyst. Environ.* 63 : 17-24.
- Alletto L., Coquet Y., Roger-Estrade J., 2010.** Two dimensional spatial variations of soil physical properties in two tillage systems. *Soil Use Manage* 26 : 432-44.
- Amelung W., Flach K.W., Zech W., 1999.** Lignin in particle size fractions of native grassland soils as influenced by climate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63 : 1222 – 1228.
- Anonyme, 2010.** Les données statistiques sur les engrais importés et besoins des producteurs de la zone cotonnière du Tchad, 2 p.
- Asako M., 2010.** Long-term effects of legume rotation on sorghum yield and soil fertility in the semi-arid tropics in West Africa. Doctoral thesis, *Department of Global Agricultural Sciences, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo*, 158 p.
- Asmi S., 2006.** Influence des modes de gestion de la fertilité des sols sur l'activité microbienne dans un système de culture de longue durée au Burkina Faso. Thèse de Docteur d'Etat ès Sciences Naturelles, option : Système de production végétale, spécialité : Sciences du sol, Institut de Développement Rural/Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 191 p.
- Schlecht E., Buerkert, A., 2004.** Organic inputs and farmers' management strategies in millet fields of western Niger. *Geoderma* 121: 271-289.
- Aune J.B., Bationo,A., 2008.** Agricultural intensification in the Sahel - The ladder approach. *Agric. Syst.* 98 : 119-125.
- Autfray P., 2002.** Effets de litières sur l'offre en azote d'origine organique dans des systèmes de culture de maïs à couvertures végétales. Etude de cas dans la zone à forêt semi-décidue de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat en Biologie Intégrative. Option : Sciences du Sol/ Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France, 108 p.

- Aweto A.O., Obe O., Ayanniyi O.O., 1992.** Effects of shifting and continuous cultivation of cassava intercropped with maize on a forest aflisol in south-western Nigeria. *Journal Agricultural Science* 118 : 195-198.
- Bacyé B., 1993.** Influence des systèmes de culture sur le statut organique des sols et la dynamique de l'azote en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doct. Université Aix-Marseille III, 243 p.
- Badiane A.N., 1993.** Le statut organique d'un sol sableux de la zone Centre-nord du Sénégal. Thèse de Doctorat INPL-ENSAIA, Nancy, 200 p.
- Bado B. V., Sedogo M. P., Cescas M. P., F. Lompo et A. Bationo., 1997.** Effets à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*. Vol. 6 (6) : 571 – 575.
- Bado B. V., 2002.** Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Ph D, Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, option : sols et génie agroalimentaire/ Université de Laval, 197 p.
- Bado B. V., Bationo A., Cescas M.P., 2006.** Assessment of cowpea and groundnut contributions to soil fertility and succeeding sorghum yields in the Guinean savannah zone of Burkina Faso (West Africa). *Biol Fertil Soils*. DOI 10.1007/s00374-006-0076-7.
- Balesdent J., Mariotti A. et Guillet B., 1987.** Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biol. Biochem* 19: 25-30.
- Balesdent J., Chenu C., Balabane M., 2000.** Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, N°35 : 215-230.
- Bationo A., Mkwunye A.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. *Fertil. Res.* 29: 117-125.
- Bationo A., Buerkert A., 2001.** Soil organic carbon management for sustainable land use in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 61: 131-142.
- Bationo A., Kihara J., Vanlauwe B., Waswa B., Kimetu J., 2007.** Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosyst. *Agric. Syst.* 94: 13-25.
- Bationo A., Lompo F., Koala S., 1998.** Research on nutrient flows and balances in west Africa: state-of-the-art *Agriculture, Ecosystems and Environment* 71 (1998): 19-35

- Bationo A., Ntare B. R., 2000.** Rotation and nitrogen fertilizer effects on pearl millet, cowpea and groundnut yield and soil chemical properties in a sandy soil in the semi-arid tropics, West Africa. *Journal of agricultural Science* 134 : 277-284.
- Bationo A., Nandwa S.M., Kimetu J.M., Kinyangi J.M., Bado B.V., Lompo F., Kimani S., Kihanda F., Koala S., 2004.** Sustainable intensification of crop-livestock systems through manure management in eastern and western Africa: Lessons learned and emerging research opportunities. *Sustainable crop-livestock production in West Africa* : 173-198.
- Batjes N.H., 1996.** Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European. J. Soil Sci*, 47 : 151-163.
- Ben H.H., Aloui T., Gallali T., Bouzid T., Elamri S., Ben H.R., 2008.** Evaluation quantitative et rôles de la matière organique dans les sols cultivés en zones subhumides et semi-arides méditerranéennes. *Agrosolutions* 19 (2) : 4-17.
- Berger C. M., Bélem C., Dakouo C. D., Hien V., 1987.** Le maintien de la fertilité des sols dans l'Ouest du Burkina Faso et la nécessité de l'association agriculture élevage. *Coton et fibres tropicales*, 42 (3) : 201-210.
- Berger M., 1990.** La gestion des résidus organiques à la ferme. In *Savanes d'Afrique, Terres fertiles ? Actes des Rencontres Internationales, Montpellier 10-14 décembre 1990*, p 293-313.
- Berger M., 2006.** L'amélioration de la fumure organique en Afrique soudano - sahélienne. 8 fiches techniques. Numéro hors –série. *Agriculture et Développement*, Montpellier, 58 p.
- Bernoux M., Arrouys D., Cerri C., De Alencastro Graça P.M., Volkoff B., Trichet J., 1998.** Estimation des stocks de carbone des sols du Rondônia (Amazonie brésilienne). *Etude et Gestion des Sols*, 5 (1) : 31- 42.
- Bilgo A., Hien V., Serpantie G., Masse D., Chotte J.L., Fournier J., Zaonerop P., 2002.** Matière organique et éléments minéraux déplacés par l'érosion hydrique sur des parcelles cultivées, en jachère, ou mixtes en savane soudanienne (Burkina Faso) : 208-222.
- Blanchard M., 2010.** Gestion de la fertilité des sols et rôle du troupeau dans les systèmes coton-céréales-élevage au Mali Sud. Thèse de doctorat en Sciences de l'Univers et Environnement/Université Paris-Est, Créteil, Val de Marne/France, 301 p.
- Blondel D., 1971.** Contribution à l'étude de la croissance-matière sèche et de l'alimentation azotée des céréales de culture sèche au Sénégal. *Agron. Trop.* 26 : 707-720.

Bonzi M., 2002. Evaluation et déterminisme du bilan de l'azote en sols cultivés du centre Burkina Faso : Etude par traçage isotopique ^{15}N au cours d'essais en station et en milieu paysan. Thèse de doctorat INPL-ENSAIA , Lorraine, 177 p.

Boserup E., 1970. Evolution agraire et pression démographique. Paris Flammarion, 218 p.

Boyadgiev T.G., 1980. Création d'un service des sols. Haute- Volta. État des connaissances des sols. DP/UPV/74/007. Rapport technique 1. Rome : PNUD/FAO.

Bray R.H. et Kurtz L.T., 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci., N°59 : 39-45.

Bremner J.M., 1965. Total nitrogen. In : C.A. Black(ed.) Methods of soil analysis, part 2. American Society of Agronomy 9: 1149-1178. Madison; WI.

Brock C., Fließbach A., Oberholzer H-R., Schulz F., Wiesinger K., Reinicke F., Koch W., Pallutt B., Dittman B., Zimmer J., Hülsbergen K-J., Leithold G., 2011. Relation between soil organic matter and yield levels of nonlegume crops in organic and conventional farming systems. J. Plant Nutr. Soil Sci. 2011, 174: 568–575.

Broudiscou L.P., Papon Y., Broudiscou A.F., 1999. Effects of minerals on feed degradation and protein synthesis of rumen micro-organisms in a dual effluent fermented, Reprod. Nutr.Dev., n°39: 255-268.

Buerkert A., Bationo A., Dossa K., 2000. Mechanisms of residue mulch-induced cereal growth increases in West Africa. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 346-358.

Buerkert A., Bationo A. et Piepho H.P., 2001. Efficient phosphorus application strategies for increased crop production in Sub-S. West Africa. Field Crops Research, n° 72: 1-15.

BUNASOLS (Bureau National d'Analyses des Sols), 1990. Normes d'interprétation pour l'appréciation de quelques caractéristiques chimiques des sols du Burkina Faso sur les 40 premiers cm. Fiche technique.

Cellule Economique de la République du Tchad. <http://www.cellule-economique-tchad.org/> Consulté le 12/02/12.

Centre International de Recherche et de Développement (CIRAD), 2009. La culture sur brûlis limite l'effet de serre. In Paronama médias du CIRAD n°504 du 15/01/09 : 15-17.

Chabalier P.F., 1976. Contribution à la connaissance du devenir de l'azote engrais dans un système sol-plante. Résultats d'essai portant principalement sur la culture du riz et du maïs en

zone ferralitique de Bouaké et Gagnoa (Côte d'Ivoire). Thèse de Docteur d'Ingénieur, Université d'Abidjan, 131 p.

Chaussod R., Nicolardot B., 1982. Mesure de la biomasse microbienne dans les sols cultivés. I- Approche cinétique et estimation simplifiée du carbone facilement minéralisable. *Revue d'écologie et de biologie des sols* 19 : 501-512.

Chaussod R., 1996. Qualité biologique des sols : évaluation et implication. *Etudes et gestion des sols*, 3 (4) : 261-277.

Chenu C., Le Bissonais Y., Arrouays D., 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci Soc Am J* 64 : 1479-86.

Christensen B.T., 2001. Physical fractionation of soil and structural functional complexity in organic matter turnover. *Eur. J. Soil Sci.*, 52 : 345-353.

Ciesielski H., Sterckeman T., Baliteau J.Y., Caria G., Goutier V., Willery J.P., 2008. Evolution du pH et de la CEC de sols du nord de la France en fonction des doses de chaulage (CACO₃). *Influence du carbone organique. Etude et gestion des sols*, 15 (53) : 161-170.

Cissé L., 1986. Etude des effets d'apport de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du Centre-Nord du Sénégal, INPL, Nancy, 184 p.

Cissé L., Vachaud G., 1988. Influence d'apports de matière organique sur la culture de mil et d'arachide sur un sol sableux au Nord-Sénégal. *Bilans de consommation, production et développement racinaire, Agronomie*, 1988 8 (4) : 315 – 326.

CNUCED (Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement), 2010. Rapport 2010 sur la technologie et l'innovation. Renforcer la sécurité alimentaire en Afrique grâce à la science, à la technologie et à l'innovation, 134 p.

CPCS (Commission de Pédologie et Cartographie des Sols), 1967. Classification des sols. Travaux de la Commission de Pédologie et Cartographie des Sols, (1963-1967). ENSA-Grignon, Laboratoire de Pédologie-Géologie, Paris, 96 p.

Crétenet M., 2005. Le diagnostic agronomique à Gandokossikana. Atelier de clôture du PARCOB, 8-9 juin 2005 Cotonou (Bénin), 16 diaporamas.

CSAO-CILSS (Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest-Comité Inter Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel), 2008. Profil sécurité alimentaire Tchad. Rapport finale, 23 p.

CSRE (Conseil Scientifique Régional de l'Environnement), 2003. Gestion des sols et apports de déchets organiques en Bretagne, 53 p.

Davet P., 1996. Vie microbienne du sol et production végétale. INRA Editions, 382 p.

Deen W., Kataki P.K., 2003. Carbon sequestration in a long-term conventional versus conservation tillage experiment. *Soil & Tillage Research* 74: 143-150.

De Ridder N., 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. Fertil. Res.* 26 : 299-310.

Djinodji R., 2008. Diagnostic agraire en zone cotonnière du Tchad « Cas du village de Nguetté1 », Mémoire de Master II. AgroParis Agritech/France, 76 p.

Djondang K., Havard M., 2010. De l'encadrement au conseil aux exploitations agricoles familiales : une évolution indispensable pour les zones cotonnières du Tchad et du Cameroun. *Revue canadienne d'études du développement* 31, nos 1–2 (2010): 79-92.

Dokalyo A., 2009. Deuxième Recensement Général de la Population et de l'Habitat au Tchad : les résultats sont connus. <http://www.cefod.org/spip.php>, consulté le 21 novembre 2009)<http://www.cefod.org>.

Dommergues Y., 1968. Dégagement telluriques de CO₂. Mesure et signification. *Ann. Inst. Pasteur* 115 : 627-656.

Dommergues Y., Mangenot F., 1970. Ecologie microbienne du sol. Eds. Masson, 795 p.

Dommergues Y., Duhaux, E., Hoang G. D., 1999. Les arbres fixateurs d'azote : Caractéristiques fondamentales et rôle dans l'aménagement des écosystèmes méditerranéens et tropicaux. Y. Dommergues (eds.). Édition espaces 34, Paris, 475 p.

DREM (Direction des Ressources en Eau et de la Météorologie), 2011. Fiches des données climatiques des années 1970-2010, 6 p.

DSA (Division de la Statistique Agricole), 2011. Fiches des données statistiques sur les productions agricoles du Tchad, Ndjamenà, 6 p.

Dubois J.M., 2005. La rédaction scientifique. Mémoires et thèses : formes régulières et par articles. Agence Universitaire de la Francophonie, Edition ESTEM, 117 p.

Dugué P., 1998a. Les transferts de fertilité dus à l'élevage en zone de savane. *Agriculture Développement* n°18: 99 – 107.

- Dugué P., 1998b.** 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., Gogou J., 2006.** La gestion de la fertilité. In *Mémento de l'agronome GRET*, CIRAD, MAE, p. 610 – 641.
- Enyong L.A., Debrah S.K., Bationo A., 1999.** Farmers' perceptions and attitudes towards introduced soil-fertility enhancing technologies in western Africa. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 53 : 177-187.
- ESSO Exploration and Production Chad Inc., 2007.** Rapport trimestriel (octobre – décembre 2007) du consortium d'exploitation du pétrole tchadien, 65 p.
- Eswaran H., Vanden B.E., Reich P., 1993.** Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci.Soc. Am. J.* 57 : 192-194.
- FAO (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture), 1982.** The estimation of crop areas and yields in agricultural statistics. *Economic and social Development Paper 22*. FAO, Rome.
- FAO (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture). 2003.** Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne. Rome 2003, 51 p.
- FAO., 2007.** Interaction entre agriculture et forêt. 20ème session, Comité de l'agriculture, Rome, 25-28 avril 2007, 4 p.
- Feller C., 1979.** Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Application aux sols tropicaux, à texture grossière, très pauvres en humus. *Cahiers ORSTOM Série Pédol.* Vol. XVIII n°4 : 339-346.
- Feller C., Guiraud G., Hetier J.M., Marol C., 1983.** Study by size fractionation of organic matter in a cultivated tropical soil fertilized with labeled crop residues (¹⁴C, ¹⁵N) and urea (¹⁵N). *Intern. J. trop Agri.*, 1 (2): 123-130.
- Feller C., 1994.** La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1. Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Thèse Doctorat Sciences Naturelles, Institut de Géologie de Strasbourg, 393 p.

Feller C., 1995. La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1 :1. Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Collection TDM n°144, 5 microfiches, ORSTOM, Paris.

Fening J. O., Dogbe W. and Danso S. K. A., 2001. Assessment of the potential to improve N fixation by cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in Ghanaian soils. *American Journal of Alternative Agriculture*; 2001; 16; 2: 57-65.

Foth H. D., 1990. Fundamentals of soil science. Henry, D. Foth (eds.), John Wiley & sons, New York, 336 p.

Franco I., Contin M., Bragato G., De Nobili M., 2004. Microbiological resilience of soils contaminated with crude oil. *Geoderma*, 121: 17-30.

Gandah M., Bouma J., Brouwer J., Hiernaux P., van Duivenbode N., 2003. Strategies to optimize allocation of limited nutrients to sandy soils of the Sahel: A case study from Niger, West Africa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 94 : 311-319.

Ganry F., 1990. Rôle des légumineuses dans le maintien et la régénération de la fertilité azotée des sols sableux tropicaux. *Agron. et ressources nat. en rég. Trop.*, 281-278.

Ganry F., Feller C., 1977. Effets de la fertilisation azotée (urée) et de l'amendement organique (compost) sur la productivité du sol et la stabilisation de la matière organique, en monoculture de mil dans les conditions des zones tropicales semi – arides. 243 p.

Ganry F., Diem H.G., WEY J. et Dommergues Y.R., 1985. Inoculation with *Glomus mosseae* improves N₂ fixation by field-grown soybeans. *Biol. Fert. Soil*, N°1 : 15-23.

Ganry F., Thuriès L., 2010. Fonction des matières organiques apportées au sol : enjeu et contraintes en situation de sécheresse. Disponible auprès de <http://uved-matorg.cirad.fr>. Consulté en août 2010.

Gerke J., 1993. Phosphate adsorption by humic/Fe-oxide mixtures aged at pH 4 and 7 and by poorly ordered Fe-oxide. *Geoderma*, 59 : 279-288.

Ghutiga P. M., Karugai J. T. et Nyikal R. A., 2007. Does use of draught animal power increase economic efficiency of smallholder farms in Kenya? *Renewable Agriculture and Food Systems* 22: 290-296.

Gil-Sotres F., Trasar-Cepeda C., Leiros M.C., Seoane S., 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.*, 37: 877-887.

Gnankambary Z., Sedogo M. P., Hien V., Lompo F., 1999. Détermination du facteur de correction de la méthode Walkley et Black pour le dosage du carbone organique dans les sols ferrugineux tropicaux du Burkina Faso. In “Communication aux 5^e Journées annuelles”. Niamey. (Ed. SOAChim) p, 5 p.

Gnankambary Z., Bayala J., Malmer A., Nyberg G., Hien V., 2007, Decomposition and nutrient release from mixed plant litters of contrasting quality in an agro forestry parkland in the south-Sudanese zone of West Africa, *Nutrient Cycling in Agro ecosystems*, 82: 1-13.

Gray C.L., 2005. What kind of intensification? Agricultural practice, soil fertility and socioeconomic differentiation in rural Burkina Faso. *The Geographical Journal* 171: 70-82.

Guggenberger G., Christensen B.T., Zech W., 1994. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil. 1. Lignin and carbohydrate signature. *European Journal of Soil Science*, 45: 449-458.

Guibert H., 1993. Rapport annuel 1992 /1993 de la Station de Bébédjia, Section d’Agronomie, volet fertilité des sols, 146 p.

Guilbault P., 2006. Impact des pratiques culturales sur la vie du sol. 8 p.

Haque M. A., Umar, B. et Kawuyo U. A., 2000. A preliminary survey on the use of animal power in agricultural operations in Adamawa State, Nigeria, *Outlook on Agriculture*, Vol.29(2): 123-127.

Hauswirth D., Naitormbaide M., 2004. Modes de gestion de la fertilité en zone soudanienne du Tchad/ *Gestion Intégrée des écosystèmes*, 252 p.

Hauswirth D., Djonodji R., 2006. Diagnostic de la filière coton au Tchad. Perspectives et privatisation. Etude conduite en 2005. Ndjaména, 75 p.

Haynes R. J., 1986. Origin, distribution and cycling of nitrogen in terrestrial ecosystems. In: *Mineral nitrogen in the plant-soil system*. R. J. Haynes(Ed.) 1-15, Academic Press, Orlando.

Hibra-Sangue V., 2004. Gestion durable de la fertilité des sols sahéliens: stratégies adaptatives des paysans du plateau central du Burkina Faso face à la variabilité climatique. Cas de la province du Zandoma. Mémoire DESA, Université Abdou Moumouni, Niger, 79 p.

Hien V., 1990. Pratiques culturales et évolution de la teneur en azote organique utilisable par les cultures dans les sols ferrallitiques du Burkina Faso. Thèse de Docteur de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy-France; Spécialité: Sciences agronomiques, option Agro pédologie, 149 p.

Hien., Ganry F., Hien V., Olivier R., 2003. Dynamique du carbone dans un sol de savane du Sud-Ouest Burkina sous l'effet de la mise en culture et des pratiques culturales in Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, mai 2002, Garoua (Cameroun). 11 p.

Hien E., 2004. Dynamique du carbone dans un Acrisol ferrugineux du Centre Ouest Burkina: Influence des pratiques culturales sur le stock et la qualité de la matière organique. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Ecole Doctorale Biologie Intégrative. 147 p.

Hien V., Floret C., 2005. Résultats de recherches transférables en milieu paysan dans 5 Pays d'Afrique de l'Ouest. L'expertise collégiale du projet jachère. U.E/CORAF. 110 p.

IFDC (International Fertilizer Development Centre), 2008. Africa Fertilizer Situation, January, 2008, 91 p.

INERA (Institut de l'Environnement de Recherches Agricoles), 2000. Bilan de 10 années de recherches 1988-1998. Document MESSRS/CNRST/ Burkina Faso, édition CTA. 115 p.

INSEED (Institut National de la Statistique des Etudes Economiques et démographiques), 2009. 2^e Recensement Général de la Population et de l'Habitat, 87 p.

Jamin J.Y., Gounel C., Bois C., 2003. Agriculture et développement rural des Savanes d'Afrique Centrale. Atlas. CIRAD, PRASAC. ISBN CIRAD 2-87614-545-6, ISBN CORAF 2-9520141-1-6.

Jenkinson D.S. and Powlson D.S., 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method for measuring soil biomass. Soil Biol. Biochem. 8 (3): 209-213.

Jones S., 2009. Gestion durable des terres en Afrique subsaharienne : Politiques et financement. Conclusion et conseil pour les interventions. Version 1.0, août 2009, (eds) Mécanisme Mondial de l'UNCCD et la FAO. Projet final.

Jouve P., 1992. Le diagnostic du milieu rural de la région à la parcelle. Approche systématique des modes d'exploitation agricole du milieu. CIRAD-CA, Montpellier, 39 p.

Koulibaly B., Ouola T., Déhou D., Prosper N. Z., 2009. Effets des amendements locaux sur les rendements, les indices de nutrition et les bilans culturaux dans un système de rotation coton-maïs dans l'ouest du Burkina Faso. Biotechnol. Ag. Soc. Environ. 2009 13(1) : 103-111.

Koulibaly B., Ouola T., Déhou D., Prosper N. Z., Bondé D., 2010. Effets de la valorisation des résidus de récolte sur la nutrition minérale du cotonnier et les rendements d'une rotation coton-maïs-sorgho dans l'Ouest du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 4(6) : 2120-2132.

Koulibaly B., 2011. Caractérisation de l'acidification des sols dans la gestion de la fertilité des agro systèmes cotonniers au Burkina Faso. Thèse, Option science appliquée/spécialité agro pédologie, Université de Ouagadougou/Burkina Faso. 155 p.

Lal R., 2000. Land Use and Cropping System Effects on Restoring Soil Carbon Pool of Degraded Alfisols in Western Nigeria. In 'Advances in Soil Science'. (Eds R. Lal, J. M. Kimble and B. A. Stewart) pp. 157-165. (CRC Press LLC: New York).

Lavigne-Delville, 1996. Gérer la fertilité des terres dans les pays du Sahel. Diagnostic et Conseil aux paysans. Collection « Le Point sur », 397 p.

Lawane G., Sougnabé S.P., Lenzemo V., Gnokréo F., Djimasbeye N., Ndoutamian G., 2009. Efficacité de l'association des céréales et du niébé pour la production de grains et la lutte contre *Striga hermonthica* (Del.). PRASAC, Savanes africaines en développement : innover pour durer Colloque Maroua (Cameroun), du 20 au 23 avril 2009, 8 p.

Le Bourgeois T., 1993. Les mauvaises herbes dans la rotation cotonnière au nord- Cameroun. Thèse de doctorat, Université Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier II. 249 p.

Lompo F., 1995. Etude de cas au Burkina Faso de l'initiative phosphates naturels. INERA/Burkina Faso, Rapport de travail. 36 p.

Lompo F., 2009. Effets induits des modes de gestion de la fertilité sur les états du phosphore et la solubilisation des phosphates naturels dans deux sols acides du Burkina Faso. Thèse d'Etat, mention Sciences de la Terre et des Ressources Minières Sciences naturelles, option Agro-pédologie /Université de Cocody (Côte d'Ivoire), 251 p.

Mando A., Ouattara B., Sedogo M P., Stroosnijder I., Ouattara K., Brussaard I. et Vanlauwe B., 2005. Long-term effect of tillage and manure application on soil organic fractions and crop performance under Sudano-Sahelian conditions. *Soil Tillage Res.* 80: 95-101.

Mando A., Brussaard L., Stroosnijder L., 1999. Mulch and termite mediated rehabilitation of crusted sahelian vegetation. *Restoration Ecology* 7: 33-41.

- Martin A., Mariotti A., Balesdent J., Lavelle P. et Vuattoux R., 1990.** Estimate of organic matter turnover rate in a savanna soil by ^{13}C natural abundance measurements. *Soil Biology et Biochemistry* 22 (4): 517-523.
- Masto R. E., Chonkar P. K., Purakayaska T. J., Patra A. K., Singh D., 2008.** Soil quality indices for evaluation of long-term land use and soil management practices in semi-arid sub-tropical India. *Land Degrad. Develop.* 19(5): 516-529.
- Mbétid-Bessane E., Havard M., Djondang K., 2006.** Évolution des pratiques de gestion dans les exploitations agricoles familiales des savanes cotonnières d'Afrique centrale Cahiers Agricultures vol. 15, n° 6, 2006 : 555-561.
- Megie C., 1974.** Note sur l'évolution de la fertilité des sols, résultats de l'expérimentation et impératifs qui en résultent. IRCT, 33 p.
- Merle A., Baskali N., Lanteri P., Ngaram N., 2007.** L'environnement au Tchad, 7 p.
- Michels K., Biolders C.L., 2005.** Pearl millet growth on an erosion-affected soil in the Sahel. *Exp. Agric.* 42 : 1-17.
- Ministère de l'Agriculture, 2005.** Schéma Directeur Agricole (2006 – 2015) et plan d'actions. Version finale juin 2006. Ndjaména, Tchad, 88 p.
- Ministère du Développement Rural et CIRAD, 1996.** Projet d'appui aux structures rurales de la zone soudanienne du Tchad (4 tomes), CIRAD / SAR n° 81 / 96.
- Mokwunye A. U., De Jager A., Smaking A. M. A., 1996.** Restoring and maintaining the productivity of West African soils. Key to sustainable development IFDC.
- Morel R., 1996.** Les sols cultivés, 2^e édition, Technique et documentation, 1996, ISBN : 2-7430-0149-6, 2^e édition. Paris 11 rue, Lavoisier F 75384 Paris cedex08, 389 p.
- Morant P., Reneaud H., Gounel C., Grellet G., Guillobez S., Lherbet A., 1996.** Base de données géographiques pour la mise en place des pôles régionaux de recherche. Savanes d'Afrique centrale, PRASAC. Montpellier, CIRAD, PRASAC, 31 p.
- N'dayegamiye A., Coté D., 1996.** Effets d'application à long terme de fumier de bovins, de lisier de porc et de l'engrais minéral sur la teneur en matière organique et la structure du sol. *Agrosol* .(9) 1 : 31-35.

- Nacro H.B., Asimi S., Ouattrra B., Somé N.A., Lompo F., Ouédraogo A., 2005.** Dynamics of soil organic matter in sudanian fallows: distribution of organic and microbial activity in different size classes. *Journal des Sciences* Vol. 5 n° 1: 7-14.
- Nacro H.B., Benest D., Abbadie L., 1996.** Distribution of microbial activities and organic matter according to particle size in a humid savanna soil (Lamto, Côte d'Ivoire). *Soil Biology and Biochemistry*, 28 (12): 1687-1697.
- Nacro H. B., 1997.** Hétérogénéité de la matière organique dans un sol de savane humide (Lamto, Côte d'Ivoire): caractérisation chimique et étude in vitro, des activités microbiennes de minéralisation du carbone et de l'azote. Thèse de Doctorat Spécialité Ecologie Générale. Paris IV. 302 p.
- Naitormbaide M., 2007.** Effets des pratiques paysannes actuelles de gestion de la fertilité sur les caractéristiques physico-chimiques et la productivité des sols de savanes du Tchad: cas de Nguétté I et Gang. Mémoire de DEA, Sciences du sol, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 106 p.
- Naitormbaide M., Lompo F, Gnankambary Z., Ouandaogo N., Sedogo M. P., 2010.** Les pratiques culturelles traditionnelles appauvrissent les sols en zone des savanes du Tchad. *Int. J.Biol. Chem. Sci.* 4(4): 871-881.
- Nuttens F., 2001.** La zone soudanienne du Tchad. Cédérom, ONDR/SCAC, Moundou/Tchad.
- Olina B.J-P., M'Biandoum M., Ekorong J.A. et Asfom P., 2008.** Evolution de la fertilité des sols dans un système cotonnier céréales au Nord Cameroun: diagnostic et perspectives *Tropicultura*, 2008, 26, 4 : 240-245.
- Ouattara B., 1990.** Etude des effets des divers substrats organiques sur les propriétés physico-chimiques d'un sol ferrugineux tropical du Burkina Faso. Université Nationale de Côte d'Ivoire, DEA d'Ecologie Tropicale, option : végétale, 62 p.
- Ouattara B, Sedogo M. P., Ouattara K., 1991.** Effets des techniques culturelles sur l'alimentation hydrique du sorgho et le bilan minéral du sol dans le plateau central du Burkina Faso. Communication au Séminaire International sur la gestion agro climatique des précipitations, Bamako, 9-13 déc. 1991, 16 p.
- Ouattara B., 1994.** Contribution à l'étude de l'évolution des propriétés physiques d'un sol ferrugineux tropical sous culture : Pratiques culturelles et états structuraux du sol. Thèse Docteur ingénieur, Université National de Côte d'Ivoire, Abidjan FAST, 158 p.

- Ouattara K., Ouattara B., Assa A., Sedogo P. M., 2006.** Long-term effect of ploughing frequency and organic matter input on soil moisture characteristics of a ferric Luvisol and a ferric Lixisol in Burkina Faso. *Soils and tillage Research* 88 : 217-224.
- Ouattara B., 2009.** Analyse-diagnostic du statut de la matière organique et de l'état structural des sols dans les agro systèmes cotonniers de l'Ouest du Burkina (Terroir de Bondoukui). Thèse d'Etat, spécialité systèmes de production végétale, option Sciences du sol, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso), 186 p.
- Pallo F., Sawadogo L., Sedogo P.M., 2000.** Effets des feux répétés sur la teneur en azote des sols dans la région Centre Ouest du Burkina Faso. *Sci. et Techn. Série Sciences naturelles et Agronomie* 24(1) : 92-108.
- Pallo F.J.P., Sawadogo N., Sawadogo L. et Sedogo P.M., 2008.** Statut de la matière organique des sols dans la zone sud-soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 12(3) : 291-301.
- Pallo F. J. P., Sawadogo N., Zombré N. P., Sedogo M. P., 2009.** Statut de la matière organique des sols de la zone nord soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 13(1) : 139-142.
- Pias J., 1970.** Les formations tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne (République du Tchad). Présentation de l'Esquisse géologique au 1/1000 000^e. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 1970 : 425-429.
- Pichot J., Sedogo M P., Poulin J F., Arrivets J., 1981.** Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux sous l'influence des fumures minérales et fumures organiques. *Agronomie Tropicale*. Vol 33, (2) : 122 – 133.
- Piéri C., 1989.** Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara 444 p.
- Powell J. M., Pearson R. A., and Hiernaux P. H., 2004.** Crop–Livestock Interactions in the West African Dry lands. *Agron. J.* 96 : 469-483 (2004).
- Quansah C., Drechsel P., Yirenyi B.B., Asante-Mensah S., 2001.** Farmers' perceptions and management of soil organic matter: A case study from West Africa. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 61: 205-213.

- Rebafka F.P., Hebel A., Bationo A., Stahr K., Marschner H., 1994** Short- and long-term effects of crop residues and of phosphorus fertilization on pearl millet yield on an acid sandy soil in Niger, West Africa. *Field Crops Res.* 36 : 113-124.
- République du Tchad, 2008.** Document de Stratégie de Croissance et de Réduction de la Pauvreté 2 (SNRP2), 337 p.
- Richard L., Djoulet D., 1986.** La fertilité des sols et son évolution. Zone cotonnière du Tchad. *Coton Fibre Tropical*, Sér. Documents, Etudes et Synthèse Supplément No. 6.
- Roose E., 1981.** Dynamique actuelles des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux. Travaux et documents de l'ORSTOM 130, pp. 569.
- Ros M., Hernandez M.T., Garcia C., 2003.** Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendments. *Soil Biol. Biochem.*, 35 : 463-469.
- Saar P. L., 1981.** Fertilisation minérale et organique du mil au Sénégal. 13 p.
- Sanchez P.A., Shepherd K.D., Soule M.J., Place F.M., Buresh R.J., Izac A.M.N., 1997.** Soil fertility replenishment in Africa: an investment in natural resource capital. In: *Replenishing soil fertility in Africa*. SSSA Special Publication number 51, pp. 1- 46.
- Same J., K., Bitom D., Volkoff B., 1990.** Matière organique et transformations structurales superficielles dans un sol ferrallitique rouge de la zone forestière du Cameroun *Cah. ORSTOM, sér. Pedol.*, 25 (3) : 231-241.
- Sedogo M. P., 1981.** Contribution à la valorisation des résidus cultureux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride (MOS et nutrition azotée des cultures). Thèse de Doctorat-Ingénieur Sciences agronomiques. Institut Polytechnique de Lorraine/Nancy, 195 p.
- Sedogo P.M., 1993.** Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de doctorat, mention Sciences naturelles (Agronomie-écologie-pédologie), Université de Cote d'Ivoire. 330 p.
- Segda Z., 2006.** Gestion de la fertilité du sol pour une production améliorée et durable du riz (*Oryza sativa* L.) au Burkina Faso. Cas de la plaine irriguée de Bagré. Thèse de Doctorat, Spécialité : Sciences Biologiques appliquées, option : Biologie, Ecologie végétales. Université de Ouagadougou (Burkina Faso), 164 p.
- Seguy L., Bouzinac S., Maronezz A. C., 2001.** Un dossier du semis direct. Système de culture et dynamique de la matière organique, 320 p.

- Serpantié G., 2003.** Persistance de la culture temporaire dans les savanes cotonnières de l'Afrique de l'Ouest. Etude de cas au Burkina Faso. Doctorat de l'INA-PG, Paris-Grignon, Département AGER, 344 p.
- Shumba E.M., 1984.** Animals and the cropping system in the communal areas of Zimbabwe. Zimbabwe Sci. News 18 : 99-102.
- Sissoko F., Autfray P., Rapidel B., 2007.** Effets du labour en culture attelée de systèmes à couvertures végétales sur la disponibilité de l'eau en début de saison des pluies au Sud du Mali. <http://agroecologie.cirad.fr>.
- Smith L.J. & Paul E.A., 1990.** The significance of soil biomass estimations. In: Bollag J.M. & Stotzky G., eds. Soil biochemistry. Vol. 6. New York, USA: Marcel Dekker, 357-396.
- Soltner D., 1986.** Les bases de la production végétale. Tome 1. Le sol 14^e édition. Collection sciences et techniques agricoles, 464 p.
- Soltner D., 1990.** Les bases de la production végétale. Tome I : sol 18^e édition. Collection Science et Technique Agricole, 467 p.
- Somé N. A., Traoré K., Traoré O., Tassemedo M., 2007.** Potentiel des jachères artificielles à *Andropogon* spp. Dans l'amélioration des propriétés chimiques et biologiques des sols en zone soudanienne (Burkina Faso). BASE. 2007 **11** (3): 245–252.
- Sosevile H., 2000.** Constraints to the adoption of animal power weeding technology in Tanzania' in Starsky, P. et Simalenga, T. (éds.) Animal power for weed control. Wageningen (Pays-Bas), Centre technique pour la coopération agricole et rurale.
- Station de Bébédjia, 2011.** Fiches des données climatiques des années 1970-2010, 46 p
- Stoorvogel JJ et Smaling E., 1990.** Assesment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa, 1983-2000. Vol.1 Main Report 28, DLO The Winang Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research (SC-DLO), Wageningen, The Netherlands, 137 p.
- Suzor H., 1991.** Evaluation et diagnostic de la fertilité. Projet Garoua (Cameroun). Phase I : campagne agricole 90/91. Montpellier, CIRAD-IRCT, 44 p.
- Tourte R., 1977.** Traditionnal african systems of agriculture and their improvement. In: Foofoocrops of the lowlands tropics. Oxford University Press, 345 p.

- Traoré M. F., 1974.** Etude de la fumure minérale azotée intensive des céréales et du rôle spécifique de la matière organique dans la fertilité des sols au Mali. *L'Agron. Trop.*, 29 (5) : 567-587.
- Traoré O., Traoré K., Bado B. V., Lompo D. J. P., 2007.** Crop rotation and soil amendments: impacts on cotton and maize production in a cotton based system in western Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 1 (2): 143-150.
- Traoré K., Toé A. M., 2008.** Capitalisation des initiatives sur les bonnes pratiques agricoles au Burkina Faso. Rapport de consultation, MAHRH/DVRD, Ouagadougou, 99 p.
- Van Der Pol F., 1992.** Soil mining. An unseen contributor to farm income in southern Mali. Bulletin 325, Royal Tropical Institute, 325, Amsterdam, 47 p.
- Van Raij B., Cantarella H., Quaggio J.A., Prochnow L. I., 2009.** Ion Exchange Resin for Assessing Phosphorus Availability in Soils, *Better Crop*, 93: 23-25.
- Van Reeuwijk L.P., 1993.** Procedures for soil analyses. Technical Paper n°9. Van Fourth Edition. Reeuwijk (ed). International Soil reference and Information Centre (ISRIC).
- Vullioud P., Mercier E., Ryser J.P., 2004.** Bilan de 40 ans d'essai portant sur différentes fumures organiques (Changins 1963-2033). *Revue Suisse d'agriculture*, 36(2): 43-51.
- Walkley A., Black I.A., 1934.** An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.
- Walker T.W., et Syers J.K., 1976.** The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, N°15: 1-19.
- Willey, R. W., 1979.** Intercropping - its importance and research needs. Part 1. Competition and yield advantages. *Field Crops Res.* 32: 1-10.
- Zombré N.P., 2003.** Les sols très dégradés « zipella » du centre nord du Burkina Faso : dynamique, caractéristiques morphologiques et impacts des techniques de restauration sur leur productivité. Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Université de Ouagadougou/Burkina Faso. 374 p.
- Zombré N. P., 2006.** Variation de l'activité biologique dans les zipella (sols nus) en zone subsahélienne du Burkina Faso et impact de la technique du zaï (techniques des poquets). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2006 10 (2) : 139 – 148.

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Les dix unités spatiales de la zone soudanienne du Tchad.

Annexe 2. Superficie (ha) emblavées en céréales, légumineuses et oléagineux en zone soudanienne du Tchad de 1996 à 2010.

Annexe 3. Rendements (kg ha^{-1}) des céréales, légumineuses et oléagineux en zone soudanienne du Tchad de 1996 à 2010.

Annexe 4. Productions (tonnes) de céréales, légumineuses et oléagineuses en zone soudanienne du Tchad de 1996 à 2010.

Annexe 5. Données climatiques (températures et pluviométrie) des sites d'étude.

Annexe 6. Questionnaire de caractérisation des pratiques de gestion des biomasses de la fertilité des sols.

Annexe 7. Superficie (ha) emblavées en céréales, légumineuses et oléagineux au Tchad de 1996 à 2010.

Annexe 8. Rendements (kg ha^{-1}) des céréales, légumineuses et oléagineux au Tchad de 1996 à 2010.

Annexe 9. Productions (tonnes) céréales, légumineuses et oléagineux au Tchad de 1996 à 2010.

Annexe 10. Tableau d'analyse de variance des caractéristiques des sols cultivés en arachide

Annexe 11. Tableau d'analyse de variance du bilan partiel

Annexe 12. Tableau d'analyse de variance de l'azote exporté

Annexe 13. Tableau d'analyse de variance du phosphore exporté

Annexe 14. Tableau d'analyse de variance des paramètres chimiques des sols

Annexe 15. Tableau d'analyse de variance du complexe absorbant

Annexe 16. Tableau d'analyse de variance des effets des fumures et des modes de gestion des résidus sur le rendement du mil en 2008 et 2010

Annexe 17. Tableau d'analyse de variance des effets des fumures et des modes de gestion des résidus sur les composantes du rendement du mil 2010

Annexe 18. Tableau d'analyse de variance des effets des fumures et des résidus des cultures sur le rendement de l'arachide

Annexe 19. Tableau d'analyse de variance des effets des fumures et des résidus des cultures sur le rendement du sorgho

Annexe 20. Tableaux des analyses de variance des rendements du mil obtenus avec le DAP et la fumure organo-minérale Fom, comparées traitement témoin.

Annexe 21. Tableaux des analyses de variance des rendements de l'arachide obtenus avec les arrières effets des formules DAP et Fom, comparées traitement témoin.

Annexe 1. Les dix unités spatiales de la zone soudanienne du Tchad.

Zone 1 Ouest du Mayo Kebbi Pays Moudang	La densité de population est moyenne. Elle varie de 30 à 60 habitants/km ² . Le peuplement est diversifié. Il est dominé par la population Moudang. Mais d'autres groupes comme les foubés et le guidar se sont également implantés. La présence de lacs importants est le support d'une activité de pêche lacustre fréquente dans les villages. L'élevage sédentaire est fortement développé, mais celui-ci est encore peu intégré à l'agriculture. La gestion pastorale environnante pose de plus en plus de problèmes, notamment vis-à-vis des espaces classés de la réserve de faune de Binder-Léré. La culture cotonnière est d'implantation ancienne.
Zone 2 * Centre de Mayo Kebbi Pays Toupouri et Moussey Nguetté 1	La densité de la population est moyenne à forte. Elle avoisine 60 habitants/km ² tout en décroissant du Nord au Sud. La culture de Berbére (sorgho de décrue) est fortement développée et met en valeur de très grands espaces de terres argileuses entre Pala et Fianga. Les agriculteurs sédentaires autochtones en majorité Toupouri et Moussey ont de tout temps accueilli les éleveurs transhumants dont certains se sont sédentarisés. Les relations entre eux ne sont généralement pas conflictuelles. Il existe un contrôle de l'accès aux pâturages exondés par les autorités locales, notamment par les chefs de canton.
Zone 3 * Kélo-Nord de Moundou Zone saturée et Système en crise Tala 1	Avec une forte densité de population (parfois > 100 habitants/km ²), la pression foncière est forte au niveau de ces espaces. Dans ces conditions, les jachères de longue durée et la savane typique a laissé la place à une végétation anthropique en parcs à karité et à Néré. Cette zone fait partie du vieux bassin cotonnier qui se prolonge jusque dans l'Ouest du Mayo Kebbi vers Gaya. La saturation déjà marquée, il y a plus de dix ans, a conduit à l'épuisement des sols et l'effondrement des rendements. Cette baisse de la production est notamment à l'origine de la fermeture de l'usine de Dohér. L'élevage transhumant est relativement peu présent dans cette zone pauvre en ressources fourragères, du fait de la disparition des parcours. L'arachide a été considérée pendant un certain temps comme une alternative possible pour se substituer au coton sur ces terrains épuisés. Devant le coût excessif de transformation, la filière industrielle fut abandonnée. Aujourd'hui l'arachide trouve un débouché local (graine, huile et pâte artisanale). Le seuil de capacité d'accueil de ces agro systèmes est dépassé, aussi observe-t-on des migrations de plus en plus massives des jeunes voire des communautés villageoises entières vers le Sud (en Zone 4 principalement Baïnamar et Tapol).
Zone 4 Moundou- Baïnamar Front pionnier et d'accueil	C'est une zone d'accueil encore peu peuplée (<15 habitants/km ²). Elle est couverte de forêt quasiment intacte, de ce fait les éleveurs transhumants sont peu présents à cause de la trypanosomiase qui menace les troupeaux. L'arrivée récente et massive des migrants amène à un défrichement de très grandes superficies. Dans cet espace, on est passé progressivement d'un système de culture itinérant à des modes d'exploitations révélateurs de stratégies de marquage de foncier beaucoup plus consommatrices de ressources. La déforestation qui accompagne cette dynamique d'exploitation agricole du milieu provoque le recul de la trypanosomiase. Le milieu devient alors favorable à la pénétration des éleveurs transhumants. Bien qu'il y ait encore de l'espace disponible, on risquerait de parvenir rapidement au seuil de saturation. La stabilisation étant possible autour de 30 habitants/km ² .
Zone 5 * Moundou-Doba Entre les 2 Logones Ndaba	C'est une zone de densité de population moyenne à forte variant de 30 à 60 habitants/km ² suivant un gradient décroissant du Nord au Sud. Cet espace est traversé par deux grands axes routiers bitumés qui lui donnent des avantages comparatifs certains par rapport à d'autres zones pour le développement économique et le développement des marchés. Du point de vue de l'occupation de l'espace, on estime qu'environ 50% des terres agricoles sont cultivées chaque année. Cette zone est considérée comme étant au seuil de l'équilibre. La production des céréales pourrait largement couvrir les besoins de la production locale, mais elle est commercialisée trop tôt, créant ainsi parfois des pénuries dans la zone. C'est une zone cotonnière où le coton est traité à l'usine de Doba. On observe une forme particulière de transhumance des éleveurs arabes sédentarisés et transhumants. L'exploitation pétrolière a fait évoluer de manière remarquable l'environnement socioéconomique et le système agraires.

Zone 6 Nord du Moyen Chari Zone dégradée	C'est une zone déstructurée en voie de régression. Cette ancienne zone de colonisation par le coton sur l'axe Doba-Lai-N'djaména connaît aujourd'hui une dégradation très avancée de sa fertilité. La production cotonnière est devenue marginale. L'exode des jeunes s'accroît ces dernières années vers le Sud (zone 7 et 8). Le réseau routier peu entretenu et la baisse de productivité des activités agricoles se combinent aux éléments précédents pour placer cette zone dans un isolement croissant. En dehors de l'exode, seul le développement des activités de chasse et de pêche sur les rives de l'Ouham et du Chari constitue une tentative d'adaptation à remarquer. C'est également par cet espace que les éleveurs sahéliens transitent pour gagner la zone soudanienne. Les conflits entre les agriculteurs et les éleveurs sont particulièrement violents dans la zone.
Zone 7 Sud de Koumra	Caractérisée par son parc arboré de néré et <i>Acacia albida</i> , cet espace joue le rôle de zone d'accueil d'agriculteurs migrants et de pasteurs, chassé du Nord par la sécheresse. Sa densité de population est encore moyenne (30 à 60 habitants/km ²) et décroît du Nord au Sud. Mais elle suit une croissance régulière. Cette zone a été marquée par une opération de modernisation agricole à la fin des années 1960. Celle-ci, outre le développement de la culture attelée qu'on lui attribue, aurait suscité également l'amorce d'un certain dynamisme socioprofessionnel dans le milieu agricole. Le coton est introduit dans cette zone plus tardivement qu'ailleurs. Des secteurs tels que Moïssala figuraient parmi les premiers producteurs de ce point de vue. Avec l'augmentation de la pression sur les ressources, on craint par contre une accentuation des conflits entre les agriculteurs sédentaires et les pasteurs nomades venus du Nord.
Zone 8 Extrême Sud de la Zone soudanienne, Région Montagneuse de Baïbokoum	Cette région montagneuse est de peuplement ancien et relativement dense (15 – 35 habitants/km ²). L'exploitation agricole est principalement axée sur le tabac comme culture de rente. C'est par conséquent une zone marginale pour la culture cotonnière. La mise en valeur agricole des terres est à l'origine de l'érosion en ravine relativement grave qui limite l'espace cultivable. C'est une région difficile d'accès. Ses perspectives de développement sont pour le moment très limitées.
Zone 9 Sud et Est de Sarh Zone d'accueil	Encore peuplée avec moins de 15 habitants/km ² , cette zone connaît une croissance démographique soutenue avec l'arrivée des migrants, en provenance de multiples zones en crise : Zone 3, Zone 5, Zone 6 et du reste ou de la RCA. Cet espace présente des enjeux importants pour les éleveurs transhumants. On observe une dynamique de sédentarisation assez marquée autour des bas fonds. Les systèmes de culture sont basés sur le développement deux cultures de rentes : le coton et l'arachide. Cette dernière ; commercialisée en tout début de saison sèche, permet le financement de la récolte du coton. Des possibilités d'écoulement porteur existent avec la proximité de la frontière centrafricaine. La culture du coton quant à elle, est en plein développement dans l'Est autour de Kyabé qui constitue une nouvelle zone pilote pour la Cotontchad.
Zone 10 Nord de l'axe Kélo- Béré-Lai Zone rizicole	La densité de population est moyenne à forte (30 à 60 habitants/km ²). Cette zone est caractérisée essentiellement par des sols hydromorphes et un système de culture basé essentiellement sur le riz de bas fond.

Annexe 2. Superficie (ha) emblavées en céréales, légumineuses et oléagineux en zone soudanienne du Tchad de 1996 à 2010.

Années	Mil	Sorgho	Berebére	Riz	Maïs	Fonio	Total céréale	Arachide	Niébé	Total légumineuse	Poids terre	Sésame	Total oléagineux
1996/1997	160000	355906	39600	62060	41570	1700	660836	235032	20726	259531	22789	235032	257821
1997/1998	140233	456979	44693	86812	25564	2219	756500	244022	16523	295030	24735	244022	268757
1998/1999	154700	378300	35271	75650	37970	1810	756300	224679	37792	268860	44661	224679	269340
1999/2000	151221	368379	32150	88875	59003	8245	627053	158370	25014	209921	30728	158370	189098
2000/2001	164712	356572	28383	84309	29272	886	657297	227477	66566	262156	22416	227477	249893
2001/2002	187212	416217	20065	83704	55008	2800	765006	82316	57788	316692	37255	234376	271631
2002/2003	180660	316300	23000	93430	57060	1000	671450	204826	47000	174672	30431	41757	72188
2003/2004	217891	344341	18326	99837	56114	5800	742309	232500	62762	282115	38380	41471	79851
2004/2005	212788	349726	38700	86881	58013	4185	750293	196900	26000	226340	31424	29440	60864
2005/2006	246406	347618	45950	96662	101498	0	838134	191601	40019	221041	31424	37337	68761
2006/2007	243840	504979	39300	92901	97731	*	*	250181	3750	978751	*	76499	76499
2007/2008	241028	520936	32000	66886	95905	*	*	286580	70420	956755	*	70766	70766
2008/2009	296100	341570	41000	82613	86975	*	*	212450	32200	848258	*	67800	67800
2009/2010	201288	507872	154060	111586	101632	*	*	332711	36091	1076438	10250	118752	129002
2010/2011	201997	549243	53400	128872	99155	*	*	383663	96922	1032667	17225	133468	150693
Moyenne	200005	407662,5	43059,87	89405,2	66831,3	2864,5	722518	230887,2	42638,2	493948,5	28476,568	129416,4	152198

* : données manquantes

Annexe 3. Rendements (kg ha⁻¹) des céréales, légumineuses et oléagineux en zone soudanienne du Tchad de 1996 à 2010.

Années	Mil	Sorgho	Berebére	Riz	Maïs	Fonio	Moyenne céréale	Arachide	Niébé	Moyenne légumineuses	Poids terre	Sésame	Moyenne oléagineux
1996/1997	686,4	663,3	1087,9	148,9	838,6	560,0	656,8	864,2	608,2	736,2	849,4	864,2	856,8
1997/1998	560,2	628,8	770,1	1285,6	627,5	560,2	343,8	871,9	571,8	721,8	878,3	871,9	875,1
1998/1999	553,0	668,6	886,7	1289,8	843,2	387,3	824,9	1171,1	485,6	828,4	873,4	1171,1	1022,3
1999/2000	617,2	714,4	804,4	1693,6	731,4	275,3	890,4	794,0	555,2	674,6	867,0	907,2	887,1
2000/2001	489,5	714,0	732,8	989,8	620,2	409,7	696,8	1055,7	569,1	812,4	958,3	1055,7	1007,0
2001/2002	586,3	673,9	888,3	1199,3	671,1	418,6	714,5	420,9	549,5	485,2	836,8	976,6	906,7
2002/2003	601,3	702,6	737,0	1351,5	697,2	350,0	765,8	990,6	500,0	745,3	877,2	422,3	649,8
2003/2004	668,6	758,3	803,5	1060,5	857,7	477,6	779,1	930,8	554,4	742,6	836,9	320,2	578,5
2004/2005	700,2	758,7	879,1	956,7	802,6	472,9	760,9	1106,4	417,5	762,0	872,2	399,1	635,6
2005/2006	704,8	767,3	797,7	1379,9	842,6	434,6	830,4	933,8	534,6	734,2	872,2	385,9	629,0
2006/2007	680,3	813,9	802,0	1040,0	880,6	*	*	800,5	500,0	650,2	462,4	376,5	419,5
2007/2008	706,9	680,4	1000,0	1277,4	941,3	*	*	1091,6	572,6	832,1	409,2	404,2	406,7
2008/2009	686,0	720,2	800,0	1496,0	821,4	*	*	1439,7	597,4	1018,5	*	372,1	*
2009/2010	518,7	729,3	768,3	957,5	824,1	*	*	990,0	598,4	794,2	*	381,6	*
2010/2011	706,9	583,4	560,4	746,8	512,9	*	*	1086,6	437,0	761,8	*	407,9	*
Moyenne	631,1	705,1	821,2	1124,9	767,5	434,6	726,3	969,9	621,1	753,3	799,4	621,1	*

* : données manquantes

Annexe 4. Productions (tonnes) de céréales, légumineuses et oléagineuses en zone soudanienne du Tchad de 1996 à 2010.

Année	Mil	Sorgho	Berebére	R paddy	Maïs	Fonio	T.céréales	Arachide	Niebé	T.légum	Sésame	Poids terre	T.oléagineux
1995/1996	85699	287260	34857	78444	30013	285	516558	206019	...	...	...	...	...
1996/1997	109818	236055	43079	9240	34862	952	434006	203119	12606	215725	203119	19356	
1997/1998	78553	287353	34419	111605	16042	1243	260077	212756	9448	222204	212756	21724	...
1998/1999	85556	252929	31276	97575	32015	701	623851	263124	18352	281476	263124	39009	
1999/2000	93337	263159	25862	150522	43152	2270	558302	125745	...	...	143670	...	...
2000/2001	80632	254597	20800	83449	18154	363	457995	240153	37882	278035	240153	21482	
2001/2002	109760	280505	17824	100389	36916	1172	546565	34650	31753	66403	228885	31176	
2002/2003	108632	222239	16950	126275	39780	350	514226	202900	23500	226400	17636	...	...
2003/2004	145692	261117	14725	105873	48129	2770	578306	216416	34796	251212	13280	32119	
2004/2005	148994	265320	34020	83121	46559	1979	570895	217856	10855	228711	11749	...	...
2005/2006	173666	266724	36655	133380	85520	...	695945	178911	...	...	14409	...	...
2006/2007	165880	410981	31520	96614	86065	...	791060,2	200265	1875	202140	28803	...	...
2007/2008	170386	354458	32000	85439	90277	...	732559,8	312818	40324	353141	28605	...	...
2008/2009	203111	246014	32800	123588	71440	...	676953,2	305870	19235	325105	25232	...	...
2009/2010	104416	370407	118362	106840	83751	...	783775,6	329369	21597	350966	45312	4740	50052
2010/2011	142789	320405	29925,5	96236	50859	...	640215,6	416895	42359	459255	54438	7049,2	61487
Moyenne	125433	286220	34692,1	99287	50846	1209	586330,6	229179	23429	266213	102078	22081,9	55769,533

Annexe 5. Données climatiques (températures et pluviométrie) des sites d'étude.

Annexe 5a. Données climatiques (températures et pluviométrie) de Bébédjia

Année	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	Cumul annuel
1970	0	0	5,1	53,6	70,4	154	348	250,2	273,4	1,7	0	0	
1971	0	0	10	45,6	32,9	103	367	284,6	110,2	44,9	0	0	997,9
1972	0	0	2	83	51	125	342	305,1	174,7	24,3	0	0	1107,5
1973	0	0	0	47,9	15,6	88,2	270	208,4	201,2	112,6	0	0	943,6
1974	0	0	1,3	24,6	111	194	251	229,7	172,7	61,8	0	0	1045,6
1975	0	0	29,2	65	167	195	195	277,2	337,3	106,4	0	0	1371,4
1976	0	6,5	1,5	30,5	71,1	109	305	315,1	84,3	97,6	3	0	1023,9
1977	0	0	1	16,7	60,7	88,4	208	254,1	102,8	13,3	0	0	745,3
1978	0	0	0	37,9	208	131	253	363,4	246,4	19,5	0	0	1259,3
1979	0	0	0,5	42	79,9	142	305	170,2	160,5	47,9	0,2	0	948,3
1980	0	0	0	20,4	65,6	188	445	355,8	199,4	61,7	0	0	1335,6
1981	0	0	0	53,5	110	79,1	311	315,6	185	35,3	0	0	1089,5
1982	0	0	14,6	16	115	263	210	263,2	97,7	44,8	0	0	1024,3
1983	0	0	0	0	24,5	108	212	167,7	135,6	9,8	0	0	657,3
1984	0	0	6,5	10,9	85,4	77	202	186,4	71	27	2,7	0	668,4
1985	0	0	49,2	8,3	87,1	136	273	196,4	128,5	29,6	0,1	0	908,2
1986	0	0	12,5	36,5	52,6	61,7	409	167,9	287,9	76,7	0	0	1104,7
1987	0	0	0	0	64,5	167	221	213,7	162,5	34	0	0	862,4
1988	0	0	0	34,2	84,1	140	285	206	239,6	58,8	0	0	1047,4
1989	0	0	0	76,6	39,5	192	295	195,8	196,9	113,1	0	0	1108,8
1990	0	0	0	16,2	109	150	290	336,5	205,2	43,1	0,6	0	1149,6
1991	0	9,9	0	61,4	191	99,5	111	237,6	161	93,2	0	0	964,7
1992	0	0	4,1	30,5	83	174	207	432,1	221,6	64,5	9,7	0	1226,7
1993	0	0	0	12,4	40,4	57,6	196	202,4	80,4	34,1	0,2	0	623,1
1994	0	0	29,2	17,6	36,9	127	352	441,7	292,5	26,8	0	0	1323,3
1995	0	0	11,5	40,8	132	147	302	203,9	169,2	87,1	13,6	0	1107,5
1996	0	0	0	108	108	89,9	193	294,4	238,8	54,5	0	0	1087,1
1997	0	0	6,5	133	109	154	239	204	115,7	41,4	37,3	0	1039,2
1998	0	0	0	26,9	35,4	125	413	351,3	153,3	68,3	5	0,4	1178,6
1999	0	0	0	36,7	60	134	146	199,5	215,8	224,9	0	0	1016,7
2000	0	0	7,5	0	32,5	96,4	234	273,3	120,1	32			796
2001	0	0	6,6	0,9	108	102	553	381,8	204,4	81,6	0	0	1438,2
2002	0	0	19	23,2	15,9	196	237	266	203,2	50	9,3	0	1019,4
2003	0	0	0	28,4	102	184	293	280,3	124,4	72,6	18,3	0	1103,2
2004	0	0	0	18	173	181	207	227	134,6	95,3	13,3	0	1047,8
2005	0	0	0	4,4	68,3	156	211	257,4	207,6	45,2	0	0	950,3
2006	0	0	0,2	22	71,9	129	203	456,8	228	45,7	30	0	1186,3
2007	0	0	0	17,3	141	263	215	350,5	216,8	81	2,2	0	1286,9
2008	0	0	16	73,9	116	112	245	510,7	353,8	111,3	0	0	1538
2009	0	0,1	0	17,3	100	196	166	332,5	203,5	134	0,2	0	1149,9
2010	0	0	0	17,2	87,5	136	365	402,9	240,5	328	0	0	1577
Moyenne	0,0	0,4	5,7	34,4	85,8	140,2	270,3	282,2	186,8	69,2	3,6	0,0	1076,5

• Température minimale enregistrée à la Station de Bébédjia de 1980 à 2010

Année	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
1980	15,5	15,7	16,2	25,3	16,9	20,8	21,8	21,5	21,7	21,5	18,5	15,3
1981	15,6	18,2	22,7	24	22,3	21,7	21,3	21,4	21,3	21,4	17,5	15,8
1982	17,1	18,7	23,2	23,5	22,9	22,4	22,7	21,5	21,7	21,1	17,3	15,6
1983	14,1	20	22,5	26,7	26,3	24	22,7	21,5	21,7	21,1	17,3	15,6
1984	16,6	14,5	20,2	21,4	22,7	22,1	21,4	22,9	22,2	21,7	19	17,4
1985	19,7	19,3	23,5	22,5	24,5	22,4	20,8	21,3	20,9	20,4	18,1	16,7
1986	17,1	21,6	24,1	24,8	25,4	23,5	21,4	21,4	21,3	21,8	18,9	16,3
1987	16,9	20,7	23,8	25,4	25,4	23,6	22,4	21,9	22,1	21,3	18	16,8
1988	18	20,5	24,7	25,9	24,9	22,9	22,1	22,3	21,9	22,5	17,8	17
1989	14,5	16,5	22,9	23,9	24	21,5	21,2	21,2	21,4	20,7	17,3	15,4
1990	18,3	17,5	22	26,2	24,3	22,9	21,9	22,3	22	22,4	20,3	20,3
1991	17,4	22,3	24,6	25,4	22,1	23	21,9	22	22,3	21,3	18,2	14,2
1992	16,1	19,1	25,7	24,9	23,5	23	22	21,5	21,5	22,5	15,4	14,6
1993	14,2	18,2	23	25,2	23	22,6	22,1	21,5	22,3	22,6	16,5	17,2
1994	20,5	20,1	23,7	25,6	24,1	23,6	22	21,9	22,8	22,1	16,6	16,8
1995	16,3	19,5	25,2	26,1	24,1	22,8	22,2	22	22,4	21,6	17,8	15,5
1996	16,7	20,5	23,9	25,9	24,2	22,9	22,5	22,3	22,4	23	19,9	15,6
1997	17,1	17,9	22,8	25,2	23,8	23,3	22,5	22,3	22,4	23	20,5	16,3
1998	17	20,8	23,2	25,7	25,9	21,4	22,1	22,7	22,4	23,4	19,2	15,3
1999	17,3	17,4	22,6	24,9	25,1	24	22,3	22,2	21,8	22	19,5	14,9
2000	16,1	16	22,5	25,2	25,2	23,2	21,2	21,8	21,9	22	18,3	15,4
2001	16,4	23	21,5	25,5	24,4	23,4	21,5	25	22,1	20,9	18,5	17
2002	15,5	19,1	21,3	25,1	24,8	23,2	22,3	21,8	21,9	20,2	18,1	15,5
2003	16,9	20,5	23,6	25,3	23,1	22,5	22,4	22	21,7	21,4	20,9	21,7
2006	17,8	20,2	23	24,9	23,7	23,6	24	21,8	22,5	22,1	18,9	15,4
2007	15,4	20,2	23,5	26	24,3	22,2	22,1	21,6	21,5	21,9	**	**
2008	16,9	18,4	24,1	23,5	24,2	22,9	21,4	21,5	21,7	21,5	17,7	19,5
2009	18,1	20,7	21,8	24	24,7	23	21,7	22,4	22,8	22,7	21,2	18,4
2010	17,3	21,2	24,1	27	24	24	22,7	22,6	22,5	22,1	20,9	17,2
Moyenne	16,8	19,3	23,0	25,0	23,9	22,8	22,0	22,0	22,0	21,8	18,5	16,5

• Température maximale moyenne (°C) à la Station de Bébédjia de 1980 à 2010

Année	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
1980	34,6	37,1	38,9	39,2	36,3	31,3	30,4	30,6	32,1	32,9	34,8	43,5
1981	32,7	36,6	39,8	39,1	34,4	33,1	30	30,5	33,3	33,2	33,7	35,2
1982	34,4	32,5	38,6	39,8	34,1	31,8	30,1	30,2	31,2	32,3	35,7	33,8
1983	29,3	35,8	39,1	40	38,8	33,6	31,1	30,1	31,6	33,7	35,5	35,3
1984	34,5	34,5	39,4	36,8	35,3	33,2	32,2	33,6	31,7	34,5	36,4	34,2
1985	36,6	35	38,5	40,1	38,5	32,4	31,6	30,6	31,4	34,8	37,2	37,2
1986	35,1	38,5	39,9	39,8	37,6	34,5	30,3	31,1	30,2	33	34,4	33,3
1987	35,8	37,9	39,2	39,7	38,3	33	31,4	30,1	31,8	33,8	36,5	35,9
1988	35,8	38,1	40	40,5	36,9	32,7	30,1	30,1	30,6	34,1	35,4	33,5
1989	37,7	36,5	38,4	39	36,4	31,3	30,2	31,3	31,5	35	36,2	33,3
1990	36,2	34,5	38,8	40,1	38,8	33,2	30	31,1	31,9	33,7	34,4	39,7
1991	37	40,1	40,3	36,2	31	31,7	30,2	30,9	32,9	33,3	36,6	34
1992	36,8	36,3	40	37,4	33,7	33	30,4	29,5	32	33,8	34	33,8
1993	34,8	37,4	39,5	37,7	35,1	34,1	30,7	29,6	32,1	36,3	34,5	34,8
1994	37,5	38	41,2	39,1	36,8	33	30,5	29,5	31,8	34,3	35,2	35,3
1995	34,7	38,1	39,1	39	35,8	32	31	31,2	32,6	31,9	35,1	35,4
1996	38,1	38,5	41,1	38,2	35,6	33,1	31,6	31,1	31,6	34,7	34,5	35
1997	36,5	35,8	38,9	36,8	34,9	33,2	31,6	32,1	31,6	34,7	35,9	35,1
1998	35,7	38,3	39,8	41,1	38,7	34,4	35,7	30,3	31,4	33,1	35,2	35,1
1999	36,4	38,5	41,3	40,7	37,1	34,9	31,8	30,7	31	31,3	35,8	35,2
2000	35,8	33,4	38,7	40,8	38	33,1	36,5	30,1	32,2	34,3	36,1	34,7
2001	35,2	38,5	41,3	40,1	37,1	34	31,4	30,8	31,6	33,7	36,3	36,4
2002	33,1	38,7	41,2	39,6	40	39,6	32	30,2	31,9	34,4	35,6	35
2003	36,7	40,3	40	40,8	38,6	33,2	32,6	31,3	31,1	33,5	35,6	34,9
2006	38,7	40,8	41,1	41,7	36,5	34,7	32	30,3	31,6	33,5	34,7	34,6
2007	34,9	39,1	41,4	40,7	36,4	**	31,4	30,2	31,6	34,1	36,2	35,5
2008	34	37,4	40,1	37,7	37,6	33,3	31,7	32,1	31,6	34,7	35,5	36,4
2009	37,2	49,1	39,4	39,5	37,3	33,9	33,4	31,9	32,7	33,3	35,5	36,4
2010	36,8	41,7	41,4	43,5	39,7	34,8	32,5	31,4	31,6	35,1	35,8	35,5
Moyenne	35,6	37,8	39,9	39,5	36,7	33,4	31,5	30,8	31,7	33,8	35,5	35,4

Annexe 5b. Données pluviométrique (mm) de l'aéroport de Doba de 1970 à 2010 (Ndaba)

Année	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Cumul annuel
1970	0	0	0	7,5	156	115	422	340	202	23	0	0	1265,2
1971	0	0	0	22	42	158	224	280	154	58	0	0	936,8
1972	0	0	0	33,1	111	110	252	288	199	61	0	0	1054,8
1973	0	0	0	12,1	62,9	148	285	251	171	130	0	0	1060,1
1974	0	0	0	29,5	80,2	193	253	186	199	113	12	0	1064,4
1975	0	0	20	45,1	70,8	128	170	302	265	127	0	0	1127,4
1976	0	0	0	35,8	72,7	155	223	172	151	103	7,5	0	919,8
1977	0	0	0	8,1	106	56,1	237	240	133	37	0	0	816,3
1978	0	0	24	39,1	95,7	106	234	320	170	**	0	0	988,5
1979	0	0,2	5	36,6	112	153	285	165	154	70	1,3	0	983
1980	0,5	0	2,9	28,7	88,4	181	334	313	169	59	3,4	0	1180,2
1981	0	0	1,1	55,4	107	102	275	297	196	35	1,3	0	1069,5
1982	0	0	7,5	19,4	109	192	219	301	148	72	0	0	1066,1
1983	0	0	0	0	114	81	260	256	107	0	0	0	817,1
1984	0	0	4,5	15,4	79,6	114	166	234	123	80	14	0	829,2
1985	0	0	8,4	9,4	64,8	168	319	90,4	144	18	0	0	821,1
1986	0	0	0	14,7	63,2	148	301	144	226	108	0	0	1005,6
1987	0	0	0	0	65,4	174	267	226	240	29	0	0	1001,2
1988	0	0	0	36,7	144	116	249	260	217	55	0	0	1077
1989	0	0	1,1	31,4	69,4	155	203	178	163	58	0	0	858,2
1990	0	0	0	25	107	190	161	292	179	84	0,1	0	1037,9
1991	0	0	4,5	62,3	174	104	244	244	81,3	152	0	0	1065,8
1992	0	0	35,7	14,7	33,5	89,1	322	269	190	68	0	0	1021,3
1993	0	0	0	36,3	72,9	70,5	188	122	133	57	0	0	679,8
1994	0	0	0	23,2	40,6	132	260	408	221	117	1,6	0	1203,4
1995	0	0	0	14,5	116	80,8	201	228	131	49	11	0	830,3
1996	0	0	0	41,5	120	111	181	191	272	58	0	0	973
1997	0	0	13,5	136	103	179	266	281	152	67	79	0	1274,1
1998	0	0	0	0	28,4	243	187	251	122	95	4,4	0	929,2
1999	0	0	2	16,5	63,7	155	122	271	239	254	0	0	1123
2000	0	0	0	28,5	70	140	191	158	129	53	0	0	768,1
2001	0	0	2,3	0	92,5	72,1	606	340	220	93	0	0	1426
2002	0	0	11	30	51,5	67	159	281	49	2	0	0	650,2
2003	0	0	0	8,5	107	301	275	361	151	78	14	0	1295,2
2004	0	0	0	25,8	179	90,5	143	177	**	83	23	0	720,6
2005	0	0	0	45	**	149	281	249	236	79	0	0	1039,2
2006	0	0	1,5	30	55,2	173	271	331	196	65	0	0	1122,4
2007	0	0	0	34,5	93,7	100	213	443	262	88	5	0	1239
2008	0	0	3,1	73,5	108	151	147	555	334	52	0	0	1422,8
2009	0	0	0	5,5	111	77,5	130	419	131	91	0	0	964,5
2010	0	0	0	17	**	139	227	161	137	**	**	**	681
Moyenne	0,012	0	3,612	28	90,8	136	243	265	177	75	4,4	0	1010

Annexe 5c. Données pluviométriques (mm) de Pala 1970 à 2010 (Nguetté1)

Année	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Cumul
1970	0	0	0	18,1	51,8	142,6	143	302,6	247,1	18,2	0	0	923,2
1971	0	0	0	8,1	99,8	118	182	381,6	160,5	48,5	0	0	998,8
1972	0	0	0	61,6	50	82,8	283	307,6	113,3	32,1	8,4	0	938,8
1973	0	0	0	35,3	84,7	123,8	121	304,1	163,6	25,6	0	0	858,3
1974	0	0	0	82,6	59,8	117,1	358	178,7	179	25,4	0	0	1000,3
1975	0	0	0	16	137,1	137,1	254	284	303,6	78	0	0	1209,4
1976	0	0	0	19,9	200,3	144,4	101	162,6	203	141	0	0	972,1
1977	0	0	0	0	73,2	159,3	182	133,1	101,7	9,9	0	0	659,1
1978	0	0	1,5	87,8	180	108,9	198	277	212,7	31,5	2,5	0	1100,3
1979	0	0	7,2	56	80,1	90,6	314	233,1	107,1	18,5	0	0	906,3
1980	0	0	0	16,3	52,8	151,8	374	287,7	217,3	49,5	0	0	1149,3
1981	0	0	0	47,4	97,7	70,2	276	280,2	164,2	31,2	0	0	966,8
1982	0	0	0	17,9	55,1	103,3	191	246,2	130,9	113	0	0	857,3
1983	0	0	0	0	40,2	180,2	164	312,6	108,4	5,3	0	0	810,4
1984	0	0	0	20,4	156,6	102,7	107	242,8	75,5	113	0,3	0	817,9
1985	0	0	6,7	3,6	119,9	131,4	234	227,2	129,8	0	0	0	852,5
1986	0	0	0	29,2	57,3	240,1	242	244,6	298,6	20,6	15,3	0	1148,1
1987	0	0	0	0	78	100,5	130	310	132,8	23	0	0	774,1
1988	0	0	0	17,3	111,2	115,4	241	288,5	357,6	4,7	0	0	1136
1989	0	0	0	18,9	76,7	111,1	315	202,2	120,5	89	0	0	933,2
1990	0	0	0	87,8	130	100,2	243	243,2	146,9	54,5	0,2	0	1006
1991	0	0	0	88,8	173	52,7	337	37,9	34,9	156	30,7	9,5	890,3
1992	0	0	19,7	24,7	98,7	91,1	194	196,5	335,6	114	16	0	1090,1
1993	0	0	6,9	26,6	29,7	214,2	175	268,6	184,6	47,1	27,4	4	956,6
1994	0	0	0	63,9	101,6	139,6	176	559,7	315,1	87,5	0	0	1443,4
1995	0	0	7	97,9	57,9	194,1	206	294,9	175	86	0	0	1118,7
1996	0	0	0,5	37,7	181,3	267,7	103	317,2	156	60,4	0	0	1124,1
1997	0	0	0	30,6	109	161,2	187	290,6	295,6	97,1	2,5	0	1173,8
1998	0	0	0	0	87,3	66,3	183	179,9	228,8	73,5	0	0	818,3
1999	0	0	0	3,5	100	130,8	177	257,1	286,6	88,3	0	0	1043,1
2000	0	0	0	16,2	25,8	94,7	201	231,4	214,4	90,7	0	0	874
2001	0	0	0	31,9	184,3	174,4	288	195,3	230,3	37	0	0	1141
2002	0	0	0	35	82,4	119,2	141	196,1	142	60,5	4,5	0	780,4
2003	0	0	0	37,2	74,7	130,3	216	140	80,5	107	0	0	785,4
2004	0	0	0	35,8	196,7	132	139	102	15,8	17	0	0	638,3
2005	0	0	0	18,5	41,2	124,3	181	142,3	17,1	14,5	0	0	538,8
2006	0	0	0	24,7	115,5	13,2	13,8	328,4	229,5	45,8	0	0	770,9
2007	0	0	0	57	138	81,4	305	410,8	81,4	**	0	0	1073,8
2008	0	0	0	64,9	106	119	145	292,5	281,5	**	0	0	944
2009	0	0	0	0	0,3	65,6	81,8	65,6	268,8	89	0	0	571,1
2010	0	0	0	39,9	77,1	140,5	118	274,5	130,7	103	0	0	884,2
Moyenne	0	0	1,207	32,85	96,9	125,5	200	249,53	180	59,2	1,27	0,329	943,38

Annexe 5d. Données pluviométriques (mm) de Bénoye de 1970 à 2009 (Tala1)

Année	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Cumul
1970	0,0	0,0	1,1	41,1	84,6	135,1	242,9	313,0	252,3	22,4	0,0	0,0	1092,5
1971	0,0	0,0	3,1	32,4	65,4	113,3	234,7	181,6	98,9	42,2	0,0	0,0	771,6
1972	0,0	0,0	4,5	40,7	39,8	109,3	112,3	353,1	79,7	26,2	3,8	0,0	769,4
1973	0,0	0,0	0,0	0,0	87,0	98,5	213,3	253,1	116,8	49,5	0,0	0,0	818,2
1974	0,0	0,0	3,2	5,8	53,7	147,7	152,1	99,6	187,3	64,5	0,0	0,0	713,9
1975	0,0	0,0	22,0	22,2	54,4	197,9	202,2	212,5	287,0	51,8	0,0	0,0	1050,0
1976	0,0	11,8	0,0	28,2	94,7	132,4	253,7	162,6	195,3	79,5	0,0	0,0	958,2
1977	0,0	0,0	0,0	0,0	23,5	86,8	191,9	381,8	108,5	26,9	0,0	0,0	819,4
1978	0,0	0,0	9,7	75,7	134,8	148,4	257,3	334,7	168,1	40,5	0,0	0,0	1169,2
1979	0,0	0,0	3,2	38,0	125,5	175,3	239,6	246,3	135,8	66,5	4,0	0,0	1034,2
1980	0,0	0,0	5,2	35,8	119,0	152,7	270,6	269,7	202,9	49,3	1,1	0,0	1106,3
1981	0,0	0,0	0,5	51,7	102,9	84,7	268,8	284,2	179,2	30,2	2,0	0,0	1004,2
1982	0,0	0,4	8,2	20,2	87,9	156,4	201,0	276,1	134,9	67,4	0,0	0,0	952,5
1983	0,0	0,0	0,0	3,5	31,4	129,3	117,4	254,6	124,6	0,0	0,0	0,0	660,8
1984	0,0	0,0	11,3	41,1	107,6	120,3	148,7	116,3	103,2	33,6	12,2	0,0	694,3
1985	0,1	0,0	29,7	21,3	85,5	154,1	263,2	186,4	115,7	27,9	1,6	0,0	885,5
1986	0,0	2,5	13,6	16,7	47,9	130,3	274,5	239,5	156,8	70,8	0,0	0,0	952,6
1987	0,0	0,0	2,6	9,0	55,0	116,5	120,8	128,4	285,2	31,7	0,0	0,0	749,2
1988	0,0	0,0	0,3	7,8	110,0	165,1	422,7	312,5	335,0	8,3	0,0	0,0	1361,7
1989	0,0	0,0	0,1	25,3	68,0	136,9	218,3	180,5	161,7	59,6	0,0	0,0	850,4
1990	0,0	0,0	0,0	35,0	60,4	187,0	192,5	221,5	145,0	41,6	0,2	0,0	883,2
1991	0,0	0,0	0,0	44,3	218,0	226,3	158,9	298,5	175,9	66,0	0,0	0,0	1187,9
1992	0,0	0,0	0,0	5,0	101,0	124,5	224,0	297,2	223,1	14,5	21,0	0,0	1010,3
1993	0,0	0,0	2,0	93,5	94,5	64,0	258,5	243,0	49,0	34,0	4,5	0,0	843,0
1994	0,0	0,0	4,0	21,0	61,5	236,5	224,5	363,5	196,8	68,5	0,0	0,0	1176,3
1995	0,0	0,0	9,0	32,0	57,7	184,4	238,0	262,0	125,1	83,0	0,0	0,0	991,2
1996	0,0	0,0	0,0	52,0	50,0	169,0	270,9	131,0	315,2	23,0	0,0	0,0	1011,1
1997	0,0	0,0	0,0	52,0	82,0	192,4	407,0	239,3	**	80,0	0,0	0,0	1052,7
1998	0,0	0,0	0,0	0,0	98,0	269,9	230,3	228,0	151,0	77,1	10,0	0,0	1064,3
1999	0,0	5,0	0,0	8,9	116,5	170,0	160,9	355,4	208,3	223,0	24,0	0,0	1272,0
2000	0,0	0,0	1,5	31,3	59,0	129,6	183,0	242,7	126,5	23,0	0,0	0,0	796,6
2001	0,0	0,0	1,2	10,6	107,9	139,4	298,0	391,9	203,2	38,6	0,0	0,0	1190,8
2002	0,0	0,0	0,0	51,7	17,0	148,2	248,3	290,0	177,0	**	0,0	0,0	932,2
2003	0,0	0,0	0,0	9,3	116,3	287,0	357,6	406,4	237,6	41,0	9,0	0,0	1464,2
2004	0,0	0,0	0,0	49,0	83,0	118,3	270,0	223,4	161,4	48,4	14,0	0,0	967,5
2005	0,0	0,0	7,0	75,0	108,2	257,1	325,0	249,0	242,1	14,9	0,0	0,0	1278,3
2006	0,0	0,0	0,0	34,3	43,8	65,1	165,5	290,0	**	**	0,0	0,0	598,7
2007	0,0	0,0	0,0	37,0	106,4	138,0	205,0	211,2	134,8	58,2	6,0	0,0	896,6
2008	0,0	0,0	0,0	20,0	33,7	**	**	187,0	398,1	28,8	0,0	0,0	667,6
2009	0,0	0,0	0,0	31,2	79,6	123,7	328,6	296,5	191,9	44,0	0,0	0,0	1095,5

Annexe 6. Questionnaire de caractérisation des pratiques de gestion des biomasses de la fertilité des sols.

1. Identification de l'exploitant

Numéro :	Date :
Enquêteur :	Terroir agropastoral :
Village :	Campement :
Nom de l'exploitant	Prénom de l'exploitant
Age	Ethnie

2. Historique de l'unité de production

2.1. Installation

Année d'installation.....

Cause installation.....

2.2. Les activités extra agricoles :

3. Aujourd'hui : pendant la campagne agricole 2006-2007

3.1. L'Unité de production

La famille

Nombre de femmes :

Autres hommes (dépendants, ouvriers permanents, bergers) :

Nombre d'enfants (>15 ans) :

Nombre d'enfants (< 15 ans) :

Nombre total d'individus à nourrir :

Nombre total actifs (champs et ménages) :

Les équipements et matériels agricoles

Nombre de bœufs dressés :

Nombre d'ânes :

Nombre de bovins d'élevage

Nombre Bovins de trait :

Nombre Ovins :

Nombre Caprins :

Nombre d'ânes :

Nombre Chevaux :

Nombre corps butteurs :

Nombre de charrues :

Nombre de charrettes bovines :

Nombre charrettes asine :

Autres (à préciser)

3.2. Système de production, gestion des biomasses et de la fertilité des sols

Quelles sont les éléments vous permettant de décider de la mise en jachère de vos parcelles cultivées:

espèces végétales indicatrices de la pauvreté des sols (les citer et noter temps de la première apparition après mise en jachère);

- baisse des rendements (espèce cultivée à préciser)
- enherbement (citer espèces dominantes et noter temps de la première apparition après mise en culture)
- Texture sableuse Argileuse Argilo- sableuse
- sol dénudé (absence de la matière organique en surface)
- Sol compacté Sol érodé (trace d'érosion) ensablement de la parcelle
- autres (préciser)

Quelles sont les éléments vous permettant de remettre en culture une parcelle mise en jachère ?

- présence des espèces végétales indicatrices de la restauration de la fertilité des sols (les citer et noter le temps de la première apparition après mise en jachère);
- durée de la jachère Quelle durée?
- couleur du sol (précise la couleur en français et langue locale)
- Texture : argileuse argilo- sableuse
- présence de la matière organique en surface : résidus de récolte déchets animaux Autres (préciser)
- Autres (préciser)

3.2.1 - Principales cultures pratiquées et superficies (campagne 2006/2007)

Plan parcellaire de la campagne 2006/2007

Parcelles	Culture 2006	Surfaces	Localisation parcelle par rapport au village, quartier	Type de sol (noms locaux + caractéristiques)	Type de tenure foncière (propriété, héritage, location, emprunt...)**
1	coton				
2	Maïs				
3	Arachide				
4	Sorgho				
5	Niébé				
8	Jachère et durée				
	Autres				

***Tenure foncière : expliquer les modalités s'il s'agit de la location, emprunt et don (sur le verso de la page)

Dans quelles parcelles ruisselle l'eau ?

Dans quelle parcelle stagne l'eau ?

Quelles sont vos parcelles qui ont bien produit ?.....

Et pourquoi ? (Qualité du sol, conduite technique, fatalité, type de culture, autres raisons ?)

Que faites vous pour les maintenir aussi productives?.....

Quelles sont vos parcelles qui produisent moyennement ?.....

Et pourquoi ? (Qualité du sol, conduite technique, fatalité, type de culture, érosion, vaine pâture, autres raisons ?)

Que faites vous pour améliorer sa production ?.....

Quelles sont les parcelles qui produisent très mal ?

Et pourquoi ? (Qualité du sol, conduite technique, fatalité, type de culture, érosion, vaine pâture, autres raisons ?).....

Quelles stratégies déployez-vous pour augmenter la production ?.....

Avez-vous personnellement une réserve foncière jamais cultivée ?

Si oui quelle est la surface :

Que faites vous des résidus des récoltes (préciser destinations et quantités)

- alimentation animale € fabrication de compost € brûlés dans les parcelles €
- vendus € don aux parents ou amis € laissés sur place dans les parcelles €
- utilisés dans les parcelles pour contra de fumure avec les éleveurs €
- autres préciser €

Utilisation de la fumure organique

Mode de production (poudrette, fumier, compost) :

Fosse à compost € Etable à fumier Parc Achat de poudrette

3.2.2 - Etat parcellaire et aménagements

Sur quelles parcelles avez vous fait des aménagements

- Diguettes
- Bandes antiérosives (herbe, haie, branchage, plantation d'arbre, etc.

Pourquoi faites vous ces aménagements?

Dans le village connaissez vous combien de paysans qui font des aménagement dans leurs parcelles ?

Si oui préciser sa nature et sa superficie si possible.

3.2.3 - Itinéraires techniques et contraintes

Culture de coton : Evaluer la conduite technique la parcelle de coton en mentionnant les contraintes et les succès rencontrés dans chaque opération technique

Coordonnées géographiques :

Paramètres		Succession culturale sur parcelle coton				
		2002/ 2003 Cultures :	2003/2004 Cultures :	2004/ 2005 Cultures :	2005/ 2006 Cultures :	2006/ 2007 Cultures :
Productions						
Rendements	Tiges					
	Grain					
Parcage FO						
Quantités FO épandues						
Labour						
Semis (lignes, volée, après boeufs, autres						
Utilisation Herbicides						
Nombre de sarclages						
Nombre de désherbage						
Quantités NPK apportées						
Quantités Urée apportées						
Nombre de traitements insecticides						

Depuis combien de temps la parcelle a été mise en culture pour la première fois ?

Quelles sont les contraintes majeures pour la mise en valeur de cette parcelle ?

Quels sont les succès rencontrés sur cette parcelle ?

Les adventices les plus présents dans la parcelle (pc)

Culture de sorgho et maïs : Evaluer la conduite technique la parcelle de sorgho en mentionnant les contraintes et les succès rencontrés dans chaque opération technique

Coordonnées géographiques

Paramètres		Succession culturale sur parcelle coton				
		2002/ 2003 Cultures :	2003/2004 Cultures :	2004/ 2005 Cultures :	2005/ 2006 Cultures :	2006/ 2007 Cultures :
Productions						
Rendements	Pailles					
	Grains					
Parcage FO						
Quantités FO épandues						
Labour						
Semis (lignes, volée, après boeufs, autres						

Utilisation Herbicides					
Nombre de sarclages					
Nombre de désherbage					
Quantités NPK apportées					
Quantités Urée apportées					
Nombre de traitements insecticides					

Depuis combien de temps la parcelle a été mise en culture pour la première fois ?

Quelles sont les contraintes majeures pour la mise en valeur de cette parcelle ?

Quels sont les succès rencontrés sur cette parcelle ?

Les adventices les plus présents dans la parcelle (pc)

Culture de arachide : Evaluer la conduite technique la parcelle de arachide en mentionnant les contraintes et les succès rencontrés dans chaque opération technique

Coordonnées géographiques

Paramètres		Succession culturale sur parcelle coton				
		2002/ 2003 Cultures :	2003/2004 Cultures :	2004/ 2005 Cultures :	2005/ 2006 Cultures :	2006/ 2007 Cultures :
Productions						
Rendements	Fanes					
	Gousses					
Parcage FO						
Quantités FO épandues						
Labour						
Semis (lignes, volée, après boeufs, autres						
Utilisation Herbicides						
Nombre de sarclages						
Nombre de désherbage						
Quantités NPK apportées						
Quantités Urée apportées						
Nombre de traitements insecticides						

Depuis combien de temps la parcelle a été mise en culture pour la première fois ?

Quelles sont les contraintes majeures pour la mise en valeur de cette parcelle ?

Quels sont les succès rencontrés sur cette parcelle ?

Les adventices les plus présents dans la parcelle (pc)

Culture de riz : Evaluer la conduite technique la parcelle de riz en mentionnant les contraintes et les succès rencontrées dans chaque opération technique

Coordonnées géographiques

Paramètres		Succession culturale sur parcelle coton				
		2002/ 2003 Cultures :	2003/2004 Cultures :	2004/ 2005 Cultures :	2005/ 2006 Cultures :	2006/ 2007 Cultures :
Productions						
Rendements	Pailles					
	Grain/ Paddy					
Parcage FO						
Quantités FO épandues						
Labour						
Semis (lignes, volée, après boeufs, autres						
Utilisation Herbicides						
Nombre de sarclages						
Nombre de désherbage						
Quantités NPK apportées						
Quantités Urée apportées						
Nombre de traitements insecticides						

Depuis combien de temps la parcelle a été mise en culture pour la première fois ?

Quelles sont les contraintes majeures pour la mise en valeur de cette parcelle ?

Quels sont les succès rencontrés sur cette parcelle ?

Les adventices les plus présents dans la parcelle (pc)

Annexe 7. Superficie (ha) emblavées en céréales, légumineuses et oléagineux au Tchad de 1996 à 2010.

Années	Mil	Sorgho	Berebére	Riz	Blé	Maïs	Fonio	Tototal céréales	Arachide	Niébé	Total légumineuses	Poids terre	Sésame	Total oléagineux
1996/1997	635125	583988	91600	62305	1178	83736	1700	1459652	369912	43897	413809	22789	369912	392701
1997/1998	653225	735464	111193	87022	1200	103634	2219	1693957	398670	43943	442613	32755	396670	429425
1998/1999	828655	711735	192243	76363	2348	130582	1810	1943736	442754	128933	571687	70478	442754	513232
1999/2000	785709	644723	191826	90856	2500	134678	8245	1857717	385120	30667	415787	42007	385120	427127,3
2000/2001	791753	641709	138024	89568	1875	85014	886	1742250	437848	134463	572311	24242	437848	462090
2001/2002	848859	789447	228463	87168	1875	120936	2800	2079548	477126	158503	635629	55790	477126	532916
2002/2003	706935	630455	88000	103803	2000	118338	1000	1700866	379498	56622	436120	41344	59324	100667,6
2003/2004	872056	697766	301712	106268	1700	102975	5800	2088277	444066	169289	613355	58810	63471	122281
2004/2005	630688	655087	296187	93848	1834,5	127118	4185	1807113	369860	40392	410252	43527	43505	87031,86
2005/2006	981952	792044	343950	109824	2402	184048	3183	2414220	528174	34882	563056	9804	59147	68951
2006/2007	909366	953311	409080	109504	1865	179428	*	2562554	485968	26731	512699	*	148458	148458
2007/2008	897624	826144	456650	85196	4500	197183	*	2467297	453587	110665	564252	*	96271	96271
2008/2009	929973	873295	333000	110854	4500	235082	*	2486704	546375	114986	661361	*	105211	105211
2009/2010	943260	914099	445450	124708	25	212628	*	2640170	625001	75484	700485	11275	178482	189757
2010/2011	1117614	1302088	592245	150033	679	303708	*	3466367	1074804	166790	1241594	17225	236595	253819,5
Moyenne	835520	783423,7	281308,2	99154,7	2032,1	154606	3182,78	2160695,2	494584	89083,13	583667,3	30717,554	233326	264043,8

Annexe 8. Rendements (kg ha⁻¹) des céréales, légumineuses et oléagineux au Tchad de 1996 à 2010.

Années	Mil	Sorgho	Berebére	Riz	Blé	Maïs	Fonio	Moyenne céréale	Arachide	Niébé	Moyenne légumineuses	Sésame	Poids terre	Moyenne oléagineux
1996/1997	405,6	603,6	1000,3	1568,5	2249,6	891,3	560,0	601,3	703,1	478,4	590,8	703,1	849,4	776,25
1997/1998	380,2	580,0	841,7	1290,8	3000,0	956,6	560,2	582,0	884,1	542,9	713,5	1644,8	785,7	1215,2
1998/1999	443,2	722,1	910,6	1312,5	2022,6	1363,5	387,3	689,4	1154,0	559,5	856,8	1154,0	780,6	967,31
1999/2000	459,6	706,7	911,1	1742,1	1434,0	699,1	275,3	662,0	919,0	579,1	749,1	965,5	805,2	885,38
2000/2001	326,9	610,4	864,2	1039,7	1433,6	753,0	409,7	533,5	819,4	532,6	676,0	819,4	924,5	871,98
2001/2002	468,4	629,8	897,4	1286,8	1899,7	870,7	418,6	635,7	939,1	525,9	732,5	939,1	762,3	850,7
2002/2003	505,6	762,4	553,4	1299,4	2000,0	712,8	350,0	715,6	1001,2	517,1	759,2	412,9	843,4	628,12
2003/2004	592,1	809,3	952,6	1185,9	1700,0	1145,7	477,6	774,9	934,2	516,5	725,4	331,8	787,0	559,41
2004/2005	471,8	686,1	896,4	970,5	1967,4	845,1	472,9	667,1	1041,2	344,6	692,9	403,4	817,2	610,3
2005/2006	538,9	702,8	1313,7	1326,4	1500,0	1003,2	*	775,2	920,6	565,3	743,0	437,9	672,0	554,95
2006/2007	601,5	810,4	937,8	1026,3	1000,0	968,0	*	864,3	418,0	*	418,0	*	503,7	503,7
2007/2008	552,0	697,9	1278,8	1248,6	1865,0	1020,7	*	1023,7	415,9	*	415,9	*	617,9	617,9
2008/2009	507,2	675,9	940,5	1569,6	1800,0	942,9	*	1003,6	385,1	*	385,1	*	539,6	539,6
2009/2010	338,2	657,4	708,0	1048,1	2000,0	983,1	*	827,9	344,1	*	344,1	*	642,7	642,7
2010/2011	577,8	663,4	1219,4	1061,8	2500,0	816,8	*	971,0	441,9	*	441,9	409,2	490,4	449,81
Moyenne	477,9	687,9	948,4	1265,1	1891,5	931,5	434,6	755,1	754,7	516,2	616,3	781,2	747,4	721,4

Annexe 9. Productions (tonnes) céréales, légumineuses et oléagineux au Tchad de 1996 à 2010.

Année	Mil	Sorgho	Berebére	R paddy	Blé	Maïs	Fonio	T.céréales	Arachide	Niébé	T.légum	Sésame	Poids terre	T. oléagineux
1995/1996	227735	437448	97711	78978	2642	62901	285	907700	292581	...		...	...	...
1996/1997	257631	352517	91629	97728	2650	74631	952	877738	260098	21002	281100	260098	19356	279454
1997/1998	248384	426592	93587	112326	3600	99141	1243	985833	352462	23858	376320	652432	25734	678166
1998/1999	367259	513930	175058	100230	4749	178047	701	1339974	510940	72142	583082	510940	55016	565956
1999/2000	361095	455634	174781	158282	3585	94151	2270	1229738	353927	17760	371687	371852	...	...
2000/2001	258828	391714	119284	93120	2688	64014	363	929515	358791	71621	430412	358791	22412	381203
2001/2002	397608	497227	205025	112167	3562	105295	1172	1322056	448089	83349	531438	448089	42526	490615
2002/2003	357425	480686	48700	134880	4000	84349	350	1217140	379968	29282	409250	24493	...	...
2003/2004	516341	564717	287419	126024	2890	117978	2770	1618139	414868	87443	502311	21062	46282	67344
2004/2005	297529	449427	265494	91083	-	107422	1979	1205589	385103	13918	399021	17548	...	...
2005/2006	529182	556667	451855	145667	3603	184635	...	1871609	486255	19720	505975	25902	6588	32490
2006/2007	546953	772608	383632,1	112380	1865	173684	...	1991121,9	420016	...	...	62049,5	...	...
2007/2008	495486	576571	583950	106378	8393	201257	...	1972034,8	464327,8	68383,65	532711,5	40040,9	...	...
2008/2009	471641	590232	313200	173992	8100	221661	...	1778825,4	548342,1	62047,3	610389,4	40517	...	...
2009/2010	318981	600963	315387,6	130704	50	209031	...	1575116,6	517449	48510	565959	61415	5228,75	66644
2010/2011	645807	863746	722183	159302	1698	248078	...	2640813,9	1043650	81789,218	1125439	104545	7049,2	111594
Moyenne	393618	533167	270556	120828	3605	139142	1099	1466434	452304	50059	516078	199985	25577	297052

Annexe 10. Tableau d'analyse de variance des caractéristiques des sols cultivés en arachide

Source	Variable dépendante	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Modèle corrigé	PH	,963	5	,193	3,004	,060
	MO	2,110	5	,422	4,946	,013
	C	21,569	5	4,314	2,624	,085
	NT	,103	5	2,053E-02	2,676	,081
	PT	4375,613	5	875,123	3,979	,026
	PBR	45,083	5	9,017	2,723	,077
Intercept	PH	601,981	1	601,981	9393,729	,000
	MO	11,965	1	11,965	140,242	,000
	C	324,360	1	324,360	197,298	,000
	NT	2,896	1	2,896	377,537	,000
	PT	195157,032	1	195157,032	887,361	,000
	PBR	160,103	1	160,103	48,357	,000
PROD	PH	,963	5	,193	3,004	,060
	MO	2,110	5	,422	4,946	,013
	C	21,569	5	4,314	2,624	,085
	NT	,103	5	2,053E-02	2,676	,081
	PT	4375,613	5	875,123	3,979	,026
	PBR	45,083	5	9,017	2,723	,077
Erreur	PH	,705	11	6,408E-02		
	MO	,939	11	8,532E-02		
	C	18,084	11	1,644		
	NT	8,438E-02	11	7,671E-03		
	PT	2419,225	11	219,930		
	PBR	36,420	11	3,311		
Total	PH	613,908	17			
	MO	13,833	17			
	C	348,589	17			
	NT	3,111	17			
	PT	199696,167	17			
	PBR	223,778	17			
Total corrigé	PH	1,668	16			
	MO	3,049	16			
	C	39,654	16			
	NT	,187	16			
	PT	6794,838	16			
	PBR	81,503	16			

Annexe 11. Tableau d'analyse de variance du bilan partiel

Tests des effets inter-sujets

Source	Variable dépendante	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Modèle corrigé	BIOMASSE	17926470,200	19	943498,432	4,263	,000
	PEXPORTE	70980,323	19	3735,806	12,688	,000
	NEXPORTE	3077,672	19	161,983	8,412	,000
Intercept	BIOMASSE	888897777,800	1	888897777,800	4016,668	,000
	PEXPORTE	1194607,822	1	1194607,822	4057,329	,000
	NEXPORTE	71082,823	1	71082,823	3691,332	,000
FUMUR	BIOMASSE	12212611,825	4	3053152,956	13,796	,000
	PEXPORTE	11310,542	4	2827,636	9,604	,000
	NEXPORTE	827,087	4	206,772	10,738	,000
RESIDU	BIOMASSE	2605770,100	3	868590,033	3,925	,013
	PEXPORTE	55672,701	3	18557,567	63,028	,000
	NEXPORTE	2051,925	3	683,975	35,519	,000
FUMUR * RESIDU	BIOMASSE	3108088,275	12	259007,356	1,170	,325
	PEXPORTE	3997,080	12	333,090	1,131	,353
	NEXPORTE	198,660	12	16,555	,860	,591
Erreur	BIOMASSE	13278138,000	60	221302,300		
	PEXPORTE	17665,925	60	294,432		
	NEXPORTE	1155,401	60	19,257		
Total	BIOMASSE	920102386,000	80			
	PEXPORTE	1283254,071	80			
	NEXPORTE	75315,896	80			
Total corrigé	BIOMASSE	31204608,200	79			
	PEXPORTE	88646,249	79			
	NEXPORTE	4233,073	79			

Annexe 12. Tableau d'analyse de variance de l'azote exporté

Tests des effets inter-sujets

Source	Variable dépendante	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Modèle corrigé	N08	4767,398	19	250,916	3,084	,000
	N10	7821,463	19	411,656	5,411	,000
Intercept	N08	66128,594	1	66128,594	812,903	,000
	N10	90994,040	1	90994,040	1195,991	,000
FUMUR * RESID	N08	560,024	12	46,669	,574	,855
	N10	778,418	12	64,868	,853	,598
FUMUR	N08	921,295	4	230,324	2,831	,032
	N10	1720,178	4	430,044	5,652	,001
RESID	N08	3286,079	3	1095,360	13,465	,000
	N10	5322,868	3	1774,289	23,321	,000
Erreur	N08	4880,922	60	81,349		
	N10	4564,954	60	76,083		
Total	N08	75776,914	80			
	N10	103380,457	80			
Total corrigé	N08	9648,320	79			
	N10	12386,418	79			

Annexe 13. Tableau d'analyse de variance du phosphore exporté

Tests des effets inter-sujets

Source	Variable dépendante	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Modèle corrigé	P08	428,564	19	22,556	2,407	,005
	P10	437,823	19	23,043	4,268	,000
Intercept	P08	7932,954	1	7932,954	846,563	,000
	P10	6650,009	1	6650,009	1231,658	,000
FUMUR * RESID	P08	66,200	12	5,517	,589	,843
	P10	53,838	12	4,487	,831	,619
FUMUR	P08	110,444	4	27,611	2,946	,027
	P10	124,123	4	31,031	5,747	,001
RESID	P08	251,921	3	83,974	8,961	,000
	P10	259,862	3	86,621	16,043	,000
Erreur	P08	562,247	60	9,371		
	P10	323,954	60	5,399		
Total	P08	8923,765	80			
	P10	7411,786	80			
Total corrigé	P08	990,811	79			
	P10	761,777	79			

a R deux = ,433 (R deux ajusté = ,253)

b R deux = ,575 (R deux ajusté = ,440)

Annexe 14. Tableau d'analyse de variance des paramètres chimiques des sols

Tests des effets inter-sujets

Source	Variable dépendante	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Modèle corrigé	MO08	214,683	19	11,299	8,399	,000
	MO10	278,377	19	14,651	1,693	,080
	NT08	8,579	19	,452	1,203	,303
	NT10	,439	19	2,313E-02	,938	,545
	CN08	557,151	19	29,324	,860	,629
	CN10	159,745	19	8,408	2,785	,003
	PAS08	3312,026	19	174,317	19,959	,000
	PAS10	2645,110	19	139,216	2,244	,016
Intercept	MO08	6144,864	1	6144,864	4567,540	,000
	MO10	4052,460	1	4052,460	468,150	,000
	NT08	38,721	1	38,721	103,118	,000
	NT10	25,965	1	25,965	1052,907	,000
	CN08	6218,983	1	6218,983	182,331	,000
	CN10	6529,943	1	6529,943	2162,861	,000

	PAS08	104851,121	1	104851,121	12005,166	,000
	PAS10	92797,471	1	92797,471	1495,581	,000
FUMUR * RESID	MO08	44,781	12	3,732	2,774	,008
	MO10	149,653	12	12,471	1,441	,188
	NT08	6,414	12	,534	1,423	,196
	NT10	,267	12	2,225E-02	,902	,552
	CN08	419,746	12	34,979	1,026	,445
	CN10	81,163	12	6,764	2,240	,028
	PAS08	1129,266	12	94,105	10,775	,000
	PAS10	452,960	12	37,747	,608	,822
FUMUR	MO08	161,729	4	40,432	30,054	,000
	MO10	104,347	4	26,087	3,014	,029
	NT08	,848	4	,212	,564	,690
	NT10	,113	4	2,829E-02	1,147	,348
	CN08	30,901	4	7,725	,226	,922
	CN10	66,064	4	16,516	5,470	,001
	PAS08	2112,214	4	528,054	60,461	,000
	PAS10	1910,387	4	477,597	7,697	,000
RESID	MO08	8,172	3	2,724	2,025	,126
	MO10	24,376	3	8,125	,939	,431
	NT08	1,318	3	,439	1,170	,333
	NT10	5,921E-02	3	1,974E-02	,800	,501
	CN08	106,504	3	35,501	1,041	,385
	CN10	12,518	3	4,173	1,382	,262
	PAS08	70,546	3	23,515	2,692	,059
	PAS10	281,763	3	93,921	1,514	,226
Erreur	MO08	53,813	40	1,345		
	MO10	346,253	40	8,656		
	NT08	15,020	40	,376		
	NT10	,986	40	2,466E-02		
	CN08	1364,332	40	34,108		
	CN10	120,765	40	3,019		
	PAS08	349,353	40	8,734		
	PAS10	2481,911	40	62,048		
Total	MO08	6413,360	60			
	MO10	4677,090	60			
	NT08	62,320	60			
	NT10	27,391	60			
	CN08	8140,465	60			
	CN10	6810,453	60			
	PAS08	108512,500	60			
	PAS10	97924,491	60			
Total corrigé	MO08	268,496	59			
	MO10	624,630	59			
	NT08	23,599	59			
	NT10	1,426	59			
	CN08	1921,482	59			
	CN10	280,510	59			
	PAS08	3661,379	59			
	PAS10	5127,021	59			

- a R deux = ,800 (R deux ajusté = ,704)
b R deux = ,446 (R deux ajusté = ,182)
c R deux = ,364 (R deux ajusté = ,061)
d R deux = ,308 (R deux ajusté = -,020)
e R deux = ,290 (R deux ajusté = -,047)
f R deux = ,569 (R deux ajusté = ,365)
g R deux = ,905 (R deux ajusté = ,859)
h R deux = ,516 (R deux ajusté = ,286)

Annexe 15. Tableau d'analyse de variance du complexe absorbant

Tests des effets inter-sujets

Source	Variable dépendante	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Modèle corrigé	CEC10	21,925	19	1,154	,805	,688
	SBE2008	9,323	19	,491	4,146	,000
	SBE2010	8,972	19	,472	2,180	,019
	TS10	,391	19	2,057E-02	1,486	,144
Intercept	CEC10	1780,842	1	1780,842	1242,530	,000
	SBE2008	450,875	1	450,875	3809,804	,000
	SBE2010	357,334	1	357,334	1649,438	,000
	TS10	12,808	1	12,808	924,986	,000
FUMUR	CEC10	6,288	4	1,572	1,097	,371
	SBE2008	1,348	4	,337	2,848	,036
	SBE2010	3,981	4	,995	4,594	,004
	TS10	,136	4	3,412E-02	2,464	,060
RESID	CEC10	,273	3	9,100E-02	,063	,979
	SBE2008	,894	3	,298	2,519	,072
	SBE2010	1,979	3	,660	3,045	,040
	TS10	7,591E-02	3	2,530E-02	1,828	,158
FUMUR * RESID	CEC10	15,364	12	1,280	,893	,561
	SBE2008	7,080	12	,590	4,985	,000
	SBE2010	3,012	12	,251	1,159	,344
	TS10	,178	12	1,487E-02	1,074	,406
Erreur	CEC10	57,330	40	1,433		
	SBE2008	4,734	40	,118		
	SBE2010	8,666	40	,217		
	TS10	,554	40	1,385E-02		
Total	CEC10	1860,097	60			
	SBE2008	464,932	60			
	SBE2010	374,972	60			
	TS10	13,752	60			
Total corrigé	CEC10	79,255	59			
	SBE2008	14,057	59			
	SBE2010	17,637	59			
	TS10	,945	59			

a R deux = ,277 (R deux ajusté = -,067)

b R deux = ,663 (R deux ajusté = ,503)

c R deux = ,509 (R deux ajusté = ,275)

d R deux = ,414 (R deux ajusté = ,135)

Annexe 16. Tableau d'analyse de variance des effets des fumures et des modes de gestion des résidus sur le rendement du mil en 2008 et 2010

Tests des effets inter-sujets

Source	Variable dépendante	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Modèle corrigé	RDT08	3016160,197	19	158745,274	1,323	,204
	RDT10	2717446,205	19	143023,484	1,968	,025
Intercept	RDT08	117879644,025	1	117879644,025	982,250	,000
	RDT10	98001827,365	1	98001827,365	1348,195	,000
FUMURE	RDT08	1662264,798	4	415566,199	3,463	,013
	RDT10	1744888,099	4	436222,025	6,001	,000
RÉSIDUS	RDT08	327964,087	3	109321,362	,911	,441
	RDT10	275933,259	3	91977,753	1,265	,294
FUMURE * RÉSIDUS	RDT08	1025931,312	12	85494,276	,712	,733
	RDT10	696624,848	12	58052,071	,799	,650
Erreur	RDT08	7200588,428	60	120009,807		
	RDT10	4361467,330	60	72691,122		
Total	RDT08	128096392,650	80			
	RDT10	105080740,900	80			
Total corrigé	RDT08	10216748,625	79			
	RDT10	7078913,535	79			

Annexe 17. Tableau d'analyse de variance des effets des fumures et des modes de gestion des résidus sur les composantes du rendement du mil 2010

Tests des effets inter-sujets

Source	Variable dépendante	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Modèle corrigé	NBEPI	16571,000	19	872,158	2,100	,012
	PME	2403,710	19	126,511	2,076	,013
	BIOMASSE	21096628,291	19	1110348,857	2,254	,006
Intercept	NBEPI	632025,000	1	632025,000	1521,943	,000
	PME	80635,553	1	80635,553	1322,935	,000
	BIOMASSE	1159547836,329	1	1159547836,329	2353,620	,000
FUMUR	NBEPI	10729,600	4	2682,400	6,459	,000
	PME	1737,232	4	434,308	7,125	,000
	BIOMASSE	11271273,287	4	2817818,322	5,720	,000
RESID	NBEPI	2680,760	3	893,587	2,152	,100
	PME	295,400	3	98,467	1,615	,192
	BIOMASSE	5944934,163	3	1981644,721	4,022	,010
FUMUR * RESID	NBEPI	3160,640	12	263,387	,634	,807
	PME	371,078	12	30,923	,507	,904
	BIOMASSE	3880420,841	12	323368,403	,656	,787
Erreur	NBEPI	33222,000	80	415,275		
	PME	4876,162	80	60,952		
	BIOMASSE	39413257,652	80	492665,721		
Total	NBEPI	681818,000	100			
	PME	87915,426	100			
	BIOMASSE	1220057722,272	100			
Total corrigé	NBEPI	49793,000	99			
	PME	7279,872	99			
	BIOMASSE	60509885,943	99			

Annexe 18. Tableau d'analyse de variance des effets des fumures et des résidus des cultures sur le rendement de l'arachide

Tests des effets inter-sujets

Source	Variable dépendante	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Modèle corrigé	RDT	5582109,375	19	293795,230	2,461	,004
	BIOM	1971055,934	19	103739,786	1,036	,437
Intercept	RDT	211250000,000	1	211250000,000	1769,383	,000
	BIOM	132001963,711	1	132001963,711	1317,725	,000
FUMUR	RDT	1447265,625	4	361816,406	3,030	,024
	BIOM	79125,658	4	19781,414	,197	,939
RES	RDT	1427437,500	3	475812,500	3,985	,012
	BIOM	479061,499	3	159687,166	1,594	,200
FUMUR * RES	RDT	2707406,250	12	225617,187	1,890	,054
	BIOM	1412868,778	12	117739,065	1,175	,321
Erreur	RDT	7163515,625	60	119391,927		
	BIOM	6010450,372	60	100174,173		
Total	RDT	223995625,000	80			
	BIOM	139983470,018	80			
Total corrigé	RDT	12745625,000	79			
	BIOM	7981506,306	79			

a R deux = ,438 (R deux ajusté = ,260)

b R deux = ,247 (R deux ajusté = ,008)

Annexe 19. Tableau d'analyse de variance des effets des fumures et des résidus des cultures sur le rendement du sorgho

Tests des effets inter-sujets

Source	Variable dépendante	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Modèle corrigé	NBEP	1626,237	19	85,591	1,875	,034
	PME	7773,317	19	409,122	1,931	,028
	RDTG	1216482,956	19	64025,419	3,065	,000
	BIOM	246374789,851	19	12967094,203	8,137	,000
Intercept	NBEP	20833,513	1	20833,513	456,333	,000
	PME	61095,458	1	61095,458	288,365	,000
	RDTG	5157392,043	1	5157392,043	246,906	,000
	BIOM	1466817833,849	1	1466817833,849	920,442	,000
FUMUR	NBEP	1190,425	4	297,606	6,519	,000
	PME	3553,915	4	888,479	4,194	,005
	RDTG	420475,246	4	105118,811	5,032	,001
	BIOM	184165833,830	4	46041458,458	28,891	,000
RES	NBEP	186,337	3	62,112	1,361	,264
	PME	1795,663	3	598,554	2,825	,046
	RDTG	463034,829	3	154344,943	7,389	,000
	BIOM	48182514,069	3	16060838,023	10,078	,000
FUMUR * RES	NBEP	249,475	12	20,790	,455	,932
	PME	2423,739	12	201,978	,953	,502
	RDTG	332972,880	12	27747,740	1,328	,227
	BIOM	14026441,952	12	1168870,163	,733	,713
Erreur	NBEP	2739,250	60	45,654		
	PME	12712,105	60	211,868		
	RDTG	1253283,518	60	20888,059		
	BIOM	95616070,949	60	1593601,182		
Total	NBEP	25199,000	80			
	PME	81580,880	80			
	RDTG	7627158,517	80			
	BIOM	1808808694,649	80			
Total corrigé	NBEP	4365,487	79			
	PME	20485,422	79			
	RDTG	2469766,474	79			
	BIOM	341990860,800	79			

a R deux = ,373 (R deux ajusté = ,174)

b R deux = ,379 (R deux ajusté = ,183)

c R deux = ,493 (R deux ajusté = ,332)

d R deux = ,720 (R deux ajusté = ,632)

Annexe 20. Tableaux des analyses de variance des rendements du mil obtenus avec le DAP et la fumure organo-minérale Fom, comparées au traitement témoin.

Analyse de la variance des rendements obtenus à Bébédjia

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	290087,607	145043,803	1,520	0,246
Erreur	18	1717847,063	95435,948		
Total corrigé	20	2007934,670			

Calculé contre le modèle $Y = \text{Moyenne}(Y)$

Analyse de la variance des rendements obtenus à Ndaba

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	335919,840	167959,920	0,392	0,692
Erreur	6	2573495,610	428915,935		
Total corrigé	8	2909415,450			

Calculé contre le modèle $Y = \text{Moyenne}(Y)$

Analyse de la variance des rendements obtenus à Nguettél

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	61572,602	30786,301	0,133	0,877
Erreur	9	2084632,351	231625,817		
Total corrigé	11	2146204,953			

Calculé contre le modèle $Y = \text{Moyenne}(Y)$

Analyse de la variance des rendements obtenus à Tala1

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	38918,291	19459,145	0,850	0,473
Erreur	6	137334,651	22889,108		
Total corrigé	8	176252,941			

Calculé contre le modèle $Y = \text{Moyenne}(Y)$

Annexe 21. Tableaux des analyses de variance des rendements de l'arachide obtenus avec les arrières effets des formules DAP et Fom, comparées au traitement témoin.

Analyse de la variance des rendements obtenus à Ndaba

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	977655,341	488827,671	7,337	0,024
Erreur	6	399755,127	66625,855		
Total corrigé	8	1377410,468			

Analyse de la variance des rendements obtenus à Nguettél

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	556052,954	278026,477	0,761	0,495
Erreur	9	3288969,238	365441,026		
Total corrigé	11	3845022,192			

Analyse de la variance des rendements obtenus à Bébédjia

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	192990,511	96495,256	0,471	0,639
Erreur	9	1844582,185	204953,576		
Total corrigé	11	2037572,697			

LISTE DES PUBLICATIONS TIREES DE LA THESE

NAITORMBAIDE M., LOMPO F., GNANKAMBARY Z., OUANDAOGO N. et SEDOGO P. M., 2010. Les pratiques culturelles traditionnelles appauvrissent les sols en zone des savanes du Tchad. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 4(4): 871-881.

NAITORMBAIDE M., LOMPO F., NACRO H.B., GNANKAMBARY Z., OUANDAOGO N. et SEDOGO P. M., 2012. Incidence des pratiques culturelles et de la teneur en phosphore du sol sur la productivité des cultures dans les savanes tchadiennes. *Agronomie Africaine* 23 (2) : 111 - 122 (2011).